ORIGINAL ARTICLE

2010년 3월 20일 부산지역에 발생한 극심한 황사의 에어로솔 농도 분포 특성

정운선 · 박성화¹⁾ · 이동인* · 강덕두¹⁾ · 김동철²⁾

부경대학교 환경대기과학과, 608-737, 부산광역시 남구 대연동

¹⁾부경대학교 지구환경공학협동과정, 608-737, 부산광역시 남구 대연동

²⁾Universities Space Research Association, Columbia, MD, 21044, USA

Characterization of Aerosol Concentration during Severe Asian Dust Period at Busan, Korea in 20 March 2010

Woon-Seon Jung, Sung-Hwa Park¹⁾, Dong-In Lee*, Deok-Du Kang¹⁾, Dongchul Kim²⁾

Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

¹⁾Interdisciplinary Program of Earth Environmental Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

²⁾Universities Space Research Association, Columbia, MD, 21044, USA

Abstract

Asian dust (or yellow sand) occurring mainly in spring in East Asia is affected by the distribution of weather systems. This study was performed to investigate the characteristics of suspended particulate for Asian dust at Busan, Korea in 20 March 2010, which was one of the extreme case for the last 10 years. There was used the data of weather chart, satellite, automatic weather system (AWS), PM₁₀, laser particle counter (LPC), and backward trajectories model.

In synoptically, the high pressure was located in the northwestern part and low pressure was located in the northeastern part of Korea. The strong westerly winds from surface to upper layer makes it possible to move air masses rapidly. Air masses passing through Gobi Desert in Mongolia and Inner Mongolia plateau covered the entire Korean peninsula. As the results of aerosol analysis, PM₁₀ concentration at Gudeok mountain in Busan was recorded 2,344 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in 2300 LST 20 March 2010 and their concentration was markedly increased at coarse mode particle. In surface condition, westerly wind about 3 ~ 5 m/s was dominant and small particles of 0.3 ~ 0.5 μm were distributed on the whole. In heavy metal components analysis, the elements from the land was predominated.

Key words : Aerosol concentration, Laser particle counter, Severe asian dust

1. 서 론

황사는 주로 중국 북부나 몽골의 건조, 황토 지대에 서 바람에 날려 올라간 미세한 모래먼지가 대기 중에

퍼져서 하늘을 덮었다가 서서히 강하하는 현상 또는 강하하는 흙먼지를 말한다(KMA, 2013). 기상청의 황사 기준에서 황사주의보는 1시간 평균농도 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 2시간 이상 지속 예상될 때, 황사경보는 1시간

Received 23 September, 2013; Revised 22 November, 2013;

Accepted 6 December, 2013

*Corresponding author : Dong-In Lee, Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

Phone: +82-51-629-6639

E-mail: leedi@pknu.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.

평균농도 $800 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 2시간 이상 지속 예상될 때 황사특보를 발표하여 그 심각성에 대해 경고하고 있다. 본 연구에서 선택한 사례인 2010년 3월 20일 23시에 부산 구덕산 지점에서는 약 4배 높은 $2,344 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도를 보였다. 이는 최근 10년 이래 발생한 황사 중 매우 강한 황사에 해당한다. 특히 우리나라의 황사는 중국대륙으로부터 기상학적인 요인에 따라 대기오염물질이 장거리 이동해오며, 더욱이 부산은 한반도의 남동쪽에 위치하고 있어, 북서쪽에 위치한 중국과 한반도 내륙의 입자가 동쪽으로 이동하기 때문에 에어로솔의 영향을 알아보는 데 적합한 지점에 해당한다.

현재까지 국내에서는 황사의 발원지 연구(전 등, 2003; 정 등, 2004), 황사의 종관상태 분석 연구(김 등, 2004; 강, 2010), 황사의 물리·화학적 특성 연구(김과 최, 2002; 신 등, 2004) 등이 이루어졌다. 특히 에어로솔의 특징을 규명하기 위해서는 입자의 크기가 중요한 요소 중 하나이지만, 대기 중 입자의 크기별 농도에 대한 연구는 실제 장비가 동반되어야 하므로 어려움이 있다. 에어로솔 입자의 크기 농도 분포에 관한 연구로서 국내에서는 서해안지역(이와 조, 2007), 남서지역(이 등, 2008; 서, 2010), 남쪽 섬지역인 제주도(강 등, 2012), 내륙지역(강, 2003), 도심지역(김 등, 2001), 독립된 해양지역인 이어도 종합과학기지(박 등, 2009, 2012a, 2012b) 등에서 다양하게 이루어졌다. 국외연구로는 에어로솔 입자의 중요성(Dorsey 등, 2002), 기상조건과 에어로솔 농도간의 관계(El-Metwally와 Alfaro, 2013), 일본 북해도(이, 1989), 중국 베이징(Yu 등, 2011) 등의 연구가 이루어지고 있다. 그러나 매년 주로 봄철에 발생하는 황사는 다양한 기상학적 원인에 의해 발생하며, 그 오염의 정도가 심각하여 인체에 해를 끼치게 된다. 또한 황사에 관한 많은 연구가 수행되어 왔지만, 실제 관측 장비를 이용한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 2010년 3월 20일 극심한 황사 사례에 대하여 한반도의 남동쪽에 위치한 부산지역에서 황사 내 에어로솔의 특징을 알아보기 위하여 종관상태, 고층기상상태, 이동 경로, 에어로솔과 기상 변수간의 변동 및 대기상태 등에 대해 자세히 분석하였다.

2. 자료 및 분석 방법

기상청 부산 구덕산 지점의 PM_{10} 자료의 농도를 기준으로 2010년 3월 20일 23시에 최고 $2,344 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 가 발생한 사례를 선정하여 분석을 실시하였다. 기상청의 황사 정보 기준인 시간 평균농도 $800 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상에 비하여 본 연구에서 선택한 사례는 최고농도가 약 4배 높은 값으로써, 최근 10년 이래 발생한 황사 중 매우 강한 황사에 해당한다.

종관상태 분석을 위하여 기상청에서 제공하는 황사일기도와 정지기상위성(MTSAT-1R)의 적외광학 두께지수 IODI (infrared optical depth index) 영상을 이용하였으며, NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research) 재분석 자료를 이용하여 지상에서 300 hPa 고도까지의 종관 기상상태를 분석하였다.

고층상태 분석을 위하여 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 READY (real-time environmental applications and display system) archived meteorology 모델을 사용하여 고층 기상, 안정도, 윈드그램을 나타내었다. 또한 황사의 이동경로를 파악하기 위하여 NOAA에서 제공하는 HYSPLIT (hybrid single-particle lagrangian integrated trajectory) 모델을 사용하였다. 모델에 적용된 시간은 황사가 한반도에 유입되어 부산 지역까지 전국적으로 확대된 날을 기준으로 3일 전까지의 이동경로를 추정하였다.

