

## 황사의 국내 연구동향과 최근 에피소드 분석

# The Research Trend of Asian Dust Storm (AD) of Korea and Recent Episode Analysis

박진수 · 한진석\* · 안준영

국립환경과학원 기후대기연구부

(2013년 9월 30일 접수, 2013년 10월 8일 수정, 2013년 10월 8일 채택)

Jin Soo Park, Jin Seok Han\* and Joon Young Ahn

*Department of Climate and Air Quality Research, National Institute of Environmental Research*

(Received 30 September 2013, revised 8 October 2013, accepted 8 October 2013)

### Abstract

This paper aims to give a summary and review of the research trend about subjects of Asian Dust (AD) storm in the last three decades. The AD research was focused on classification of synoptic scale data and finding inflow pathway in early stage. Recently, new approaches have been made to explain chemical composition, transportation, transboundary movement reaction of AD, using satellite data, 3D modeling, the aerosol time of flight mass spectroscopy, etc. During AD events, a large amount of dust particles flow into Korea and Japan from AD source areas, and they are highly likely to be mixed with toxic substances when air mass contained AD particles pass over seriously polluted areas. We concluded that, considering that AD events were classified into two cases according to the source area and pathway, the concentrations of crustal components did not increase at the initial stage of AD events, Whereas ammonium-sulfate, trace metal element, OC, EC relatively increased in the early stage. This explains AD events have the possibility of being accompanied with polluted air mass or particles. Also, we further need to compare and summarize the results of AD studies which already have been conducted, and prepare strategies for particle management, particularly for Black Carbon (BC) and Brown Carbon (BrC) which are considered to induce climate change effects.

**Key words** : Asian dust, Trace element, LTP (Long range Transport Pollutants), Episode, BC

## 1. 서 론

중국과 몽골 사막, 황토고원에서 발생하는 황사는

바람을 타고 장거리 이동하면서 강하하여 많은 영향을 주고 있으며, 중국은 물론 한반도, 일본이 직접적인 영향권이며 심지어 북미대륙까지 이동하는 것이 밝혀져 범지구적 문제로 부각되고 있다. 황사 자체는 자연 현상으로 알려져 있으나 국내 환경에 미치는 영향이 적지 않고 황사 이동을 통하여 대기오염물질 이동을 추정할 수 있기 때문에 더욱 관심의 대상이

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-560-7250, E-mail : nierhan@korea.kr

되고 있다(Han, 2003).

세계적으로 흙먼지 발생이 가장 많은 지역은 사하라 사막이 위치한 북아프리카이며, 전 세계 먼지의 50~70%가 이 지역에서 발생한다(Ginoux *et al.*, 2004). 동아시아의 먼지 발생량은 전 세계 발생량의 약 20%이나 편서풍의 영향으로 중국 동부와 우리나라 등 인구밀집 지역으로 향한다(Ghim, 2011).

중국이나 몽골에서 발생한 황사가 편서풍을 따라 이동해 오면서 국내 대기질 및 시정에 영향을 주고 있다는 사실은 잘 알려져 있다. 최근에는 황사뿐만 아니라 다양한 원인에 기인한 고농도 미세먼지 사례가 빈번히 발생하여 대기질을 악화시키고 있다. 그러나 황사와 고농도 미세먼지 사례 시 대기 중 입자상 물질은 물리·화학적으로 전혀 다른 특성을 나타낸다(NIER, 2011; Lee and Kang, 2001). 일반적으로 황사 시에는 조대입자의 농도는 증가하지만 미세입자는 조대입자에 비해 크게 증가하지 않는다(Choi *et al.*, 2003). Sun *et al.* (2001)이 분석한 황사 이동경로에 따르면 고비에서 발생한 황사가 각각 북한, 남한, 대만을 지나는 것이 각각 7, 60, 33%이었다. 이들 결과에 의하면 남한은 세계 주요 인구밀집 지역 중 중국을 제외하고 영향이 가장 큰 나라일 수 있다(Ghim, 2011).

1980년대는 황사가 가장 중요한 대기오염연구 주제였으나(Lee *et al.*, 1988, 1986), 1990년대 이후 다양한 대기환경문제들이 부각되면서 황사에 대한 관심이 줄어들었다(Ghim, 2011). 2002년 3월 말과 4월 초 초대형 황사가 유입되면서 황사에 대한 관심이 다시 증가하였고, 황사기간 오염물질 농도 변화와 황사 입자가 다른 오염물질 변화에 미치는 영향 등이 주요 관심사가 되었다(NIER, 2009, 2008, 2007).

황사 연구동향에 대한 총설은 대기환경학회 20주년 기념으로 발간된 대기환경학회 20년사의 Han (2003)의 기고가 있으며, 2001년 봄 ACE-Asia 모니터링 캠페인 결과를 중심으로 한 Arimoto *et al.* (2006)의 총설과 2011년 대기환경학회지 Ghim (2011)의 총설이 있다. 이번 총설에서는 지난 30여년간 국내 학술지인 대기환경학회지, 기상학회지, 환경영향평가학회지 등에 발표된 황사에 대한 연구를 중심으로 황사의 발생과 이동특성, 황사 발원지 토양의 물리, 화학적 특성, 광학적 특성 및 위성관측자료를 이용한 황사관측, 황사이동과정에서의 오염물질의 혼입과 입자의 변환, 황사에측모델의 개발에 대한 연구동향 소개와 최근

황사 사례연구, 국내황사 대응방안과 대책에 대하여 기술하고자 하였다.

