2005년 동아시아 지역에서 발생한 모래폭풍과 먼지침전(황사)의 관측

김학성^{1,*} · 정용승²

¹한국교원대학교 지구과학교육과, 363-791, 충북 청원군 강내면 다락리 산 7

²(재)고려대기환경연구소, 363-891, 충북 청원군 강내면 궁현리 304

On the Observation of Sandstorms and Associated Episodes of Airborne Dustfalls in the East Asian Region in 2005

Hak-Sung Kim^{1,*} and Yong-Seung Chung²

¹Department of Earth Science Education, Korea National University of Education, Cheongwon, Choongbuk 363-791, Korea

²Korea Centre for Atmospheric Environment Research, 304 Koonghyon, Kangnae, Cheongwon, Choongbuk 363-891, Korea

Abstract: Occurrences of sandstorms in the deserts and loess of Mongolia and northern China and associated dustfall episodes in the Korean Peninsula were monitored during the period January through December, 2005. False colour images were made by directly receiving the NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) data, and the distribution and transport of sandstorms were analyzed. The ground concentrations for PM₁₀, PM_{2.5} and visibility of the dustfall episodes (PM₁₀ concentration over $190 \mu\text{g m}^{-3}$) were analyzed at Cheongwon, located midway in South Korea, and in the leeward direction of the place of origin of the sandstorms. Variations in the concentrations of O₃, NO₂, CO and SO₂ were also compared with dust concentrations in the dustfall episodes. Fewer occurrences of strong sandstorms in the place of origin were observed in 2005, due largely to the accumulation of snow and mild fluctuations of high and low pressure systems in the place of origin, thereby accounting for a low frequency of dustfall episodes in Korea, compared with those during the period 1997-2005. A total of 7 dustfall episodes were monitored in Korea in 2005 that lasted 11 days. In summer, sandstorms occurred less frequently in the source region in 2005 due to high humidity and milder winds, thereby causing no dustfall episodes in Korea. In case the sandstorms occurring at the place of source head directly to Korea without passing through large cities and industrial areas of China, the PM_{2.5} concentrations were measured at 20% or lower than the PM₁₀ concentrations. However, when the sandstorms headed to Korea via the industrial areas of eastern China, where they pick up anthropogenic air pollutants, the PM_{2.5} concentrations were at least 25% higher of the PM₁₀ concentrations. On the other hand, over 5 cases were observed and analyzed in 2005 where the PM₁₀ concentrations of sand dust originating from the deserts were measured at $190 \mu\text{g m}^{-3}$ or lower, falling short of the level of a dustfall episode.

Keywords: sandstorm, dustfall, NOAA satellite false colour image, PM₁₀, PM_{2.5}, air pollutants

요 약: 2005년 1월부터 12월까지 지속적으로 몽골과 중국 북부의 사막과 건조지대에서 모래폭풍의 발생, 이동 그리고 한국에서 먼지침전(황사)을 모니터링하였다. NOAA 위성인 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer) 관측 자료를 직접 수신하여 false colour 합성영상을 만들어 모래폭풍의 발생과 이동 사례를 중점 분석하였다. 또한 모래폭풍 발원지의 풍하측에 위치한 한국 중부의 청원에서 PM₁₀ 농도가 $190 \mu\text{g m}^{-3}$ 이상인 황사 사례에 대한 PM₁₀, PM_{2.5} 농도와 시정 그리고 O₃, NO₂, CO, SO₂ 농도의 변동을 분석하였다. 2005년에는 발원지에 적설과 강력한 고기압, 저기압의 이동이 미흡하여 강한 모래폭풍의 발생이 적었고 한국에서도 황사의 발생 빈도가 1997-2005년의 평균과 비교하여 적었다. 한국에는 2005년 총 7회, 11일간의 황사 사례가 발생하였다. 여름에는 발원지가 습하고 바람이 약해 모래폭풍

*Corresponding author: envir007@knue.ac.kr

Tel: 82-43-230-3777

Fax: 82-43-232-7176

의 발생이 적었으며, 한국에서도 황사의 발생이 없었다. 발원지에서 발생한 모래폭풍이 중국의 대도시와 산업지대를 거치지 않고 한국으로 직접 이동할 경우, 먼지침전에 따른 PM_{2.5} 농도는 PM₁₀ 농도의 20% 이하였다. 그러나 모래폭풍이 중국 동부의 산업지역을 거쳐 한국으로 이동할 경우 인위적 대기오염 물질이 함께 유입되어 PM_{2.5} 농도가 증가하여 PM₁₀ 농도의 25% 이상을 나타내었다. 또한 2005년에는 사막에서 날아온 모래 먼지의 PM₁₀ 농도가 $190 \mu\text{g m}^{-3}$ 이하여서 황사로는 미흡한 5개 이상 사례를 관측 및 분석하였다.