지상의 기상자료는 기상청에서 제공하는 부산광역시 남구 대연동 지점 (동경 129.06° , 북위 35.08°)의 온도, 풍향, 풍속과 중구 대청동 지점 (동경 129.03° , 북위 35.10°)의 습도, 압력 자료를 이용하였으며, 대기오염 자료는 부산 구덕산 지점의 PM_{10} 자료를 이용하였다. 대기 중금속 자료는 부산광역시 보건환경연구원에서 제공하는 2010년 3월 20일의 광안동 지점의 자료를 사용하였으며, 분석된 성분은 Pb, Cd, Cr, Cu, Mn, Fe, Ni, Al, Ca, Mg 등이다.

에어로솔 자료는 대한민국의 남동쪽에 위치한 부산광역시 남구 대연동 부경대학교 충무관 옥상 (동경 129.06° , 북위 35.08°)에서 2010년 3월 20일부터 21일까지 수집하였다. 입자크기별 에어로솔 체적 농도에

대한 관측을 위하여 레이저입자계수기 (laser particle counter, LPC, KANOMAX, Japan, Model : 3900)를 이용하여 28.3 L/min의 유량으로 매 10분 간격으로 에어로솔 관측을 실시하였다. 에어로솔 분석을 위한 LPC는 개개의 입자에 의한 빛의 강도와 입자 크기 사이의 관계를 이용하여 입자 크기를 추정하는 기기로서, 내장된 펌프에 의해 산란광의 광도를 특정한 산란각에 대해 측정한다. 광전자 증배관에 의해 산란되는 빛의 양에 비례하는 펄스형의 크기는 입자 크기와 관계되고, 펄스 수는 입자 수와 관계되므로, 입자의 크기 별 개수 농도를 측정한다. LPC의 측정 가능한 에어로솔의 크기 범위는 0.3 ~ 10.0 μm 로서 기본적으로 5개 채널 (0.3 ~ 0.5, 0.5 ~ 1.0, 1.0 ~ 3.0, 3.0 ~ 5.0, 5.0 ~ 10.0 μm)로 관측한다. LPC의 제원은 Table 1에 나타내었다(Park 등, 2009).

Table 1. Specification of a LPC

Item	Contents
Light collection	Wide-angle light collection by ellipsoidal mirror
Light source	Laser diode
Particle diameter	Less than 10.0 μm
Size channels (μm)	0.3, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0 and 10.0 μm
Sample flow rate	28.3 L/min

대기 중 에어로솔은 크기 범위가 매우 넓어 농도를 적절히 표현하기 위해서는 일반적으로 대수적 방법으로 입자의 크기 분포를 표현하는데, 이 때 측정된 에어로솔은 구형의 동일한 광학적 성질을 가진 물질로 구성됨을 가정한다. 수 농도 $dN = n_N(D_p)dD_p$ 가 크기 범위 ($D_p, D_p + dD_p$) 내의 입자의 수를 나타낸다고 할 때, 입자의 수 농도 $n_N(D_p)$, 표면적 농도 $n_S(D_p)$, 체적 농도 $n_V(D_p)$ 는 식 (1)과 같이 쓸 수 있다 (Seinfeld와 Pandis, 1998). 여기서 N 은 단위 체적당 입자의 개수, D_p 는 입자의 직경을 나타낸다.

$$\begin{aligned} n_N(D_p) &= \frac{dN}{dD_p} \\ n_S(D_p) &= \pi D_p^2 n_N(D_p) \\ n_V(D_p) &= \frac{\pi}{6} D_p^3 n_N(D_p) \end{aligned} \quad (1)$$

크기 별 입자의 수 농도, 표면적 농도, 체적 농도를 상용 대수적으로 표현하기 위해서 식 (2)를 사용하였다.

$$\begin{aligned} \frac{dN}{d \log D_p} &= 2.303 D_p n_N(D_p) \quad (1/\text{cm}^3) \\ \frac{dS}{d \log D_p} &= 2.303 D_p n_S(D_p) \quad (\mu\text{m}^2/\text{cm}^3) \\ \frac{dV}{d \log D_p} &= 2.303 D_p n_V(D_p) \quad (\mu\text{m}^3/\text{cm}^3) \end{aligned} \quad (2)$$

에어로솔은 작은 입자가 많을수록 수 농도, 표면적 농도, 체적 농도의 입경분포가 뚜렷하게 나타난다. 작은 입자들은 전체 입자 수에 크게 기여하지만 전체 표면적이나 체적에서 차지하는 비율은 적다. 또한 에어로솔 중에서 큰 입자가 많을수록 표면적 농도와 체적 농도가 결정된다(Reist, 1995). 이러한 입경 분포를 나타내는데 있어서 에어로솔 수 농도, 표면적 농도, 체적 농도가 다른 특징을 가지므로 이를 자세히 분석할 필요가 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 기상 상태

Fig. 1은 2010년 3월 20일 21시의 기상청 황사일기도로서 Fig. 1(a)는 2010년 3월 19일 12시, Fig. 1(b)는 2010년 3월 20일 15시, Fig. 1(c)는 2010년 3월 21일 00시, Fig. 1(d)는 2010년 3월 21일 06시의 황사 일기도를 나타낸다. Fig. 1(a)에서 19일 12시에 전체적으로 고비 사막, 내몽골 고원에서 황사가 관측되었으며, Fig. 1(b)에서 20일 15시에 황화 고원, 중국 동쪽에서 황사가 관측되어 점차 남동진하는 모습을 보였다. Fig. 1(c)에서 21일 00시는 부산 구덕산 지점의 최고 농도 2,344 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 가 나타난 시각인 23시와 가장 가까운 시간으로서, 한반도 중부와 남부 전체에 황사가 매우 짙게 나타났으며 전국적으로 황사 경보가 발표되었다. 이 때, 중국 북서부의 강한 고기압의 중심부에는 황사의 발원지인 오르도스, 내몽골, 황토 지역에 위치해 있었으며, 강한 고기압이 남동쪽에 있는 저기압을 밀어내어 기단이 점차 남동진하면서 한반도에 강한 황사가 발생하였다. Fig. 1(d)에서 21일 06시에 한반

Fig. 1. Surface weather chart for Asian dust at (a) 12 LST 19, (b) 15 LST 20, (c) 00 LST 21, (d) 06 LST 21 March 2010.

도에서 황사가 점차 소멸되어 오전에는 일본 본 섬 전체로 확산되었으며, 오후에는 소멸되었다.

Fig. 2는 정지기상위성 (MTSAT-1R)의 적외광학 두께지수 (IODI) 영상으로서, 적외광학두께지수는 황사의 강도를 지수로 나타낸 것으로 청천지표복사와 황사층을 통과한 복사의 관계를 상대적인 비(청천지표복사/황사층을 통과한 복사)로 계산한다. 따라서 복사량이 황사층에 의해 많이 소산 될수록 값은 커지고 황사의 강도가 강해짐을 나타낸다. Fig. 2(a)는 2010년 3월 19일 12시, Fig. 2(b)는 2010년 3월 20일 16시, Fig. 2(c)는 2010년 3월 20일 23시, Fig. 2(d)는 2010년 3월 21일 06시의 영상을 나타낸다. Fig. 2(c)에서

전체적으로 한반도 중부와 남부에 높은 오염농도가 나타난 것을 알 수 있다. 특히 강원도, 충청북도, 전라북도 주위 지역에는 0.07에 가까운 상대적으로 높은 값이 나타났다. Fig. 2(a)에서 19일 12시에 고비사막에서 0.02에 가까운 값이 나타났으며, 점차 Fig. 2(b)에서 남동진하여 20일 16시에는 한반도에서 0.05에 가까운 값이 나타났다. 이후 Fig. 2(d)에서 21일 06시 부터는 한반도를 지나 일본에서 0.07에 가까운 높은 IODI 값을 보였다.