## 2. 황사의 국내 관측기록과 연구변천

황사현상은 그 기원이 지질시대로 거슬러 올라가는 매우 오래된 현상이다. 역사시대 이전에도 황사현상이 있었다는 것을 퇴스시대의 분포를 통해 알 수 있다. 퇴스는 바람에 의해 침적한 모래와 진흙이 섞인 점토를 말한다(Han, 2003). 기록에 나타난 우리나라 황사 최초의 기록은 삼국사기에 나오는 신라 아달라왕 때(서기 174년)의 ‘우토(雨土)’이다. 고구려 보장왕 때(서기 644년) 음력 10월에 내린 눈이 붉은 색이었다는 기록이 있는데, 이것은 눈에 황토가 섞였기 때문으로 여겨진다. 조선왕조실록에도 황사현상에 대한 기록이 자주 나온다. 태종 11년에는 14일 동안이나 흙비가 내렸다는 기록이 있고, 숙종 7년 4월 7일에는 강원도와 평안도에 흙비가 내려 옷에 혼탁한 황톳물 자국이 남았다는 기록도 있다. 우리나라 황사에 대한 체계적인 측정과 기록은 일제 강점기인 1915년부터 시작되었다는 것이 일반적인 정설이다. 1915년부터 2002년까지의 기록은 기상청에 있으며 1999년까지의 황사 일자 기록은 Chun (2000)에 나와 있다. 1922년부터 1955년까지의 결과를 포함하여 1915년부터 2002년까지의 연평균 황사 일자는 6.0일이 된다. 평균 일자가 증가한 이유는 1930년대 이후 약 10년간 황사 일자가 급격히 증가한 데 있다. 1940년에는 황사 일자가 40일을 초과하였으며 1930년대의 평균은 16.5일이 된다. 황사가 자주 서울에 도달한 것은 1930년대부터 1940년대까지 중국 북동부와 북부, 특히 북서부의 온도가 예년보다 최고 2°C 정도 올라간 것이 원인일 것으로 추정되고 있다(Chun *et al.*, 2000).

대기환경학회지를 통한 황사연구는 『黃砂現象이 우리나라에 미치는 影響(Lee *et al.*, 1986)』이 처음이다. 80년대에는 『황사 현상시 분진의 입도분포와 화학조성에 관한 연구(Lee *et al.*, 1988)』, 『황사 현상시 강수의 화학적 성분에 관한 연구(Lee *et al.*, 1989)』 등이 대표적이다. 90년대에는 20년간 춘천지방에서 황사 통계자료와 국제 기상 전문지에 보고된 자료를 이용한 황사 발원지 연구(Yoon *et al.*, 1990)를 시작

으로, 큰 산맥군의 풍하측에서 발생한 저기압에 동반된 한랭전선 후면에 강풍이 불 때 몽고와 중국 북부의 사막 및 황토지대에서 황사가 발생하여 2~4일 후 한국에 나타난다는 연구 (Chung and Kim, 1991), 엔트로피 궤적을 통해 고비사막에서 시작한 황사 입자가 한반도로 유입되는 것을 보인 연구 (Yoon and Park, 1991), 황사시 TSP 농도는 평상시 보다 2~4배 높으며, 토양 유래성분인 Ca, Fe, Mn, K 등이 1.9~2.1배 높게 나타난다는 사례연구 (Lee *et al.*, 1993) 등이 있다. Chung (1991)은 한반도 황사시 만주지방에 중심을 둔 500 hPa면에서 한랭 기압골이 나타나며, 우리나라에서는 편서풍이 현저하다는 것을 지적하였다 (Kim *et al.*, 2001). Lee (1993)는 1993년 황사의 사례 연구에서 발원지를 주로 고비사막과 황토고원으로 추정하였으며, 이 발원지에서 지속적인 하층 수렴이 나타나 황사 입자들이 상승하기 좋은 조건임을 언급하였다. Chung (1996)은 1988년 황사 사례를 바탕으로 오일러리안 모델링을 구축하여 황사의 부유 및 수송량을 양적으로 추정하였으며, Chun (1997)은 1993년의 황사 사례를 바탕으로 라그랑지안 모델링을 도입하여 발원지의 황사 배출 조건을 조사하였다 (Chun, 1997).

2000년대에는 『황사 개별 입자의 물리, 화학적 특성에 관한 연구 (Ma *et al.*, 2001)』, 『1993~1996년 봄철 고산 측정 자료를 바탕으로 한 황사/비황사의 입자 조성 변화 연구 (Park *et al.*, 2001b)』, 『황사가 서울시 대기 중 PAHs 농도에 미치는 영향 (Park *et al.*, 2001a)』, 그리고 2000년대 초반에는 『황사와 비황사 기간의 중금속 농도분포 특성: 2001년 황사기간에 대한 비교 연구 (Choi *et al.*, 2003)』, 『2009년도 서울 지역 황사 및 고농도 미세먼지 사례시 미세먼지의 화학성분 특성 (Park *et al.*, 2012)』 등 황사에 관한 연구가 진행되었으나, 최근에는 황사발생빈도의 감소와 미세먼지 (PM<sub>2.5</sub>)에 대한 관심 증가로 황사관련 연구 논문수는 급격히 감소하고 있으나, 논문 내용에서는 비교 대상으로써 꾸준히 언급되고 있다.