주요어: 모래폭풍, 먼지침전(황사), NOAA 위성 합성영상, PM₁₀, PM_{2.5}, 대기오염 물질

서론

북동아시아 지역은 전 세계적으로 주요한 에어로졸 발생지로서 황사, 해염입자, 그리고 인위적인 오염입자(이권호와 김영준, 2004; 이권호 외 2004)의 영향을 받고 있다. 특히, 중국 북서-북부 지역과 몽골의 사막과 황토지대의 지표는 8 ms^{-1} 이상의 바람에 의해 침식이 일어나 모래가 공기 중으로 불어 올려진다. 또한 15 ms^{-1} 이상의 강한 바람이 3시간 이상 지속될 때 강한 모래폭풍이 발생한다(Chung et al., 2003a). 동아시아 지역에서 중국과 몽골의 발원지에서는 모래폭풍이 1년에 60-120일 발생하고 있다(Chung et al., 2003a).

저기압의 수렴기류와 전선의 움직임에 의해 모래입자들은 1-6 km의 높이까지 올라간다. 지표면에서 강한 바람과 역학난류, 상승, 전선치울림은 모래폭풍으로 발생한 먼지구름을 발원지로부터 수천 km의 장거리를 이동시킨다. 중국 북서와 몽골의 발원지에서 한국으로의 대기 중 수송은 1-3일이 걸린다(Chung and Yoon, 1996). 먼지구름은 지표면에서 강한 바람이 발달하지 않는 풍하측인 한반도에서 강한 먼지침전(황사) 현상을 일으킨다.

모래폭풍과 황사는 2000-3000년 전부터 중국과 한국에서 발생하였던 자연현상이다(Chung, 1992; Chon, 1994). 최근에는 모래폭풍과 더불어 중국 동부지역의 급속한 경제성장과 산업화로 인해 배출된 대기오염물질이 한국과 일본뿐 아니라 북태평양을 가로질러 북미 서해안까지 이동하고 있음이 관측되고 있다(Chung, 1986). 과학자들은 동아시아의 모래폭풍과 대기오염이 대륙과 해양을 가로질러 장거리를 이동하는데 관심을 갖고 있다. 1998년과 2001년에는 아시아 대륙에서 발생한 먼지구름이 북미대륙까지 이동하는 것이 관측되었다(Mckendry et al., 2001). 따라서 2001년 3-5월에는 ACE-Asia(Asian Pacific Regional Aerosol Characterization Experiment) 캠페인을 통해 국제적인 협력관측을 했다(Huebert et al., 2003;

Jacob et al., 2003).

인공위성을 이용한 에어로졸 연구는 지상 관측 네트워크의 일을 대신할 정도로 광범위한 영역을 지속적으로 관측할 수 있는 장점이 있다. 미국 NOAA는 위성(NOAA/AVHRR)을 이용하여 전지구적 규모로 에어로졸 분포를 지속적으로 관측하고 있다. 본 연구에서는 2005년 1-12월 동아시아 지역에서 모래폭풍의 발생, 이동 그리고 한반도에서 황사를 모니터링하였는데, NOAA 위성에서 직접 수신한 자료를 처리하여 합성영상을 만들어 광역적인 모래폭풍의 발생과 이동 사례를 탐지했다. 또한, 한반도에서 황사에 따른 대기질 영향을 평가하기 위해 청원에서 PM₁₀, PM_{2.5} 먼지 농도와 시정의 변동을 관측 및 분석하였다. O₃, NO₂, CO, SO₂ 등의 관측 자료도 분석했다.

자료 및 분석 방법

NOAA 위성을 이용한 모래폭풍의 발생과 이동 관측

NOAA 위성 AVHRR 자료는 가시광선(채널 1), 근적외선(채널 2), 단파적외선(채널 3a), 중적외선(채널 3b), 그리고 두 개의 열적외선(채널 4, 5)의 6개 채널을 가지고 있다. AVHRR 자료의 가시광선, 근적외선, 열적외선의 3개 채널을 이용하여 false colour 합성영상을 만든다. 각 채널의 각 픽셀은 0-1,023 범위의 grey scale의 밝기 범위를 나타낸다. 채널 1(0.55-0.68 μm)은 빨간색으로 하고, 채널 2(0.73-1.1 μm)는 초록색으로 하고, 채널 4(10.5-11.5 μm)는 파란색을 할당하면 각 채널의 각 픽셀은 빨강, 초록, 파랑의 0-1,023 밝기 범위를 갖게 된다. 따라서 3개의 채널을 합성하게 되면 false colour 합성영상이 만들어지는데 $1,024 \times 1,024 \times 1,024 (>10^9)$ 컬러를 나타내게 된다. 이러한 합성영상은 광역적으로 분포하는 먼지구름과 대기오염의 관측에 이용되었다(김학성과 정용승, 2007; Chung and Le, 1984; Chung, 1986; Chung et al., 2003a, 2003b, 2003c; Chung and Kim, 2008; Kim and Chung, 2008). 황해 지역에서 먼지구름과 대기오

염에 대한 NOAA 위성 AVHRR 자료의 합성영상은 MODIS, GMS 위성 영상과 비교 검증이 되어 연구에 이용되고 있다(Chung et al., 2003d). 현재 NOAA 위성 15, 17, 18이 운영되고 있어 낮 동안에도 3회 이상 직접 AVHRR 자료를 수신하여 처리함으로써 모래 폭풍의 발생과 이동, 그리고 황사를 효율적으로 관측할 수 있다.