Fig. 3은 NCEP/NCAR 재분석자료를 이용하여 2010년 3월 20일 21시의 부산광역시 남구 대연동 지점의 연직 단면을 나타낸 것이다. Fig. 3(a)와 (c)는 경

Fig. 2. MTSAT-1R IODI image at (a) 12 LST 19, (b) 16 LST 20, (c) 23 LST 20, (d) 06 LST 21 March 2010.

도를, Fig. 3(b)와 (d)는 위도를 나타내었으며, Fig. 3(a)와 (b)에서 실선은 상대와도를, 음영은 풍속이 10 m/s 이상인 지역을 나타내었으며, Fig. 3(c)와 (d)에서 실선은 발산 (10^6 s^{-1})을, 음영은 상당온위가 300 K 이상인 지역을 나타내었다.

Fig. 3(a)와 (b)에서 부산의 상대와도는 전체적으로 양의 값으로 반시계방향의 저기압성 회전을 보였다. 풍속은 지상에서 10 m/s 이상이며, 특히 650 hPa 이상의 고도에서 40 m/s 이상의 강한 풍속이 나타났다. Fig. 3(c)와 (d)에서 부산의 발산 값은 지상부터 950 hPa 고도까지는 $0 \sim 3 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 로 양, 950 hPa부터 250

hPa 고도까지는 $-9 \sim 0 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 로 음, 250 hPa부터 100 hPa 고도까지는 $0 \sim 12 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 로 양의 값이 나타났다. 특히 950 hPa부터 250 hPa 고도까지는 $-9 \sim 0 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 로 음의 발산 값을 나타냄으로서 상층 대부분에 강한 수렴이 나타나 하강류를 발생시켰음을 알 수 있었다. 한반도 내 황사는 지상에서부터 황사가 유입되는 고도인 800-850 hPa까지의 수렴·발산장의 변화와 크게 관여하고 있으므로(강, 2010), 본 사례에서의 수렴이 PM_{10} 농도에 큰 영향을 미쳐 극심한 황사를 나타내었을 것으로 판단된다. 상당온위는 전체적으로 330 K 이하의 작은 값이 나타났다. NCEP/NCAR 재

Fig. 3. Vertical cross section at each longitude and latitude using NCEP/NCAR reanalysis data at 12 UTC 20 March 2010. (a) and (b) wind speed and relative vorticity, (c) and (d) equivalent potential temperature and divergence.

분석자료를 통해 전체적으로 650 hPa 이상의 상층에 강한 풍속이 존재하며, 양의 상대와도가 나타남을 알 수 있었다. 전체적으로 지상부터 상층까지 풍속이 강하여 황사 수송에 더욱 영향을 주었을 것으로 사료된다.

3.2. 고층 기상 상태와 황사 이동

2010년 3월 21일 00시 부산지역의 고층 상태를 알아보기 위하여 NOAA에서 제공하는 READY archived meteorology 모델을 사용하여 Fig. 4(a)는 고층 기상 상태인 연직기상관측자료 (sounding), Fig. 4(b)는 연직 바람인 윈드그램 (windgram)을 나타내었다. Fig. 4(a)에서는 빨간색은 온도선, 초록색은 노점 온도선을 나타내는데, 지상부터 상층까지 온도선과 노점온도선이 떨어져 있어 대기가 건조하였음을 보여준다. 지상부터 약 1.4 km까지는 온도와 노점온도의 차이 (T-Td)가 약 10°C로 나타났으며, 약 1.4 km에서 12 km 높이가

지는 약 25°C 이상 큰 차이를 보였다. 지상부터 상층까지 평균 42 knot의 강한 서풍이 발생하였다. Fig. 4(b)에서는 전 시간인 20일 21시와 후 시간인 21일 03시의 풍향·풍속과 비교했을 때 보다 강한 서풍이 나타났다.

Fig. 5은 기상청 부산 구덕산 지점의 PM₁₀ 농도가 2,344 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최대였던 2010년 3월 20일 23시의 황사 입자의 이동경로를 추정하기 위하여 NOAA에서 제공하는 HYSPLIT 모델의 등엔트로피 운동을 나타낸 것이다. 3일간 500, 1,000, 1,500 m의 공기기단의 기원을 파악하고자 역궤적 분석을 실시한 결과, 세 고도 모두 비슷한 방향으로 이동한 것을 볼 수 있었다. 한반도로 유입된 황사의 경우 몽골의 고비사막과 내몽골 고원 모두를 통과한 후, 중국의 동쪽의 산둥지역과 그 해안의 거쳐 한반도 전역으로 유입된 것을 확인하였다. 특히 3일 전 공기기단은 흑해로부터 시작하여

Fig. 4. (a) Sounding, (b) windgram using READY archived meteorology at Busan at 15 UTC on 20 March 2010.

Fig. 5. Three-days back trajectories of the air mass arrived over Busan at 14 UTC on 20 March 2010.

한반도로 유입된 것으로 보아, 황사가 매우 빠른 속도로 이동하였으며 중국대륙의 대기오염물질이 일부 유입되었을 것으로 추측할 수 있다.

3.3. 지상 에어로솔의 특성 분석

3.3.1. 지상 기상 상태와 에어로솔 농도 변화

Fig. 6과 Table 2는 2010년 3월 20일부터 21일까지의 지상 기온, 상대습도, 기압, 풍향, 풍속, PM_{10} 농도 및 입경크기별 에어로솔 수, 표면적, 체적 농도를 나타내었다. 황사 덩어리는 매우 건조(정과 박, 1995)하여 지상의 대기상태의 변화가 황사의 영향을 받으므로(강, 2010), 기상상태와 PM_{10} 농도 및 에어로솔 농도 간의 비교를 수행하였다. Fig. 6(a)와 Table 2에서 기온은 일주기 변동이 나타났으며, 황사 발생 직전인 20일 19시 이후부터 급격히 기온이 감소하였다. 상대습도는 20일 00시부터 18시까지는 80% 이상, 황사가 발생한 시각인 23시 40분경에는 26%, 21일 04시에는 45%로 조금 상승하였다가 이후 감소하는 모습을 보였다. 기압은 20일 17시에 997.5 hPa로 최저를 나타내었으며 황사 발생 후 계속적으로 상승하였다. 풍향은

Fig. 6. Time variation of (a) wind, temperature (°C), humidity (%), and pressure (hPa), (b) PM₁₀ (μg/m³) and number concentration (#/cm³), (c) PM₁₀ (μg/m³) and surface area concentration (μm²/cm³), and (d) PM₁₀ (μg/m³) and volume concentration (μm³/cm³) of aerosol particles at each channel from 20 to 21 March 2010.