### 3. 황사의 발생과 물리·화학적 특성

#### 3.1 발생량과 이동특성 연구

황사현상을 이해하는 데 있어서 발생조건의 규명

은 매우 중요하다. 먼지의 상승과 이동에 관한 연구는 주로 사하라사막의 먼지보라를 대상으로 하는 연구에서 시작되었다. Gillette (1980, 1979)는 토양에 따른 입자부유 입계마찰속도를 산정하였으며, Westphal *et al.* (1988, 1987)는 토양의 침식에 따른 먼지 부유량을 마찰속도로써 추정하는 방법을 제안하였다.

동아시아지역 황사의 발생량에 대한 연구로는 Lee *et al.* (2003) 등이 황사발원지에서 먼지발생시 기상조건에 따른 황사발생 조건을 검토하여 풍속과 시정, 상대습도와 온도 등의 기상변수 중 습도가 중요한 요인인 것으로 보고하였다 (Lee *et al.*, 2003). 이후 발원지 황사 발생량 연구는 Koo *et al.* (2005) 등에 의해 추진되었으며, “황사감시 및 예측기술개발” 연구과제 일환으로 중국내 고비사막 등에 설치·운영한 황사 기상감시탑 자료를 이용하여 발생량을 산정하기도 하였다.

수치모델에서 황사발생원 발생량 산정에 가장 중요한 요소의 하나인 입계풍속은 6.5 m/s를 사용하였으나 (Kurosaki and Mikami, 2004; Uno *et al.*, 2003; Tegen and Fung, 1996), 최근에는 입계풍속 7.5 m/s를 주로 사용하고 있다. 기존의 황사 발생량 예측이 봄철 사례에 집중되었으나 (Park and In, 2003; Uno *et al.*, 2001), 겨울철 황사배출량 산정을 위하여 Kang *et al.* (2012)은 “Shao (2004), Lu and Shao (1999), Marticorena and Bergaetti (1995)”가 제안한 방법을 사용하기도 하였다. 3가지 배출량 산정방법 모두 과대평가하는 것으로 나타났는데 이는 모델에서 바람장을 과대평가한 것과 황사발원지의 지역 적설 분포값과 ‘언 지표의 분포’와 같은 지표면 정보의 부정확성에 기인하는 것으로 보인다 (Kang *et al.*, 2012).

초기 이동현상에 대한 연구는 사례위주로 기압골 형태나 기상조건을 분석하는 데 주안점을 두고 있어 황사이동을 설명하는데 필요한 평균 중관장을 제공하지 못하는 제한점을 보였다 (Chung and Kim, 1991; Yoon and Park, 1991). 이런 제한점을 해결하고자 Chung and Park (1995)은 1983~1988년까지 황사현상이 일어난 기간에 대하여 ECMWF자료로 합성도를 작성하고, 등엔트로피 분석을 통해 이동의 평균궤적을 살펴 본 후 이동성 고기압에 포함된 황사가 한반도로 유입되는 과정을 설명하였다.

또한 Kim *et al.* (2004)은 한반도 상공에서 관측된 황사의 장거리 수송과 관련한 중관기상의 패턴특성

을 군집분석을 통해 4개의 Case로 수송유형을 구분하였다. Case I은 중국발원지에서 수송된 황사의 이동 경로가 한반도 중심을 통과하며 가장 빈번하게 나타나는 경우, Case II는 주로 한반도 북쪽을 통과한 후 북태평양을 가로질러 북미까지 수송되는 경우, Case III은 한반도 북쪽에 위치한 만주지방에서 빠르게 수송되어 오는 경우, Case IV는 한반도 주변에서 뚜렷한 황사현상의 특성을 찾기 힘든 경우 등이었다.

### 3.2 입경분포

우리나라에서 관측된 황사의 입경분포는 Han (2003), Ghim (2011) 등에 의해서 측정결과를 보고하거나 연구결과를 정리하여 소개한 바 있다. Husar *et al.* (2003)은 Clarke *et al.* (2004)의 '3산 분포 가정'에 근거하여 북미에서 관찰된 먼지의 입경분포에서 2~4  $\mu\text{m}$  부근의 먼지는 사하라나 동아시아로부터 장거리를 이동한 것으로, 7~10  $\mu\text{m}$  혹은 그 이상의 먼지는 인근에서 발생한 것으로 보았다. Mori *et al.* (2003)은 2001년 3월 말 중국 북경과 일본 야마구치 시에서 8단의 다단 채취기를 이용하여 입경분포를 조사하였다. 북경에서는 4.7~7.0  $\mu\text{m}$  사이에서 단일 최대점이, 야마구치 시에서는 0.43~0.65  $\mu\text{m}$ 와 3.3~4.7  $\mu\text{m}$  등 2개의 최대점이 나타났다.