합성영상에서 해양과 호수는 낮은 반사율(albedo)을 보이기 때문에 일반적으로 대기오염이 없을 때 파란색으로 보인다. 또한 구름은 하얗게 보이며 땅은 초록색으로 보이게 된다. 모래폭풍은 중국과 몽골의 발원지에서는 입자의 크기가 크고 농도가 높아 짙은 회색으로 보인다. 또한 황해 위에서는 짙은 회색-노랑-적갈색으로 분석된다. 중국 북동 공업지역에서 인위적인 대기오염 물질이 발생하여 광역적으로 황해 위에 있을 때는 적갈색으로 보여진다.

일반적으로 대기 중 에어로졸은 크기에 따라 미세 입자와 조대 입자로 나눌 수 있다. 조대 입자는 토양 및 해염 등과 같이 직경 $2.5\mu\text{m}$ 이상으로 자연적인 발생원에서 주로 발생하며 물리적 과정에 의해 생성된다. 미세 입자는 화석연료 연소, 자동차의 배출 가스, 산업 공정에서 생성되는 황산염, 질산염 및 일부 유기화합물과 같이 직경 $2.5\mu\text{m}$ 보다 작은 입자들을 포함한다(이동하 외, 2006).

발원지에서 모래폭풍의 발생과 이동에 따른 대기 중 황사는 조대 입자로 NOAA 위성 AVHRR 자료의 가시광선과 근적외선에 대한 반사 민감도가 뛰어나다. 그리고 황사는 채널 4의 열적외선에 대해서 복사 흡수성이 크지만 대기 중 구름은 채널 4에 대한 복사 흡수성이 황사 보다 작다(Lino et al., 2004). 따라서 채널 1, 2, 4의 false colour 합성영상으로부터 대기 중 황사를 강조해 표현할 수 있으며 구름과 구별할 수 있다. 또한, 모래폭풍의 발생과 이동에 따라 대기 중 황사 농도가 높게 나타나지만 크기가 비슷한 해염입자들은 북동아시아 지역에서 광학적 두께에 대한 기여도가 낮아(이동하 외, 2006) false colour 합성영상에서 구별이 어렵다.

또한, 황산염, 질산염 및 유기 화합물이 대기 중 습기와 함께 성장한 미세 입자는 황사와 같이 가시광선과 근적외선에 대한 반사민감도가 커서 false colour 합성영상에서 구별할 수 있다. 그러나 황사와 혼합된 형태로 한반도에 유입하고 있을 때는 합성영상만으로 구별하기 어렵다. 따라서 지상에서 조대입

자와 미세입자의 농도 관측과 비율 산출은 NOAA 위성 합성영상만으로 구분하기 어려운 황사와 인위적 대기오염을 구분할 수 있게 하는 중요한 관측 방법이다.

모래폭풍과 황사는 지상일기도에 관측기록으로 보여지게 되며 종관기상규모의 대기 운동에 따라 이동된다. NOAA 위성 합성영상과 더불어 종관규모에서 모래폭풍과 황사를 분석하기 위해 지상일기도를 이용했다.

황사의 먼지 농도 관측

Fig. 1은 동아시아 지역과 한국을 나타낸 것이다. 한국의 중부에 위치한 충북 청원의 고려대기환경연구소(127.22°E , 36.34°N , 93 m)에서는 2002년부터 대기오염 모니터링을 실시하였다. 청원은 태안반도 서쪽 해안가에서 약 120 km 동쪽 풍하측에 있으며, 기류가 태안에서 청원까지 도착하는데 약 3-5시간이 소요된다. 청원의 풍상측 태안반도까지는 광역적 대기오염을 발생시킬만한 도시와 산업단지가 드물다.

고려대기환경연구소는 기상청의 위탁황사관측소로 지정되어 5분, 1시간 평균값을 기상청에 공급하고 있고, 관측 장비들은 1년마다 기상청의 감독하에 정도 검사를 실시하고 있다. PM10과 PM2.5 농도는 Rupprecht & Patashnic의 TEOM Series 1400a를 이용하여 관측해 왔다. 이 기기는 필터에 모아지는 먼지의 질량을 TEOM(Tapered Element Oscillating Microbalance) 방식으로 직접 측정한다. 또한 O_3 , NO_2 , CO , SO_2 농도와 시정을 관측하였다. O_3 , NO_2 , CO , SO_2 측정 장비는 Thermo Environmental Instrument사의 장비들을 이용하였다. 그리고 Belfort Instrument사의 Model 6000을 이용하여 시정을 관측하였다.