20일 낮에 남서계열에서 20시 이후 급격히 북서계열로 변화하였으며, 20일 강했던 풍속은 21일 낮부터 약하게 나타났다.

Fig. 6(b)에서는 PM₁₀ 농도가 처음 최소로 나타난 20일 05시부터 09시까지 평균 11.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (최저 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 최대가 나타난 20일 21시부터 21일 01시까지는 평균 1,671.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (최고 2,344 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 급격한 증가가 나타났다. 이 때 전체적인 에어로솔 수 농도 분포는 0.3 ~ 0.5 μm 의 작은 입자는 185 개/ cm^3 에서 128 개/ cm^3 로 31% 감소하였다. 반면 0.5 ~ 1.0 μm , 1.0 ~ 3.0 μm , 3.0 ~ 5.0 μm , 5.0 ~ 10.0 μm 의 입자는 5 개/ cm^3 에서 47 개/ cm^3 , 0.08 개/ cm^3 에서 9.83 개/ cm^3 , 0.0005 개/ cm^3 에서 1.1527 개/ cm^3 , 0.0004 개/ cm^3 에서 0.3405 개/ cm^3 의 급격한 증가가 나타났다. PM₁₀ 농도가 최대로 나타난

20일 21시부터 21일 01시까지 평균 1,671.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (최고 2,344 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 그 후 최소로 나타난 21일 14시부터 18시까지의 평균 21.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (최저 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 급격한 감소가 나타났다. 이 때 전체적인 에어로솔 수 농도 분포는 0.3 ~ 10.0 μm 전 영역에 대하여 감소가 나타났으며, 5개의 모든 채널에 대하여 평균 90% 이상의 높은 감소율을 보였다. 3월 20일 23시에 2,344 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 높은 PM₁₀ 농도를 나타낸 사례에서 0.3 ~ 0.5 μm 의 작은 입자의 수 농도는 조금 감소한 반면 0.5 ~ 10.0 μm 이상의 큰 입자의 수 농도는 급격히 증가하는 모습을 보였다. 이는 조대입자에 해당하는 황사 입자의 수가 증가했음을 나타낸다(Seinfeld와 Pandis, 1998). 황사 발생 후에는 전 영역의 에어로솔 수 농도가 감소하였다.

Table 2. The temperature ($^{\circ}\text{C}$), wind direction ($^{\circ}$), wind speed (m/s), humidity (%), pressure (hPa), PM₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), number concentration (#/ cm^3), surface area concentration ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$), and volume concentration ($\mu\text{m}^3/\text{cm}^3$) of aerosol particle in minimum 1 (Min.1), maximum (Max.), and minimum 2 (Min.2) value from 20 to 21 March 2010

		Min.1	Max.	Min.2
Parameters		2010-03-20 05:00 ~ 09:00	2010-03-20 21:00 ~ 2010-03-21 01:00	2010-03-21 14:00 ~ 18:00
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)		16.6 $\pm$ 0.3	13.0 $\pm$ 0.8	11.1 $\pm$ 0.3
Wind direction ($^{\circ}$)		235.4 $\pm$ 9.1	277.2 $\pm$ 12.2	282.0 $\pm$ 62.5
Wind speed (m/s)		5.1 $\pm$ 0.6	3.6 $\pm$ 0.8	3.3 $\pm$ 0.6
Humidity (%)		90.0 $\pm$ 1.3	29.4 $\pm$ 1.6	15.9 $\pm$ 1.4
Pressure (hPa)		1003.5 $\pm$ 0.3	1003.1 $\pm$ 0.9	1014.0 $\pm$ 0.5
PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		11.6 $\pm$ 3.6	1671.2 $\pm$ 633.1	21.6 $\pm$ 7.2
dN/dlogDp (#/ cm^3)	0.3 ~ 0.5 μm	184.9152 $\pm$ 5.9448	127.9546 $\pm$ 2.5993	54.8177 $\pm$ 3.4601
	0.5 ~ 1.0 μm	4.5862 $\pm$ 0.5150	47.0307 $\pm$ 4.5769	0.7870 $\pm$ 0.0758
	1.0 ~ 3.0 μm	0.0818 $\pm$ 0.0200	9.8339 $\pm$ 2.2874	0.0885 $\pm$ 0.0121
	3.0 ~ 5.0 μm	0.0005 $\pm$ 0.0002	1.1527 $\pm$ 0.1749	0.0228 $\pm$ 0.0040
	5.0 ~ 10.0 μm	0.0004 $\pm$ 0.0002	0.3405 $\pm$ 0.0535	0.0079 $\pm$ 0.0018
dS/dlogDp ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$)	0.3 ~ 0.5 μm	52.2836 $\pm$ 1.6808	36.1783 $\pm$ 0.7349	15.4993 $\pm$ 0.9783
	0.5 ~ 1.0 μm	3.6020 $\pm$ 0.4045	36.9378 $\pm$ 3.5947	0.6181 $\pm$ 0.0595
	1.0 ~ 3.0 μm	0.2569 $\pm$ 0.0630	30.8940 $\pm$ 7.1860	0.2781 $\pm$ 0.0380
	3.0 ~ 5.0 μm	0.0133 $\pm$ 0.0047	32.5915 $\pm$ 4.9445	0.6459 $\pm$ 0.1118
	5.0 ~ 10.0 μm	0.0331 $\pm$ 0.0123	26.7414 $\pm$ 4.1982	0.6209 $\pm$ 0.1407
dV/dlogDp ($\mu\text{m}^3/\text{cm}^3$)	0.3 ~ 0.5 μm	2.6142 $\pm$ 0.0840	1.8089 $\pm$ 0.0367	0.7750 $\pm$ 0.0489
	0.5 ~ 1.0 μm	0.3002 $\pm$ 0.0337	3.0781 $\pm$ 0.2996	0.0515 $\pm$ 0.0050
	1.0 ~ 3.0 μm	0.0428 $\pm$ 0.0105	5.1490 $\pm$ 1.1977	0.0464 $\pm$ 0.0063
	3.0 ~ 5.0 μm	0.0067 $\pm$ 0.0024	16.2958 $\pm$ 2.4723	0.3229 $\pm$ 0.0559
	5.0 ~ 10.0 μm	0.0276 $\pm$ 0.0102	22.2845 $\pm$ 3.4985	0.5174 $\pm$ 0.1173