국내 연구로는 국립환경과학원 (NIER, 2012a, 2011)이 백령도 2010~2011년 입경분포자료를 보고한 바 있다. 평상시 입경분포는 1  $\mu\text{m}$  이하와 이상의 영역에서 피크(peak)를 나타내는 전형적인 이산(bi-modal) 형태를 보였다. 계절별 농도 분포를 살펴보면, 가을철을 제외한 평상시에는 먼지 직경이 1.8  $\mu\text{m}$  이하( $\text{PM}_{1.8}$ )인 입자가  $\text{PM}_{10}$ 의 70% 이상을 차지하고,  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 의 평균비는 0.84인 것으로 나타났다. 반면, 봄철 황사 시에는 먼지 직경이 1.8  $\mu\text{m}$  이상인 입자가 급격히 증가하여  $\text{PM}_{1.8}$ 이  $\text{PM}_{10}$ 의 60% 이하로 낮아지는 분포를 보였다(NIER, 2011). 표 1은 황사와 비황사 기간 여름과 겨울철 질량 분율의 변화를 요약하여 나타낸

것이다.

### 3.3 발원지 황사의 화학적 성분

황사의 입경분포, 황사 중 유해물질농도 분석 및 정량적인 특성 파악과 이동과정에서의 변환특성 규명을 위하여 황사발원지 토양 및 대기 중 황사성분에 관한 분석 자료는 매우 중요한 정보를 제공한다. 황사발원지 토양 특성에 관한 연구로는 Park (2002)이 중국 내륙의 황토고원과 북부지방의 내몽고 지역 등에서 37개 토양시료를 채취하여 광물 성분, 화학 성분 및 토양입자의 크기를 분석한 자료가 있으며, Kwon *et al.* (2004)이 중국 타클라마칸사막 13개 지점에서 채취한 시료를 이용하여 지화학적 특성을 분석한 결과가 있다(Kim *et al.*, 2010).

또한 Han *et al.* (2004)은 발원지 토양의 입도분석, 이온 및 금속성분 분석을 수행하여 토양 성분 특성을 조사하였으며, Zhang *et al.* (2005)과 Park *et al.* (2008)은 중국과의 공동 연구로 중국 황사 발원지 토양시료 분석을 통해 우리나라 풍적모재 토양의 기원 해석 및 황사가 토양 및 농업환경에 미치는 영향을 분석하였다.

Kim *et al.* (2006)은 단일입자 분석법으로 중국 내 주요 발원지 토양의 주요 화학조성에 대하여 분석하였으며, Zhang *et al.* (1993)는 황사발원지 지역과 영향 지역간 주요 성분 간의 관계 분석을 위하여 중국 북부 사막지역에서의 토양성분을 분석한 바 있다. 이처럼 국내·외 황사발원지 토양분석과 관련된 연구 자료는 많이 부족한 편이며, 이들 중 대부분은 중국 사막지역에 대해서 이루어지고 있다(Zhang *et al.*, 1993).

Han *et al.* (2004)은 중국 황사발원지의 토양시료를 채취하여 화학적인 성분 분석을 실시하여 보고하였다. 그림 1은 분석에 사용한 각 토양시료들의 채취지점을 나타낸 것으로 총 37개의 황사 토양시료들이 채취되었다. 위치별로 토양시료는 Shuifu, Jingyuan

Table 1. Comparison of mass distributions between Aisan Dust (AD) episodes with non-episode at Baengnyeong stations (2010) from NIER report (2011).

	$\text{PM}_{10}(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	$\text{PM}_{1.8}(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	$\text{PM}_{2.5}(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	$\text{PM}_{1.8} < (\%)$	$\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$
Spring	18.1	15.3	12.4	84.4	0.69
Spring (AD)	63.2	42.2	26.1	66.7	0.62
Winter	15.0	11.7	19.2	77.5	1.28
Winter (AD)	121.3	18.0	45.8	75.4	0.60

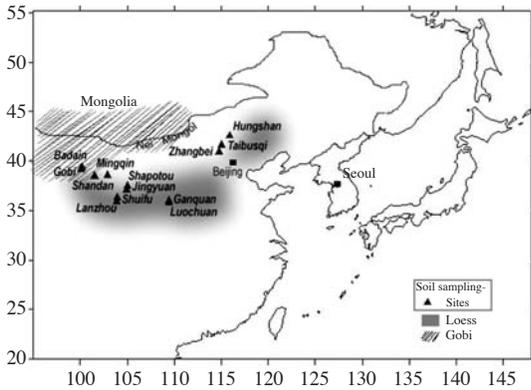


Fig. 1. Map of sampling sites showed with some primary source regions of Asian Dust in northern China (Han et al., 2004).

Shapotou, Minqin, Shandan, Badain, Gobi, Lanzhou, Luochuan, Ganquan, Zhangbei, Taibusqi, Hungshan의 13개 지역으로 나누어지며, 이때 각 채취지역은 지리적으로 크게 3지역으로 구분된다. Badain, Gobi를 포함하는 중국 북서부지역과 Minqin, Shandan, Shapotou, Jinyuan, Shuifu, Lanzhou, Ganquan, Luochuan을 포함하는 중국 중북부지역 그리고, Hungshan, Taibusqi, Zhangbei를 포함하는 중국 동북부지역으로 나뉜다. 중국 중북부지역은 우리나라에 가장 많은 영향을 미치는 황사 발생지역으로 알려져 있으며, 또한 Xuan and Sokolik (2002)에 따르면 과거 30년 동안의 중국 기상청 기록을 토대로 중국 전체지역에 대한 모래폭풍 발생빈도를 조사한 결과, Minqin 등의 지역은 다른 황사발생지역에 비해 훨씬 높은 발생빈도(extra-high frequency)를 보이는 것으로 나타났다.