관측 및 분석 결과

PM10, PM2.5 농도의 관측 및 분석

Fig. 2는 2005년 1-12월 청원에서 관측한 PM10, PM2.5의 일 최대와 일 평균 농도 변동을 보여준다. 2005년 PM10, PM2.5농도의 평균은 각각 $47\pm 27\mu\text{g m}^{-3}$, $27\pm 16\mu\text{g m}^{-3}$ 이었다. 일 평균 농도 변동에서 8, 9월과 10월 중순에 비교적 낮으며, 11월에서 7월까지 는 높다. 또한 일 최대 농도 변동에서도 8-9월을 제외하면 높았다.

Fig. 1. Map of the East Asian region and the Korean Peninsula, which are represented with cities and provinces.

Fig. 2. Variations of daily maximum and mean concentrations of PM10 and PM2.5 observed at Chongwon from January to December 2005.

Table 1. The maximum and average concentrations of PM10 and PM2.5 and % mass ratio PM2.5/PM10 for dustfall episodes (DFE) observed at Cheongwon, Korea from January to December 2005

Case	Date	PM10	PM10a	PM2.5	PM2.5a	%-Ratio	VSBY
DFE1	29 March	481	143	32	18	6.7	10.2
DFE2	7-8 April	332	115	91	49	27.4	4.5
DFE3	10-11 April	305	98	34	14	11.1	10.5
DFE4	20-21 April	591	172	62	28	10.5	9.5
DFE5	29 April	203	112	75	56	37.0	10.2
DFE6	6-7 November	604	154	98	31	16.2	5.6
DFE7	26 November	225	105	123	62	54.7	1.6
Mean (7 episodes, 11days)		392	128	74	37	18.9	7.4

청원에서 일별 PM10, PM2.5 농도 변동은 동아시아 지역의 광역적 대기오염의 장거리 이동에 의해 영향을 받고 있다(Chung and Kim, 2008; Kim and Chung, 2008). 특히, 중국과 몽골에서 발생한 모래폭풍이 서풍기류에 의해 한국과 일본에 황사를 일으키고 있다. 따라서 Fig. 2에서처럼 모래폭풍에 의한 먼지구름이 한국에 황사를 발생시키면 PM10 농도가 급작스럽게 높아지는 모습을 볼 수 있다.

2005년에 NOAA 위성 합성영상으로부터 모래폭풍의 발생과 이동을 분석했다. 또한, 모래폭풍에 의한 먼지구름이 한반도에 유입했을 때 PM10 농도가 $190 \mu\text{g m}^{-3}$ 이상일 때 황사 사례로 분류하였다(Chung et al., 2003a). 2005년 청원에서 관측한 황사 사례는 Table 1과 같이 7회가 있었고 황사가 지속된 날은 11일이었다. 7 황사 사례 중 최대 PM10 농도 $500 \mu\text{g m}^{-3}$ 이상이 2개 사례(4월 20일, 11월 6일), $300 \mu\text{g m}^{-3}$ 이상이 3개 사례(3월 29일, 4월 7일, 4월 10일), $200 \mu\text{g m}^{-3}$ 이상이 2개 사례(4월 29일, 11월 26일) 발생하였다. 여름철에는 건조지대가 다소 습해지고 풀이 약간 있으며 바람도 약해 모래폭풍의 발생이 현저하게 줄어들며 한국에서도 황사가 발생하지 않았다.

그러나, 7 황사 사례에서 PM10 농도가 높게 증가하는 것과는 다르게 PM2.5 농도는 PM10 농도의 18.9 % 를 나타내고 있었다. 이와 대조적으로 비 황사시는 PM2.5와 PM10 농도의 차이가 비교적 작다(Fig. 2).

3월 29일 사례

Fig. 3a는 2005년 3월 28일 1447 LST의 NOAA 위성 합성영상이다. 모래폭풍은 3월 28일 오전 내몽

골 동부의 퉁라호와 츠핑(적봉) 사이의 사막(43°N , 120°E)에서 발생하였다. 한랭전선이 내몽골 동부의 사막을 통과하고 그 후면에 강한 바람이 불어 모래폭풍이 발생하였고 북풍 계열 바람에 밀려 남쪽의 한반도로 이동하였다(Fig. 3b). 한편, 상층의 700 hPa와 850 hPa에 역전층이 있어 안정한 북북서 기류에 휩쓸려 먼지구름이 이동하였다. 지상일기도에 의하면 28일 1800 LST에 만주 남쪽의 1개 관측소에서 황사가 관측되었으나, 29일 0300 LST에는 장천 남쪽의 랴오위안에서 황사가 보고되었고 북한과 백령도에도 황사가 기록되었다.