Fig. 6(c)에서는 20일 05시부터 09시까지의 PM_{10} 농도의 처음 최소값과 20일 21시부터 21일 01시까지의 최대값 사이에는 급격한 증가가 나타났다. 이 때 전체적인 에어로솔 표면적 농도 분포는 $0.3 \sim 0.5 \mu m$ 의 작은 입자는 $52 \mu m^2/cm^3$ 에서 $36 \mu m^2/cm^3$ 로 31% 감소하였다. 반면 $0.5 \sim 1.0 \mu m$, $1.0 \sim 3.0 \mu m$, $3.0 \sim 5.0 \mu m$, $5.0 \sim 10.0 \mu m$ 의 입자는 $4 \mu m^2/cm^3$ 에서 $37 \mu m^2/cm^3$, $0.3 \mu m^2/cm^3$ 에서 $30.9 \mu m^2/cm^3$, $0.01 \mu m^2/cm^3$ 에서 $32.59 \mu m^2/cm^3$, $0.03 \mu m^2/cm^3$ 에서 $26.74 \mu m^2/cm^3$ 의 급격한 증가가 나타났다. 20일 21시부터 21일 01시까지의 PM_{10} 농도의 최대값과 21일 14시부터 18시까지의 최소값 사이에는 급격한 감소가 나타났다. 이 때 전체적인 에어로솔 표면적 농도 분포는 $0.3 \sim 10.0 \mu m$ 전 영역에 대하여 감소가 나타났으며, 5개의 모든 채널에 대하여 평균 90% 이상의 높은 감소율을 보였다. 황사 발생 전에는 $0.3 \sim 0.5 \mu m$ 의 작은 입자의 표면적 농도는 조금 감소한 반면 $0.5 \sim 10.0 \mu m$ 이상의 큰 입자의 표면적 농도는 급격히 증가하는 모습을 보였다. 20일 20시 30분부터 21일 02시 30분까지는 5개 채널이 모두 비슷한 표면적 농도를 나타내었으며 그 평균은 약 $31 \mu m^2/cm^3$ 정도로 나타났다. 이는 표면적이 작은 입자의 농도는 증가하고, 표면적이 큰 입자의 농도는 감소하였음을 알 수 있다. 황사 발생 후 전 영역의 에어로솔 표면적 농도는 감소하였다.

Fig. 6(d)에서는 20일 05시부터 09시까지의 PM_{10} 농도의 처음 최소값과 20일 21시부터 21일 01시까지의 최대값 사이에는 급격한 증가가 나타났다. 이 때 전체적인 에어로솔 체적 농도 분포는 $0.3 \sim 0.5 \mu m$ 의 작은 입자는 $2.6 \mu m^3/cm^3$ 에서 $1.8 \mu m^3/cm^3$ 로 31% 감소하였다. 반면 $0.5 \sim 1.0 \mu m$, $1.0 \sim 3.0 \mu m$, $3.0 \sim 5.0 \mu m$, $5.0 \sim 10.0 \mu m$ 의 입자는 $0.3 \mu m^3/cm^3$ 에서 $3.1 \mu m^3/cm^3$, $0.04 \mu m^3/cm^3$ 에서 $5.1 \mu m^3/cm^3$, $0.006 \mu m^3/cm^3$ 에서 $16.296 \mu m^3/cm^3$, $0.03 \mu m^3/cm^3$ 에서 $22.28 \mu m^3/cm^3$ 의 급격한 증가가 나타났다. 20일 21시부터 21일 01시까지의 PM_{10} 농도의 최대값과 21일 14시부터 18시까지의 최소값 사이에는 급격한 감소가 나타났다. 이 때 전체적인 에어로솔 체적 농도 분포는 $0.3 \sim 10.0 \mu m$ 전 영역에 대하여 감소가 나타났으며, 5개의 모든 채널에 대하여 평균 90% 이상의 높은 감소율을 보였다. 황사 발생 전에는 $0.3 \sim 0.5 \mu m$ 의 작은 입자의 체적 농도는 조금 감소한

반면 $0.5 \sim 10.0 \mu m$ 이상의 큰 입자의 체적 농도는 급격히 증가하는 모습을 보였다. 황사 발생 후 전 영역의 에어로솔 체적 농도는 감소하였다. 특히 황사 발생 전과 후에는 작은 입자는 큰 체적을, 큰 입자는 작은 체적을 나타내었다. 그러나 20일 20시 30분부터 21일 02시 30분까지는 작은 입자의 체적 농도는 감소하고 큰 입자의 체적 농도는 증가하였다. 이는 상대적으로 큰 입자에 해당하는 황사 입자가 지배적으로 나타났음을 의미한다.

Fig. 7은 20일부터 21일까지 전체, 황사 발생 전 최저 농도인 20일 05시부터 09시까지, 황사 발생 시간인 20일 21시부터 21일 01시까지, 황사 발생 후 최저 농도인 21일 14시부터 18시까지 평균한 입자 크기 별 에어로솔 농도를 나타내었으며 (a)는 수 농도, (b)는 표면적 농도, (c)는 체적 농도를 나타내었다.

Fig. 7(a)에서 에어로솔 입자의 크기 별 수 농도에서 $0.3 \sim 0.5 \mu m$ 의 작은 입자의 수 농도는 최저, 최고, 평균이 비슷하게 나타났으며, 특히 황사 발생 후 (Min.2)에는 작은 입자의 수 농도가 황사시보다 높게 나타났다. 황사 발생 전 (Min.1)에는 $3.0 \mu m$ 이상 큰 입자의 수 농도가 매우 낮게 나타났다. 4 시간대 모두 작은 입자에서 높은 수 농도, 큰 입자에서 낮은 수 농도를 차례대로 나타내었다. Fig. 7(b)에서 에어로솔 입자의 크기별 표면적 농도에서도 수 농도의 변동과 유사하게 $0.3 \sim 0.5 \mu m$ 의 작은 입자의 표면적 농도는 최저, 최고, 평균이 비슷하게 나타났으며, 특히 황사 발생 후 (Min.2)에는 작은 입자의 표면적 농도가 황사시보다 높게 나타났다. 황사 발생 전 (Min.1)에는 $3.0 \mu m$ 이상 큰 입자의 표면적 농도가 매우 낮게 나타났다. 황사 발생 시 (Max.) 표면적 농도는 $0.3 \sim 10.0 \mu m$ 의 전 구간에서 비슷하게 나타났다. 황사 발생 전 (Min.1)에는 $5.0 \sim 10.0 \mu m$ 의 구간을 제외하고 작은 입자에서 높은 표면적 농도를, 큰 입자에서 낮은 표면적 농도를 나타내었으며, 황사 발생 후 (Min.2)에는 $0.3 \sim 5.0 \mu m$ 의 구간을 제외하고 작은 입자부터 큰 입자까지 비슷한 표면적 농도를 나타내었다. 황사 발생 시 (Max.)에는 전체적으로 작은 입자부터 큰 입자까지 비슷한 표면적 농도를 나타내었다. Fig. 7(c)에서 에어로솔 입자의 크기별 체적 농도에서도 수 농도의 변동과 유사하게 $0.3 \sim 0.5 \mu m$ 의 작은 입자의 체적 농도는 최저, 최고,

Fig. 7. (a) Distribution of aerosol number concentration, (b) distribution of aerosol surface area concentration, and (c) distribution of aerosol volume concentration (black star : 2010-03-20 ~ 21, black circle : 2010-03-20 05:00 ~ 09:00, white circle : 2010-03-20 21:00 ~ 2010-03-21 01:00, black inverted triangle : 2010-03-21 14:00 ~ 18:00).