토양시료들의 채취지역을 표시한 그림 1에서 알 수 있듯이 몽골과 중국의 국경에 위치한 내몽골을 중심으로는 고비사막이 펼쳐져 있으며, 그 아래로 황토지역이 황하를 중심으로 광범위하게 분포하고, 두 지역 사이에는 몇 개의 사막들이(Badain Jaran, Tengger, Ulan Bhu, Hobq, Mu Us, Hunshandake Desert) 산재하고 있다. 따라서 각각의 시료 채취지역들은 토양 형태에 따라 다시 황토지역(Shandan, Luochuan, Ganquan, Lanzhou), 모래·황토지역(Shuifu, Jinyuan), 고비지역(Gobi), 그리고 모래지역(Badain, Minqin, Zhangbei, Shapotou, Hungshan, Taibusqi)으로 나뉘어졌다(Han

et al., 2004).

토양시료의 이온성분을 분석한 결과 전체 질량 중에 이온성분이 차지하는 비중은 Shuifu를 제외하고는 모든 지역에서 약 1% 미만을 나타내었고, 전체적으로 sulfate, sodium, calcium 성분들이 다른 이온들에 비해 많이 검출 되었으며, 전체 13개 지역 중에서는 Shuifu에서 가장 높은 이온 농도를 보이고 있다. 금속성분의 경우 전체 질량에서 차지하는 비중이 0.04~15.04%로, 황토성분이 포함되어 있는 Shandan과 Jinyuan에서는 약 8~15%, Gobi에서는 7%, 그리고 Badain 및 Minqin 지역에서는 약 3~4% 수준을 나타내었다. 모래성분이 많이 함유된 사막지역의 토양일수록 규소성분을 많이 포함하는 관계로 다른 금속성분들의 비중이 상대적으로 줄어드는 것을 볼 수 있다(Han et al., 2004).

일반적인 토양성분에 해당하는 Al, Ca, Fe, Mg, K, Mn, Na과 같은 금속성분들이 전체지역에서 높은 조성을 보이고 있으며, 토양성분들 각각에 대한 산화물 형태의 합으로 농도를 계산해본 결과 황토, 고비, 모래 각 지역의 토양에 대해 각각 29%, 20%, 6%의 질량비중을 차지하는 것으로 나타났다.

황사의 발원지 토양에 대한 결과를 기존의 다른 자료들과 비교해보기 위해 Asian dust material (ADM) (Nishikawa, 2000) 외에 다른 기존의 자료들을 선정하여 표 2, 3에 정리하였다. ADM의 경우 Mg, Na, Co, Cd에 대한 분석결과들이 누락되어 있는 관계로 그의 11가지 금속성분들에 대해서 표 3과 같이 비교하였다. 이번 연구결과 중에서 Loess에 대한 성분분석 결과를 ADM의 농도와 비교한 결과 Fe, Mn, Ni, Cu와 같은 물질들은 ADM에 비해 0.8~1.0 정도의 범위를, Ca와 Pb의 경우 1.3~1.5의 값을 나타내고 있다. 그 외 Al과 V, Cr과 같은 물질들은 0.5~0.6 사이의 값을 보여주고 있으나, K의 경우 <0.2으로 ADM에 비해 상당히 낮은 수준을 나타내고 있다. 이런 차이는 분석과정에서 발생할 수도 있으나, 위에서 언급한 바와 같이 시료채취지점 및 위치에 따라 구성비가 변화하는 토양성분의 다양성에 기인한다고도 할 수 있다. 그 예로 B (Loess), C (Tungeori)의 Al, V의 농도 수준이 ADM보다 높은 0.7~1.2의 수준을 보여주고 있으나 K의 경우에는 0.3에도 미치지 않고 있다.

Al의 경우 비황사발생지역에 해당하는 표 3의 A (Seoul), D (Taylor), E (Korea)의 결과를 살펴보면 대

**Table 2. Soil composition measured at all the 13 sampling sites (Han et al., 2004).**

(unit:  $\mu\text{g/g}$ )

	Loess			Loess & Sand		Gobi		Sand			Grass		
	Shandan	Luochuan	Ganquan	ShuiFu	Jingyuan	Gobi	Badain	Minqin	Zhangbei	Shapotou	Hungshan	Lanzhou	Taibusqi
Cl <sup>-</sup>	26.3	78.8	14.2	30900	22.2	218	78.6	110	5.7	9.6	4.3	528	10.1
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	53.6	31.5	0.0	2760	0.0	149	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1230	323
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	340	263	21.2	24000	32.9	366	288	267	14.5	0.0	0.0	2050	41.0
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	14.1	21.6	10.1	16.2	9.6	16.3	14.7	14.3	13.1	9.7	15.8	12.3	12.0
K <sup>+</sup>	405	21.4	26.8	79.7	98.2	72.0	52.7	56.6	27.7	14.0	21.2	29.0	45.9
Na <sup>+</sup>	61.9	200	50.0	14000	277	230	259	165	27.3	43.5	22.2	346	36.9
Ca <sup>2+</sup>	461	508	379	5620	387	431	237	240	159	17.4	31.6	1380	162
Al	33300	35000	28800	24000	20500	20600	12100	11600	10600	12700	5500	32800	28700
Ca	103000	150000	90700	149000	84800	73900	36200	30700	4220	1220	396	31000	5100
Fe	27100	27600	25400	20200	17000	19900	11200	10600	7460	8450	4430	30600	24100
Mg	15600	14000	12800	18300	12800	13800	7520	6580	2470	3900	1050	14300	6530
K	3530	2250	1860	1870	1850	1550	879	955	655	828	567	2370	2410
Na	180	107	47.3	3040	118	113	99.7	73.1	25.4	30.0	39.3	132	48.2
Mn	479	454	504	440	432	421	259	250	116	144	61.0	636	319
V	29.2	33.1	29.0	23.7	20.9	24.2	15.7	12.9	12.7	11.1	7.3	36.9	35.0
Co	11.7	11.4	12.0	9.7	8.7	9.5	5.2	5.2	4.2	4.5	2.5	16.0	11.0
Cr	28.2	31.1	26.4	25.9	23.3	31.4	17.8	15.0	10.2	12.4	6.4	58.1	29.9
Ni	33.5			26.8	23.0		13.6	9.8	9.1	7.8	4.4		26.6
Cd	1.5	1.4	1.4	1.3	1.2	1.2	0.6	0.7	0.3	0.4	0.7	1.8	1.4
Cu	33.8	25.3	27.1	29.8	23.9	19.9	12.8	9.3	8.1	8.6	4.1	43.5	25.9
Pb	27.9	27.7	23.9	26.9	19.5	20.3	9.0	9.9	6.0	2.9	1.4	24.3	14.4
Zn	50.4	43.2	45.0	42.7	37.7	31.0	16.9	20.4	10.3	16.2	6.6	49.5	48.6