Fig. 4a는 2005년 3월 29일 0900 LST 지상일기도이다. 내몽골에 위치한 1,029 hPa의 강한 고기압에 의해 한반도에는 강한 북북서풍이 불었다. 먼지구름은 29일 1200 LST에는 북한 평북의 구성, 1500 LST에는 서울과 수원을 통과하였고, 1800 LST에 전북과 전남지역을 지나갔다. 황사의 도착과 함께 청원에서는 상대습도가 72%에서 33%로 급하게 건조해졌다.

Fig. 4b는 2005년 3월 28-30일 청원에서 관측한 시간별 PM10, PM2.5 농도와 시정의 변동을 나타낸다. 먼지 농도와 시정은 반비례로 변동하고 있으며, 황사에 따른 먼지 농도가 최대일 때 시정은 최저 10.2 km였다. 일 최대 PM10, PM2.5 농도는 3월 29일 1000 LST에 발생하였다. PM2.5 농도는 매우 낮아 PM10의 6.7% 미만이었다. 황사가 5시간 동안 지속되는 동안 PM10 농도가 $240\text{--}481 \mu\text{g m}^{-3}$ 이상일 때 PM2.5 농도는 불과 $21\text{--}32 \mu\text{g m}^{-3}$ 으로서 평균 비율은 7.5%이었다. 이는 황사 발생시 PM2.5 농도가 매우 적음을 나타낸다. 그러므로 황사 사례의 먼지 입자의 주요 구성은 PM3.0 이상으로 주로 PM10 이상의 입자들이 포함됨을 나타낸다.

Fig. 3. (a) A NOAA satellite image showing a large-scale sandstorm occurrence over the eastern area of the Inner Mongolia and (b) a surface meteorological chart at 0900 LST (00 UTC) 28 March 2005.

4월 7-8일 사례

Fig. 5는 2005년 4월 5-7일 NOAA위성 합성영상과 지상일기도이다. 4월 5일 몽골의 동부에는 저기압

의 한랭전선이 통과하면서 강한 바람에 의해 모래폭풍이 발생하였다. 이 먼지구름이 동남동진하여 4월 6일 1443 LST에 내몽골 위로 이동하고 있다. 4월 7

Fig. 4. (a) A surface meteorological chart and (b) variations of hourly PM10, PM2.5 and visibility observed at Cheongwon for 28-30 March 2005.

일 0734 LST에는 한반도 북동쪽에 있는 저기압 중심으로부터 남서쪽으로 뻗어 있는 한랭전선 후면을 따라 먼지구름이 이동하고 있었다. 4월 8일 1148 LST에는 한랭전선이 동해로 이동함에 따라 먼지구름이 동해의 북동쪽에서 한반도 북쪽으로 확산되어 있지만 위성 영상에서는 구별이 어렵다. 내몽골 동쪽에서는 고기압의 장출과 함께 새로운 모래폭풍이 발생하였다. 그리고 한랭전선 전면에는 황해-한반도-동해에 걸쳐 중국 산둥반도 주변에서부터 인위적 대기오염이 광역적으로 분포하고 있다.

Fig. 6은 2005년 4월 7-8일 청원에서 관측한 시간별 PM10, PM2.5, 시정, O_3 , NO_2 , CO, SO_2 농도의 변동을 나타낸다. 4월 7일 황사가 발생하기 전 2000 LST 까지 PM10, PM2.5, O_3 , CO, SO_2 농도는 증가하고 시정은 감소하고 있었다. O_3 은 NO_2 와 반비례를 보이며 7일 새벽에도 20 ppb 이상 농도를 나타내고 있었다. 특히, PM2.5 농도는 7일 오후 80-91 $\mu\text{g m}^{-3}$ 까지 증가하였는데 중국으로부터 인위적 대기오염이 광역적으로 영향을 미치고 있었다. 그러나 4월 7일 2100 LST 이후 북서기류에 의한 황사가 발생

Fig. 5. NOAA satellite images showing sandstorms, large-scale transport of air pollution (LSTAP) and surface meteorological charts over East Asia for 5-7 April 2005.

했다. 황사에 의해 PM10 농도가 높아지며, PM2.5는 감소되기 시작했다. 2200 LST 에는 PM10 농도가 $332 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 급격하게 증가하였지만 이때 PM2.5 농도는 감소하여 PM10의 약 16%를 나타내었다. PM2.5 감소와 더불어 시정이 좋아졌는데, 이 기간 시정과 PM2.5의 상관($R=-0.7$)이 PM10의 상관($R=-$

0.5) 보다 높았다. 또한 복서기류에 의해 O_3 , CO , SO_2 농도가 감소되었다.

4월 20-21일 사례

Fig. 7은 2005년 4월 16일 1800 LST와 20일 1500 LST의 지상일기도이다. 4월 16일 몽골과 중국 북부

Fig. 6. Variations of hourly PM10, PM2.5, visibility, O₃, NO₂, CO, and SO₂ observed at Cheongwon for 7-8 April 2005.