평균이 비슷하게 나타났으며, 특히 황사 발생 후 (Min.2)에는 작은 입자의 체적 농도가 황사시보다 높게 나타났다. 황사 발생 전 (Min.1)에는 $3.0 \mu\text{m}$ 이상 큰 입자의 체적농도가 매우 낮게 나타났다. 평균적으로 작은 입자보다 큰 입자의 체적이 더 높게 나타난 것을 알 수 있었다. 황사 발생 전 (Min.1)에는 $5.0 \sim 10.0 \mu\text{m}$ 의 구간을 제외하고 작은 입자에서 높은 체적 농도를, 큰 입자에서 낮은 체적 농도를 나타내었으며, 황사 발생 후 (Min.2)에는 $0.3 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 의 구간을 제외하고 작은 입자에서 낮은 체적 농도, 큰 입자에서 높은 체적 농도를 차례대로 나타내었다. 황사 발생 시 (Max.)에는 전체적으로 작은 입자에서 낮은 체적 농도, 큰 입자에서 높은 체적 농도를 차례대로 나타내었다.

위 결과에서 황사 발생 전에는 작은 입자의 농도가 가장 높고 큰 입자의 농도가 가장 낮게 나타났으나, 황사 발생 시에 조대 입자의 농도가 급격히 증가하였다. 황사 발생 후에는 전체 입자의 농도가 낮게 나타났으나 황사 발생 전과 비교해 보았을 때 작은 입자의 농도는 상대적으로 낮게 나타나고 큰 입자의 농도는 상대적으로 높게 나타났다. 입경별 수 농도, 표면적 농도, 체적 농도를 비교해 봄으로써, 황사입자로 추측되는 조대입자의 변동을 살펴볼 수 있었다.

3.3.2. 풍향, 풍속별 에어로솔 농도 분포

Fig. 8(a)에서 Fig. 8(g)까지는 각각 2010년 3월 20일부터 21일까지 (a) 풍향-풍속, (a) 풍향-에어로솔 수 농도, (c) 풍속-에어로솔 수 농도, (d) 풍향-에어로솔 표면적 농도, (e) 풍속-에어로솔 표면적 농도, (f) 풍향-에어로솔 체적 농도, (g) 풍속-에어로솔 체적 농도의

분포를 나타내었다. Fig. 8(a)에서는 $3 \sim 5 \text{ m/s}$ 의 북서, 서, 남서풍이 지배적으로 나타났다.

Fig. 8(b)에서는 풍향에 따른 5개 채널의 에어로솔 수 농도 분포를 알아보았으며, $180 \sim 360^\circ$ 사이의 서풍 계열에 모든 입자들이 고루 분포하였고 특히 $270^\circ \sim 300^\circ$ 사이에 집중적으로 분포하였다. Fig. 8(c)에서는 풍속에 따른 5개 채널의 에어로솔 수 농도 분포를 알아보았으며, 풍속 약 $1.0 \sim 7.0 \text{ m/s}$ 에서 고루 분포하였다. $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 의 작은 입자는 $35 \sim 235 \text{ 개}/\text{cm}^3$, $0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 의 입자는 $0.5 \sim 55 \text{ 개}/\text{cm}^3$, $1.0 \sim 3.0 \mu\text{m}$ 의 입자는 $0.04 \sim 15 \text{ 개}/\text{cm}^3$, $3.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 의 입자는 $0.0001 \sim 2 \text{ 개}/\text{cm}^3$, $5.0 \sim 10.0 \mu\text{m}$ 의 큰 입자는 $0.5 \text{ 개}/\text{cm}^3$ 이하의 수 농도로 모두 서풍계열로서 $1.0 \sim 7.0 \text{ m/s}$ 풍속에 집중되어 분포하였다.

Fig. 8(d)에서는 풍향에 따른 5개 채널의 에어로솔 표면적 농도 분포를 알아보았으며, $180 \sim 360^\circ$ 사이의 서풍 계열에 모든 입자들이 고루 분포하였고 특히 $210^\circ \sim 240^\circ$ 사이에 $0.3 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 이하의 표면적 농도가 집중적으로 분포하였다. Fig. 8(e)에서는 풍속에 따른 5개 채널의 에어로솔 표면적 농도 분포를 알아보았으며, 풍속 약 $1.0 \sim 7.0 \text{ m/s}$ 에서 고루 분포하였다. $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 의 작은 입자는 $10 \sim 70 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, $0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 의 입자는 $0.4 \sim 45 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, $1.0 \sim 3.0 \mu\text{m}$ 의 입자는 $0.1 \sim 45 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, $3.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 의 입자는 $0.004 \sim 50 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, $5.0 \sim 10.0 \mu\text{m}$ 의 큰 입자는 $0.007 \sim 40 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 의 표면적 농도로 모두 서풍계열로서 $1.0 \sim 7.0 \text{ m/s}$ 풍속에 집중되어 분포하였다.

Fig. 8(f)에서는 풍향에 따른 5개 채널의 에어로솔

Fig. 8. (a) Wind rose, (b) rose of wind direction and aerosol number concentration, (c) rose of wind speed and aerosol number concentration, (d) rose of wind direction and aerosol surface area concentration, (e) rose of wind speed and aerosol surface area concentration, (f) rose of wind direction and aerosol volume concentration, (g) rose of wind speed and aerosol volume concentration from 20 to 21 March 2010.

체적 농도 분포를 알아보았으며, $180 \sim 360^\circ$ 사이의 서풍 계열에 모든 입자들이 고루 분포하였고 특히 $210^\circ \sim 240^\circ$ 사이에서 $0.3 \mu\text{m}^3/\text{cm}^3$ 이하, $260^\circ \sim 300^\circ$ 사이에서 $0.3 \mu\text{m}^3/\text{cm}^3$ 이상의 체적 농도가 집중적으로 분포하였다. Fig. 8(g)에서는 풍속에 따른 5개 채널의 에어로솔 체적 농도 분포를 알아보았으며, 풍속 약 $1.0 \sim 7.0 \text{ m/s}$ 에서 고루 분포하였다. $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 의 작은 입자는 $0.5 \sim 3.5 \mu\text{m}^3/\text{cm}^3$, $0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 의 입자는 $0.03 \sim 3.5 \mu\text{m}^3/\text{cm}^3$, $1.0 \sim 3.0 \mu\text{m}$ 의 입자는 $0.02 \sim 7.0 \mu\text{m}^3/\text{cm}^3$, $3.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 의 입자는 $0.002 \sim 25 \mu\text{m}^3/\text{cm}^3$, $5.0 \sim 10.0 \mu\text{m}$ 의 큰 입자는 $0.005 \sim 32 \mu\text{m}^3/\text{cm}^3$ 의 체적 농도로 모두 서풍계열로서 $1.0 \sim 7.0 \text{ m/s}$ 풍속에 집중되어 분포하였다.

풍향, 풍속별 에어로솔 수 농도, 표면적 농도, 체적 농도를 비교해 본 결과, 같은 에어로솔 입자이지만 풍향, 풍속별 다른 농도 분포를 나타내었다. 풍향, 풍속별 수 농도는 넓게 퍼져있는 반면, 상대적으로 체적 농도는 모여 있는 모습을 보였다. 또한 수 농도는 작은 입자가 높은 농도, 큰 입자가 낮은 농도를 보인 반면, 체적 농도는 작은 입자가 낮은 농도, 큰 입자가 높은 농도를 나타내었다. 표면적 농도는 수 농도와 체적 농

도의 중간적 패턴을 보였다.