※ First and second low indicate the soil type and the name of each sample collected site.

**Table 3. Soil composition concentration compared with other studies (Han et al., 2004).**

(unit:  $\mu\text{g/g}$ )

	Loess	Gobi	Sand	ADM*	A	B	C	D	E
					Seoul	Loess	Tungeori	Taylor	Korea
Cl <sup>-</sup>	39.7	218	41.6	-	-	-	-	-	0.27
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	28.4	149	0.0	-	-	-	-	-	0.0039
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	208	366	114	-	-	-	-	-	0.24
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	15.2	16.3	13.5	-	-	-	-	-	0.18
K <sup>+</sup>	151	72.0	34.4	-	-	-	-	-	0.14
Na <sup>+</sup>	104	230	103	-	-	-	-	-	0.085
Ca <sup>2+</sup>	449	431	137	-	-	-	-	-	-
Al	32400	20600	10500	60000	85400	73400	39200	81300	31000
Ca	115000	73900	14500	76000	17400	56700	48200	36300	12000
Fe	26700	19900	8430	29000	29000	53000	13000	50000	28000
Mg	14100	13800	4300	-	-	-	-	-	8000
K	2550	1550	777	21000	18000	6400	2300	25900	15000
Na	111	113	53.5	-	15800	20400	21200	28300	7200
Mn	479	421	166	530	660	630	720	1000	2000
V	30.4	24.2	11.9	60	70	65	58	120	-
Co	11.7	9.5	4.3	-	11	18	6	20	60
Cr	28.6	31.4	12.4	50	55	110	250	100	85
Ni	33.5	-	8.9	40	60	42	37	35	30
Cd	1.4	1.2	0.5	-	-	-	-	0.15	5
Cu	28.7	19.9	8.6	30	-	-	-	-	140
Pb	26.5	20.3	5.8	20	230	107	73	15	44
Zn	46.2	31.0	14.1	70	130	180	230	40	410

체로 Ca에 비해 상당히 높은 농도를 보이고 있으나, 반면에 중국 토양을 분석한 사례에 해당하는 황토, 고비, 모래지역 (this study)과 C (Tungeori), ADM은 농도에서 보듯이 Ca/Al 값이 1보다 큰 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 황사 풍하지역에서의 Ca 감소 경향은 G.R. Carmichael에 의한 모델링 및 에어로졸 분석결과와도 일치하는 현상으로 알려져 있다 (Liu and Hopke, 2003).

Kim *et al.* (2010)은 우리나라에 영향을 주는 황사 발원지인 몽골 (고비사막)을 대상으로 하여 발원지 토양 특성을 분석함으로써 황사 피해 대책 마련 등을 위한 기초 자료를 확보하였다. 몽골지역의 토양시료 채취 및 분석을 통해 발원지 토양에 대한 특성을 파악한 결과를 보고하기도 하였다.

### 3. 4 오염물질의 혼입과 입자의 변환

황사는 기본적으로 흙 먼지로 지각 (Crustal) 성분이 주성분이다. 장거리 이동되는 황사의 성상은 발원지에서의 토양성분 이외에도 이동과정 중에서 통과하는 지역의 가스상 물질 혹은 유해성분이 혼입될 수 있다 (NIER, 2009). 가스와 입자의 상호작용에 의해 SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> 등의 가스상 물질이 입자표면에 흡착되어 황산염이나 질산염 등이 생성될 수 있다. 이 과정에서 오존과 같은 산화제 등이 입자표면에서 SO<sub>2</sub> 등의 가스상 물질들을 산화시켜 황산염 등의 입자상 물질을 생성시키는 역할을 한다.

이러한 먼지입자의 화학적 변환과 2차 산성물질의 생성과 관련하여서는 아직도 논란이 많다 (Ghim, 2011). 특히 화학적 변화정도, 황산염과 질산염의 생성과정에 대해서는 국내외 많은 연구자들이 측정과 다양한 해석을 제시하고 있으나 명확한 설명이 제시되고 있지 않다 (Song *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2003; Ma *et al.*, 2001; Zhang and Iwasaka, 1999).