내몽골의 고비사막에 강한 고기압이 장출하고 저기압의 후면에 놓이면서 광역적인 모래폭풍이 발생하였다. 모래폭풍은 4월 17-18일에도 계속 발생하였고, 19일에는 내몽골 후호하트에 이동하였다. 4월 20일에는 한반도 북쪽으로 저기압이 이동하여 위치하고 있어 한반도는 북북동-남남서 방향으로 놓여 있는 한랭전선의 후면에 놓이게 되었다. 따라서 한반도에 광역적으로 황사가 관측되었고 21일까지 지속되었다.

Fig. 8은 2005년 4월 20-22일 청원에서 관측한 시간별 PM10, PM2.5 농도와 시정의 변동을 보여준다. 황사는 20일과 21일에 있었다. PM10은 4월 20일에 591 $\mu\text{g m}^{-3}$ 과 4월 21일에는 210 $\mu\text{g m}^{-3}$ 을 기록하였

다. 4월 20일의 PM10과 PM2.5의 최대 농도 구성 비율은 10.5%이었으며, 21일의 구성비 역시 10.5%를 나타낸다. 또한 황사의 PM10, PM2.5 먼지 농도와 시정이 반비례하여 변동하고 있었다.

11월 6-7일 사례

Fig. 9는 2005년 11월 5-6일 NOAA 위성 합성영상으로 고비사막에서 모래폭풍의 발생과 한반도로 이동하고 있는 먼지 구름을 보여준다. 11월 5일 0900 LST 몽골의 남부 고비 사막에서 고기압의 장출과 한랭전선 후면에서 강한 북서풍과 함께 모래폭풍이 발생했다. 먼지 구름은 지상 1,500-3,000 m 상공의 25-

Fig. 7. Surface meteorological charts for 16 April and 20 April 2005.

Fig. 8. Variations of hourly PM10, PM2.5 and visibility observed at Cheongwon for 20-22 April 2005.

Fig. 9. NOAA satellite images showing sandstorm occurrence in the Gobi Desert and associated dust cloud over the Yellow Sea region for 5-6 November 2005 (Kim and Chung, 2008).

30 ms^{-1} 의 바람에 따라 몽골 고비사막에서 5일 1500 LST에 몽골의 동부와 내몽골의 서부에 도달했다. 또한 6일 0900 LST에 보하이 만을 지나 황해와 북한에 도착하여 발원지로부터 하루 만에 한반도로 이동했다.

Fig. 10은 2005년 11월 6-7일 청원에서 관측한 시간별 PM10, PM2.5 먼지 농도와 시정의 변동을 보여준다. 두 개의 최대값(bi-modal)이 있으며, 첫 번째는 PM10 농도는 $604 \mu\text{g m}^{-3}$, 두 번째는 6시간 뒤에 $485 \mu\text{g m}^{-3}$ 이었다. PM10 최대 값과 PM2.5 최대 값의 비는 16.2%로 PM2.5가 매우 적었다. 황사의 PM10, PM2.5 농도와 시정이 반비례하여 변동하고 있었다. 황사의 PM10 농도는 $190 \mu\text{g m}^{-3}$ 이상으로 12시간 지속되었다. 황사가 지속되는 동안 O_3 , NO_2 , SO_2 농도가 매우 낮은 배경값을 유지했다.

11월 26일 사례

Fig. 11은 2005년 11월 25일 1321 LST NOAA 위성 합성영상과 1200 LST의 지상일기도이다. 중국 중부에 자리 잡고 있는 고기압이 황해와 한반도에까지 영향을 주고 있어 중국 동부의 산업적 대기오염 물질이 황해 위에 정체적이고 광역적으로 분포하고 있었다. 또한 몽골의 고비 사막은 중국 중부의 고기압 가장 자리에 놓여 있었으며 모래폭풍이 발생하여 고기압의 가장 자리를 따라 남동쪽으로 이동하고 있었다. 11월 26일 한반도에서는 중국으로부터 산업적인 대기오염과 더불어 황사가 발생하였다.

Fig. 12는 2005년 11월 25-26일 청원에서 관측한 시간별 PM10, PM2.5 먼지 농도와 시정의 변동을 보여준다. 11월 25일 중국으로부터 광역적인 대기오염의 영향으로 PM10, PM2.5 농도가 점진적으로 증가

Fig. 10. Variations of hourly PM10, PM2.5 and visibility measured at Cheongwon for 6-7 November 2005.

Fig. 11. A satellite image showing a large-scale transport air pollutants (LSTAP) over the Yellow Sea and a meteorological chart in 25 November 2005.

하고 있었다. 또한 26일 황사의 발생에 따라 먼지 농도가 급격하게 증가하였으며 시정은 감소했다. PM10 최고 농도와 PM2.5 농도의 구성비는 55.0%로 이 사례는 PM2.5가 많이 포함되어 있다. 인위적인 대기오염 물질과 황사가 혼합되어 PM10과 PM2.5 농도의 비율이 다른 사례보다 매우 높게 나타났다.