3.3.3. 기상 변수와 에어로솔 수 농도의 상관관계

Table 3에서는 2010년 3월 20일부터 21일까지 기상변수(기온, 풍향, 풍속, 습도, 기압), PM_{10} 농도와 5개 채널의 에어로솔 수 농도의 상관계수를 나타내었다. $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 의 작은 에어로솔 농도는 온도와 0.88 의 양의 상관관계를 나타내었으며, 습도 또한 0.92 의 양의 상관관계를 나타내었다. 반면 기압은 -0.88 로 음의 상관관계를 나타내었다. 이는 온도와 습도가 작은 에어로솔 입자의 변동 패턴이 비슷하게 나타났으며, 기압은 반대의 패턴을 의미한다. PM_{10} 과 $0.5 \mu\text{m}$ 이상의 에어로솔 농도는 0.88 이상의 높은 양의 상관관계를 나타내었다. 이는 PM_{10} 농도에 영향을 주는 인자가 $0.5 \mu\text{m}$ 이상 입자에 해당하는 에어로솔 농도와 연관이 있다는 것을 의미한다. 에어로솔 입자 크기별 상관관계를 살펴보면 $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 의 작은 입자와의 상관계수가 $0.5 \sim 10.0 \mu\text{m}$ 의 상대적으로 큰 입자와의 상관계수보다 매우 낮게 나타났다. 그러나 $0.5 \mu\text{m}$ 이상 크기에서의 입자간의 상관관계는 0.97 이상으로 매우 높게 나타났다.

Table 3. Correlation coefficient among the meteorological parameters, PM₁₀ concentration, and number concentration of aerosol particle from 20 to 21 March 2010

	Temperature	Wind direction	Wind speed	Humidity	Pressure	PM ₁₀	0.3 ~ 0.5 μm	0.5 ~ 1.0 μm	1.0 ~ 3.0 μm	3.0 ~ 5.0 μm	5.0 ~ 10.0 μm
PM ₁₀	-0.03	0.13	-0.05	-0.26	-0.22	1.00	-	-	-	-	-
0.3 ~ 0.5 μm	0.88	-0.58	0.47	0.92	-0.88	-0.04	1.00	-	-	-	-
0.5 ~ 1.0 μm	0.16	0.06	-0.01	-0.13	-0.39	0.88	0.13	1.00	-	-	-
1.0 ~ 3.0 μm	0.07	0.14	-0.06	-0.25	-0.27	0.88	-0.01	0.97	1.00	-	-
3.0 ~ 5.0 μm	0.03	0.16	-0.08	-0.27	-0.25	0.92	-0.04	0.97	0.98	1.00	-
5.0 ~ 10.0 μm	0.03	0.16	-0.08	-0.27	-0.25	0.93	-0.04	0.97	0.98	1.00	1.00

3.3.4. 에어로솔 중금속 분석

Fig. 9와 Table 4는 부산광역시 보건환경연구원에서 운영하는 광안동 지점 대기중금속을 나타낸 것이다. 분석 사례일인 2010년 3월 20일과 비교를 위해 이전 3년인 2007년부터 2009년까지의 평균 황사 발생 시 대기 중금속 농도를 나타내었다. 분석된 성분은 Pb, Cd, Cr, Cu, Mn, Fe, Ni, Al, Ca, Mg 등이다. Fig. 9(a)에서 대기 중금속 비율은 Ca가 34%, Fe가 27%, Al이 23%, Mg가 15%로 4가지 성분의 비율이 전체의 99%에 해당하여 매우 높게 나타났다. Table 4에서 대기 중금속 농도는 Ca 49.99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Fe 40.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Al 34.31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Mg 21.62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 모두 토양기원의 성분이 강하게 나타나 내륙의 영향을 주로 받았음을 알

수 있었다. 철 등의 일반 중금속의 농도가 높게 나타난 것은 중국 고비사막 등 황사 발원지의 토양성분에 의해 함유되어 있어 황사시 미세먼지 농도가 증가됨에 따라 철 등의 중금속 농도도 함께 증가된 것으로 분석되었다. Fig. 9(b)에서 대기 중금속 농도를 이전 3년과 비교해 보았을 때, 2010년 3월 20일의 사례가 Fe, Al, Ca, Mg 입자가 월등히 높게 나타난 것을 알 수 있다. 2010년 3월 20일의 사례의 중금속 성분의 양을 수치적으로 비교해 보았을 때, Fe는 2009년에 비해 6, Al은 2008년에 비해 92배, Ca는 2009년에 비해 6배, 그리고 Mg는 2009년에 비해 7배 이상 높은 값을 나타내었다.

Fig. 9. (a) Average ratio of heavy metals elements in 20 March 2010 and (b) average concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of heavy metals elements at Gwangsan in 2007, 2008, 2009 year and 20 March 2010.

Table 4. Average concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of heavy metals elements at Gwangju in 2007, 2008, 2009 year and 20 March 2010

	Pb	Cd	Cr	Cu	Mn	Fe	Ni	Al	Ca	Mg
2007	0.080	0.000	0.056	0.073	0.548	15.201	0.026	0.548	11.281	6.569
2008	0.034	0.002	0.005	0.036	0.375	15.804	0.008	0.375	19.019	10.401
2009	0.048	0.001	0.010	0.029	0.193	6.649	0.013	3.300	8.681	2.946
2010.03.20	0.065	0.003	0.061	0.069	1.157	39.996	0.053	34.308	49.991	21.624

4. 결 론

2010년 3월 20일 강한 황사기간 중 봄철 한반도 남동쪽에 위치한 부산지역에 유입되는 황사의 물성적 특징과 에어로솔 농도 분포 특성을 알아보았다.

종관적으로는 한반도 북서부에 고기압, 북동부에 저기압이 위치하여 기단이 빠르게 동진하여 한반도에 강한 황사를 발생 시킬 수 있는 역할을 하였다. 고층 기상 상태는 건조하고 지상부터 상층까지 강한 서풍이 발생하였다. 3일간의 역궤적 분석 결과, 기단은 몽골의 고비사막과 내몽골 고원 모두를 통과한 후, 중국 동쪽의 산둥지역과 그 해안을 거쳐 한반도 전역으로 유입되었으며, 매우 빠른 속도로 이동한 점이 특징적이다.

지상의 PM_{10} 농도는 황사 발생 시 급격히 증가하였으며, 지상에서 관측한 $0.5 \sim 10.0 \mu\text{m}$ 의 에어로솔 수 농도, 표면적 농도, 체적 농도 또한 급격히 증가한 반면, $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 의 에어로솔 농도는 감소하였다. 황사 발생 전에는 작은 입자의 농도가 가장 높고 큰 입자의 농도가 가장 낮게 나타났으나, 황사 발생 시에 조대 입자의 농도가 급격히 증가하였다. 황사 발생 후에는 전체 입자의 농도가 낮게 나타났으나 황사 발생 전과 비교해 보았을 때 작은 입자의 농도는 상대적으로 낮게 나타나고 큰 입자의 농도는 상대적으로 높게 나타났다. 특히 큰 입자의 체적 농도가 높게 나타남으로서 조대입자에 해당하는 황사 입자가 크게 존재했을 것으로 예상된다.