황사는 질산의 주요 운반체였다. 도시에서 질산염은 질산암모늄 형태로 미세입자에 존재하나 황사와 함께 조대입자 중 양이온이 크게 증가하면 휘발하여 조대입자로 이동하였다. 질산은 습도가 낮아도 황사의 주요 성분인 탄산칼슘과 반응하여 흡습성의 질산칼슘을 생성시키고 질산칼슘이 수분을 흡수하면 반응이 촉진되며 쉽게 액상 반응으로 이어졌다. 황산염은 거의 비휘발성이고 황산칼슘도 용해도가 낮기 때문에 황산의 반응은 질산만큼 용이하지 않았다. 규산

알루미늄 중 철성분이 촉매역할을 하여 SO<sub>2</sub>로부터 황산염이 생성되거나 황산암모늄이 응결되어 조대입자 중 황산염이 발견되기도 하나 양은 많지 않았다. 그러나 강우를 동반할 때는 액상반응에 의하여 황산이 생성되며 조대입자에서도 황산염이 높아졌다. Park *et al.* (2001a)은 황사와 PAHs의 농도 영향을 2000년 3월 4월에 거쳐 황사와 비황사시 농도를 상호 비교 검토하여 황사현상이 이들 물질농도 분포에 미치는 영향을 해석하고자 하였다. 황사기간 중 총 PAHs 농도는 일반 대기상태보다 140% 정도 높게 나타났으며, 강수비보다 250% 높게 나타났다고 보고하였다. 또한 기상인자를 포함한 일반적인 대기질 상태 변수들과 PAHs의 상관관계를 분석한 결과 PAHs와 가장 강한 상태변수는 SO<sub>2</sub>였으며, 다음은 TSP 순이었다. 이상의 결과를 바탕으로 중국 화석연료의 연소가 서울시 대기질 중 유기성 대기오염물질에 영향을 주고 있다고 주장하였다.

측정기술의 발달에 따라 황사 개개입자의 변화를 살피는 연구자들이 많아지고 있다. 과거에는 필터를 이용하여 하루 혹은 몇시간씩 시료를 채취하여 시간 평균을 측정하였으나, 개개입자를 분석함으로써 각기 다른 입자의 변화를 개별적으로 이해하게 되었다 (NIER, 2009). 개별입자 연구를 통하여 입자의 원소 성분과 크기나 모양 등의 정보를 확보할 수 있으며, 최근에는 TEM (Transmission Electron Microscopy)/EDS (Energy Disperse Spectroscopy), LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) 등이 활용되고 있다. 2009년 광주지역에서 수행된 LIBS (laser induced breakdown spectroscopy) 분석에서 Ca, Al, Mg, Na, K 등의 원소 농도가 증가하였으며 황사발생 전에는 없던 Fe, Cu, Ni, Mn 등의 중금속 원소가 발견되었다. TEM/EDS 분석과 ICP-MS (inductively coupled plasma-mass spectroscopy) 분석에서도 유사한 성분의 원소들이 확인되었다. 2009년 10월 19일 황사는 내몽골지역에서 발생하였는데 LIBS 분석결과 황사기간 Fe, Co, Mn, Ca 등의 농도가 비황사기간과 비교해서 약 3~4배 증가하였고, ICP-MS 분석에서는 모래성분인 Fe, Si 뿐 아니라 Al, Ca, Mg, Zn 등의 중금속도 포함되었다 (NIER, 2009).

위의 연구는 주로 입자를 필터에 채취하여 분석하는 기법이나 최근 Aerosol Mass Spectrometer (Aerodyne, USA) 등이 상용화 되어 무기성분과 유기물질

(organic matters)의 연구에 활발히 사용되고 있다.

### 3.5 황사 중 수은/곰팡이/발원지에 따른 자연 방사선

황사에 포함된 수은에 관한 연구로는 장거리 이동 현상과 기체상 수은의 분포특성의 연관성을 분석하려는 연구가 진행된 바 있다(Lee *et al.*, 2007). 서울 지역을 대상으로 58개월 동안 지속적으로 수집한 시간대별 수은 농도 자료를 다양한 통계적인 방법으로 분석하였다. 특히 자료를 황사/비황사로 구분하여 비교 분석을 시도하였다. 황사기간 수은의 최소농도값은  $1.79 \text{ ng m}^{-3}$ 로 비황사기간에 비하여 상당히 높은 수준이었다. 하지만 황사의 발생이 통계적으로 유의한 수준의 농도 상승시키는 효과는 없는 것으로 분석되었다. 눈여겨 볼만한 것은 요인분석(factor analysis) 결과, 황사기간 동안 수은은 아황산가스( $\text{SO}_2$ )와 요인군으로 구분 된다는 것이다.

황사의 물리화학적 특성에 대한 연구가 꾸준히 진행되었던 반면, 생물기원입자(Bio aerosol)에 대한 연구는 Matthias-Maser and Jaenike (1995) 등이 꽃가루(pollen), 세균, 진균 및 일부 원생 동물의 포자, 식물 조각, 동물체의 상피조직, 바이러스 등의 크기와 모양을 보고한 이래 다양한 방면에서 연구가 진행되고 있다. 아직까지 국내·외 대기 중 바이오 에어로솔에 대한 연구는 많지 않으며, 특히 황사와 관련한 바이오 에어로솔에 대한 연구는 많지 않은 실정이다. 국내에서 황사와 관련된 연구로는 Kim (2004) 등이 충남 서산지역에서 곰팡이 포자의 특성을 황사이동경로와 연관지어 해석하고자 하였으며 6종류의 진균류가 황사에 포함된 것으로 보고하였다. 이들 곰팡이 포자의 조성은 황사의 이동경로와 상관성이 큰 것으로 추정하였다(Yeo and Kim, 2002).