논 의

몽골과 중국 서부, 북부의 사막과 건조지역에서 모래폭풍은 기상 조건이 형성되면 1년 중 어느 계절이나 발생할 수 있다. 가장 모래폭풍이 잘 발생하는 계절은 겨울이 지나며 해빙기 후 상층바람과 연계되어

Fig. 12. Variations of PM10, PM2.5 and visibility measured at Cheongwon for 25-26 November 2005.

Table 2. The maximum concentrations of PM10 and PM2.5 and % mass ratio PM2.5/PM10 for not considered as dustfall episodes (DFE) observed at Cheongwon, Korea from January to December 2005

Date	PM10 ($\mu\text{g m}^{-3}$)	PM2.5 ($\mu\text{g m}^{-3}$)	%-Ratio	VSBY (km)
12 April	160	30	18.8	11.9
15 April	176	39	22.2	13.0
22 April	144	20	13.9	16.0
1 December	130	59	45.4	9.5

지상에 강한 바람이 불 때인 3, 4, 5일이다. 모래폭풍의 발생은 지면 건조 상태와 겨울의 적설량에 따라 크게 좌우되며, 강한 대륙성 고기압의 이동과 저기압 후면의 강한 수렴기류에도 크게 영향을 받는다. 모래폭풍이 발생하는 사막과 건조지대가 다소 습해지고 풀이 약간 있을 수 있는 여름철에는 바람도 약해 모래폭풍 발생이 현저히 줄어든다. 다음은 모래폭풍이 여름에 발생지에 발생하였으나 남동풍이 불거나 서풍이 약해 황해와 한반도에 이동하여 영향을 주지 않은 사례이다: 6월 11일(몽골 남부), 6월 12일(내몽골), 6월 18일(고비 사막), 6월 21일(고비 사막), 6월 22일(고비 사막), 7월 17일(고비 사막 남쪽).

일반적으로, 사막에서 날아 온 먼지 입자가 1년 중 100일 이상 떠 있을 수 있다. 발원지에서 멀리 떨어진 풍하측에서 황사 입자의 관측은 $30 \mu\text{g m}^{-3}$ 이상이면 가능하다. 본 연구에서는 PM10 값이 $190 \mu\text{g m}^{-3}$ 이상 발생할 때 황사 사례로 취급하였다(Chung et al., 2003a). 1997-2005년까지 청원에서 PM10 농도 관측 분석은 황사가 일년 평균 8회 15일 영향을 주고 있었다. 2005년의 황사 7회 11일은 평균보다 다소 적게 발생하였다. 2005년에는 발원지가 다른 해와 달리 늦은 봄까지 눈으로 쌓여 있었고 강한 고기압과 저기압의 발생이 미흡하여 모래폭풍의 발생이 적

었다. 따라서 풍하측인 한국에서도 황사의 발생이 적었다. 또한 황사의 발생에 따른 PM10 농도는 급격하게 증가하지만 PM2.5 농도는 상대적으로 낮은 구성비를 보이고 있었다. 그러나 11월 26일 사례에서는 황사와 더불어 중국 동부로부터 산업적 대기오염의 광역적 이동에 따른 PM2.5 농도의 증가에 따라 PM2.5/PM10 구성비가 다른 황사 사례와는 대조적 특징을 보이고 있었다.

PM10 농도 $190 \mu\text{g m}^{-3}$ 이하일 때도 사막과 건조지대에서 온 먼지와 모래가 공기 중에 부유한 사례가 2005년에도 많이 있었다(Table 2). 4월에 먼지 침전으로 PM10 농도가 높고 PM2.5 농도가 비교적 낮은 3개 사례는 황사로 분류는 미흡했다. 또한 12월 1일의 사례는 PM2.5 농도와 PM10의 비율이 45.4%였다. 기류와 기상 조건에 의해 사막에서 온 모래와 인위적인 먼지, 황산염, 질산염 등이 섞여 있는 것으로 분석된다.

결론

2005년에 관측된 대기오염 농도와 기상요소 값의 분석에 의하면, 한국 중부의 청원에서 관측한 황사는 7회 11일 이었다. 2005년 봄에는 발생지의 적설과 강력

한 고기압과 저기압의 이동이 미흡하여, 매우 강한 모래폭풍의 발생과 황사가 예년에 비해 적었다. 2005년의 황사는 PM10 농도가 $500 \mu\text{g m}^{-3}$ 이상이 4월 20일과 11월 6일에 발생된 2개 사례이다. PM10 농도가 $300 \mu\text{g m}^{-3}$ 이상은 3월 29일, 4월 7일, 4월 10일의 3개 사례이다. PM10 농도가 $190 \mu\text{g m}^{-3}$ 이상은 4월 29일과 11월 26일의 2개 사례가 발생하였다. 여름철에는 발원지가 습하고 바람이 약하여 모래폭풍의 발생이 줄어들며 한국에서는 황사가 발생하지 않았다.