풍향, 풍속별 에어로솔 농도는 지상에서 $270^\circ \sim 360^\circ$ 의 풍향에서 $1 \sim 7 \text{ m/s}$ 의 풍속의 바람이 고루 분포하였다. 특히 $270^\circ \sim 300^\circ$ 사이에 집중적으로 분포하였다. 수 농도는 $270^\circ \sim 300^\circ$ 사이에 집중적으로 분포하였으며, 표면적 농도는 $210^\circ \sim 240^\circ$ 사이에

$\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 이하의 표면적 농도가 집중적으로 분포하였다. 체적 농도는 $210^\circ \sim 240^\circ$ 사이에서 $0.3 \mu\text{m}^3/\text{cm}^3$ 이하, $260^\circ \sim 300^\circ$ 사이에서 $0.3 \mu\text{m}^3/\text{cm}^3$ 이상의 체적 농도가 집중적으로 분포하였다.

상관분석 결과, $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 의 작은 입자는 온도, 습도와는 양의 상관관계, 기압과는 음의 상관관계를 나타내었으며, $0.5 \mu\text{m}$ 이상의 입자는 PM_{10} 과 높은 양의 상관을 나타내었다. 대기 중금속 성분은 Ca, Fe, Al, Mg 등 토양 기원 성분이 전체의 99%로 나타났다. 2007년부터 2009년까지 이전 3년간의 자료와 비교해 보았을 때에도 월등히 높은 값을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 교육과학기술부의 재원으로 부터 국제과학기술협력재단의 지원(No. 200603874)을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- Korea Meteorological Administration (KMA), 2013, <http://web.kma.go.kr/communication/encyclopedia/list.jsp?schText=%C8%B2%BB%E7&x=-371&y=-377>.
- Chun, Y., Cho, K. S., Kim, Y. H., Lee, J. K., 2003, The features of Asian dust events originated in Keoeolchin sandy land, J. Kor. Meteor. Soc., 39(2), 251-263.
- Chung, K. Y., Park, S. U., 1995, Characteristic synoptic features associatd with the transport of Yellow sand to Korea, J. Kor. Meteor. Soc., 31(1), 45-63.
- Chung, Y. S., Kim, H. S., Park, K. H., Jugder, D., Tao, G., 2004, Dust-storm observations in China, Mongolia and Korea from March to May 2003, J. Kor. Meteor.

- Soc., 40(3), 241-257.
- Dorsey, J. R., Nemitz, E., Gallagher, M. W., Fowler, D., Williams, P. I., Bower, K. N., Beswick, K. M., 2002, Direct measurements and parameterisation of aerosol flux, concentration and emission velocity above a city, *Atmos. Environ.*, 36, 791-800.
- El-Metwally, M., Alfaro, S. C., 2013, Correlation between meteorological conditions and aerosol characteristics at an East-Mediterranean coastal site, *Atmos. Res.*, 132-133, 76-90.
- Kang, D. H., 2010, Dynamic analysis for the development and dissipation of yellow-sand in Korea, M.Sc. Dissertation, Pukyong National University, Busan, Korea.
- Kang, D. H., Kim, J., Kim, K. E., Lim, B. S., 2012, Aerosol size distribution and optical properties during severe Asian dust episodes measured over South Korea in spring of 2009-2010, *Atmos. Kor. Meteor. Soc.*, 22(3), 369-381.
- Kang, M. Y., 2003, On the aerosol concentration fluctuation using wind field by a Doppler radar in inland area, M.Sc. Dissertation, Pukyong National University, Busan, Korea.
- Kim, J., Choi, B. C., 2002, Aerosol size distribution and their regional characteristics over Korea, *J. Kor. Meteor. Soc.*, 38(2), 95-104.
- Kim, M. S., Lee, D. I., You, C. H., 2001, The physio-chemical characteristics of aerosol in urban area during snowfall, *J. Kor. Environ. Sci. Soc.*, 10(3), 201-208.
- Kim, Y. K., Song, S. K., Gang, J. E., 2004, Characteristics of concentration variations and synoptic conditions by the lasting time of Asian dust, *J. Kor. Soc. Atmos. Environ.*, 20(4), 465-481.
- Lee, D. I., 1989, Studies on the atmospheric aerosol particles in relation to the wind systems, Ph. D. Dissertation, Hokkaido university, Sapporo, Japan.
- Lee, D. I., Kang, M. Y., Seo, K. J., You, C. H., Park, S. H., Kim, P. K., Park, N. S., 2008, The fluctuation of aerosol number concentration by wind field variation during snowfall at the Southwestern coastal area, *J. Environ. Sci.*, 17(6), 699-709.
- Lee, Y. G., Cho, C. H., 2007, Characteristics of aerosol size distribution for a severe Asian dust event observed at Anmyeon, Korea in april 2006, *J. Kor. Meteor. Soc.*, 43(2), 87-96.
- Park, S. H., Lee, D. I., Seo, K. J., You, C. H., Jang, M., Kang, M. Y., Jang, S. M., Kim, D. C., Choi, C. S., Lee, B. G., 2009, The fluctuations of aerosol number concentration in the Ieodo ocean research station, *J. Environ. Sci.*, 18(7), 721-733.
- Park, S. H., Jang, S. M., Lee, D. I., Jung, W. S., Jeong, J. H., Jung, S. A., Jung, C. H., Kim, K., Kim, K. E., 2012, The variation of aerosol number concentrations in relation with 3D wind components in the Ieodo Ocean Research Station, *Atmos. Kor. Meteor. Soc.*, 22(1), 97-107.
- Park, S. H., Jang, S. M., Jung, W. S., Jeong, J. H., Lee, D. I., 2012, The fluctuation of marine aerosol number concentrations related with vertical winds, *J. Korean Earth Sci. Soc.*, 33(3), 259-268.
- Pasquill, F., 1961, The estimation of the dispersion of windborne material, *Meteorol. mag.*, 90, 33-49.
- Reist, P. C., 1995, *Aerosol science and technology*, 2nd ed., Donghwa Co., Busan, Korea, 1-465.
- Seo, K. J., 2010, Variation of atmospheric pollutants concentration by raindrop size distribution in Southwestern area, Korea, Ph. D. Dissertation, Pukyong National University, Busan, Korea.
- Seinfeld, J. H., Pandis, S. N., 1998, *Atmospheric chemistry and physics - From air pollution to climate change*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 1-1326.
- Shin, S. S., Yoon, S. C., Nam, J. C., 2004, Analysis of chemical components of aerosols for dust and non-dust cases during 1993-2002, *J. Kor. Meteor. Soc.*, 40(3), 345-359.
- Yu, X., Zhu, B., Yin, Y., Yang, J., Li, Y., Bu, X., 2011, A comparative analysis of aerosol properties in dust and haze-fog days in a Chinese urban region, *Atmos. Res.*, 99, 241-247.