발원지에서 모래폭풍이 발생하여 중국의 대도시와 산업지대를 거치지 않고 한반도에 직접 상륙할 경우 PM2.5 농도가 비교적 낮으며, PM2.5/PM10 비율은 평균 20% 이하였다. 그러나 중국 동부의 광역적 대기오염 배출이 황사와 함께 영향을 줄 때는 PM2.5/PM10비율은 25% 이상이었다. 사막에서 온 모래 먼지가 황사 기준치에는 미흡한 5개 이상의 여러 사례도 관측 및 분석되었다. 황사 오염의 중요성에 비추어 황사에 관한 연구는 지속적으로 끊임없이 수행되어야 한다.

사 사

이 연구는 2007년도 한국학술진흥재단(KRF-2007-331-C00254)의 지원을 받아 연구되었다.

참고문헌

- 김학성, 정용승, 2007, 동아시아 지역에서 광역적 대기오염의 이동: 위성과 지상 관측. 한국지구과학회지, 28, 123-135.
- 이권호, 김영준, 2004, 인공위성 자료와 AERONET 관측자료를 이용한 러시아산불 시 발생한 에어로졸의 중장거리 모니터링. 한국대기환경학회지, 20, 437-450.
- 이권호, 홍천상, 김영준, 2004, MODIS와 TOMS 자료를 이용한 2001년 동북아시아 지역의 대기 에어로졸 모니터링. 대한원격탐사학회지, 20, 77-89.
- 이동하, 이권호, 김영준, 2006, 에어로졸 종류 구분을 위한 MODIS 에어로졸 자료의 적용. 대한원격탐사학회지, 22, 495-505.
- Chon, J., 1994, Historical records of yellow sand observations in China. Research of Environmental Science, 7, 1-11. (in Chinese)
- Chung, Y.S. and Le, H.V., 1984, Detection of forest-fire smoke plumes by satellite image. Atmospheric Environment, 18, 2143-2151.
- Chung, Y.S., 1986, Air pollution detection by satellite: The transport and deposition of air pollutants over oceans. Atmospheric Environment, 20, 617-630.
- Chung, Y.S., 1992, On the observations of yellow sand in Korea. Atmospheric Environment, 26A, 2743-2749.
- Chung, Y.S., Kim, H.S., Jugder, D., Natsagdorj, L., and Chen, S.J., 2003a, On sand and duststorms and associated significant dustfall observed in Chongju-Chongwon, Korea during 1997-2000. Water, Air and Soil Pollution: Focus, 3, 5-19.
- Chung, Y.S., Kim, H.S., Park, K.H., Jhun, J.G., and Chen, S.J., 2003b, Atmospheric loadings, concentrations and visibility associated with sandstorms: Satellite and meteorological analysis. Water, Air Soil Pollution: Focus, 3, 21-40.
- Chung, Y.S., Kim, H.S., Dulam, J., and Harris, J., 2003c, On heavy dustfall observed with explosive sandstorms in Chongwon-Chongju, Korea in 2002. Atmospheric Environment, 37, 3425-3433.
- Chung, Y.S., Kim, H.S., and Kim, Y.S., 2003d, On large-scale air pollution in the Yellow Sea region: Satellite and ground measurements. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 19, 83-88.
- Chung, Y.S. and Kim, H.S., 2008, Observations of massive-air pollution transport and associated air quality in the Yellow Sea region. Air Quality, Atmosphere and Health, 1, 69-70.
- Chung, Y.S. and Yoon, M.B., 1996, On the occurrence of yellow sand and atmospheric loadings. Atmospheric Environment, 30, 2387-2397.
- Huebert, B., Bates, T., Russell, P., Seinfeld, J., Wang, M., Uematsu, M., and Kim, Y.J., 2003, An overview of ACE-Asia: Strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts. Journal of Geophysical Research, 108, 8633, doi:10.1029/2003JD003550.
- Iino, N., Kinoshita, K., Tupper, A.C., and Yano, T., 2004, Detection of Asian dust aerosols using meteorological satellite data and suspended particulate matter concentrations. Atmospheric Environment, 38, 6999-7008.
- Jacob, D.J., Crawford, J.H., Kleb, M.M., Connors, V.S., Bendura, R.J., Raper, J.L., Sachse, G.W., Gille, J.C., Emmons, L., and Heald, C.L., 2003, The Transport and Chemical Evolution over the Pacific (TRACE-P) aircraft mission: Design, execution, and first results. Journal of Geophysical Research, 108, 9000, doi:10.1029/2002JD003276.
- Kim, H.S. and Chung, Y.S., 2008, Satellite and ground observations for large-scale air pollution transport in the Yellow Sea Region. Journal of Atmospheric Chemistry, doi: 10.1007/s10874-008-0111-4.
- Mckendry, I.G., Hacker, J.P., and Stull, R., 2001, Long-range transport of Asian dust to the Hawaiian Islands. Science, 220, 198-197.

2008년 11월 6일 접수

2009년 2월 25일 수정원고 접수

2009년 3월 26일 채택