황사에 포함된 자연방사선도 인체 위해성 측면에서 중요한 요소이며, 발원지에 따른 다른 지화학적 특성을 보이는 것으로 보고되고 있다. 이와 관련된 국내 연구로는 우리나라에 가장 큰 영향을 끼치는 오르도스사막, 알라산사막, 타클라마칸사막 그리고 황토고원 지역의 표층퇴적물에 함유된 자연방사성핵종의 방사능 특성을 조사한 연구가 진행된 바 있다(Lee *et al.*, 2008). 각 지역에서 채취한 토양시료 중의 비방사능(specific activity; SA, Bq/kg)과 비방사능 비(SA ratio; SAR)를 산출하여 이 두 인자를 황사발원지의

방사능 특성조사에 적용하였으며, 자연방사성 핵종의 방사능 특성도 발원지의 분류나 추적을 위한 또 하나의 인자로 사용될 수 있음을 보여주었다(Lee *et al.*, 2008).

### 3.6 황사의 광학 특성과 라이다 측정 연구

황사 발생 시에 미세먼지 농도가 높아질 경우 지표에 도달하는 일사량 감소나 지구알베도 증가로 지구-대기의 복사수지에 상당한 영향을 미치게 된다. 황사 등 대기 중 에어로솔은 성질이 매우 다양하기 때문에 전지구적 기후변화 연구에 있어 에어로솔의 역할과 작용에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다(Han *et al.*, 2008; Yoon *et al.*, 2005). 광학 측정 자료 중 가장 역사가 오랜 것은 태양복사 측정이다. 1950년대 말부터 전 세계적으로 측정이 시작되어 1960년대부터는 신뢰성 있는 자료가 모아지고 있다(Streets *et al.*, 2009).

1990년대부터 지상, 항공기 그리고 위성 관측을 통하여 황사와 산불같은 자연발생 에어로솔뿐만 아니라 인위적으로 발생한 대기오염물질의 연직분포와 광학특성 관측을 통해 이들이 구름-복사-기후에 미치는 영향을 직접 또는 간접적으로 도출하는 연구가 활발히 진행되었다(Nakajima *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2005; Huebert *et al.*, 2003; Murayama *et al.*, 2001).

Eck *et al.* (2005), Kim *et al.* (2004)은 황사발원지의 SKYNET 자료를 분석하였으며, Yu *et al.* (2006)은 2001년부터 2005년까지 중국, 한국, 일본 내 10개 AERONET 지점 황사 자료를 분석하였다. 중국의 황사는 우리나라, 일본에 비하여 AOD가 크고 옹스트롬 지수가 작았다(Ghim, 2011). 최근에는 국립환경과학원에서 추진한 DRAGON 2012 NE-asia에서 동아시아 지역 AOD를 측정하기도 하였다.

Kim *et al.* (2004)은 발원지 인근 측정소 중 Dunhuang의 단산란 반사율이 가장 낮다고 하였으나 Yu *et al.* (2006)에서는 북경, Yulin은 물론 안면도보다 높았다. Kim *et al.* (2004)은 발원지를 중심으로 먼지의 흡수성을 강조 하였으나 Yu *et al.* (2006)은 도시 오염과 비교하였기 때문으로 볼 수 있다(Ghim, 2011). Lee *et al.* (2007)는 CSHNET과 함께 MODIS 자료를 이용하여 단산란 반사율을 조사하였으며, Du *et al.* (2008)은 2005년~2007년까지 CSHNET 15개 지점 자료를 이용하여 발원지와 발원지부근, 발원지로부터

먼 풍하 지역을 구분하여 황사 때와 비황사 때 광학 특성을 비교 하였다.

라이다(Lidar; Light Detection and Ranging)를 이용 실시간 에어러솔의 연직 분포와 후방산란계수(back-scattering coefficient) 그리고 에어러솔 소산계수(aerosol extinction coefficient) 등의 원격 관측 자료가 황사 및 대기오염물질의 장거리 수송(Yoon *et al.*, 2010) 연구에 사용되었고, 도시 지역 대기 혼합층내의 오염입자 연직분포 및 거동 특성(Kim *et al.*, 2008, 2007) 등의 연구가 진행된 바 있다.

황사 시 에어러솔의 물리화학적 특성에 관한 연구로 봄철 황사기간 동안 황사와 비황사 에어러솔의 산란 및 흡수 특성 연구(Kim *et al.*, 2005), 광학 입자계수기를 이용한 에어러솔의 크기분포, 네펠로미터와 에셀로미터를 이용한 에어러솔의 광산란 및 흡수도에 대한 관측 연구(Kim *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2003) 등이 있다. 심한 황사 사례에 대한 연구로는 라이다와 썬포토펜터를 이용한 에어러솔의 광학적 특성 연구(Lee *et al.*, 2008) 등 다수가 있다.

### 3.7 황사사례 발생원별 기여도연구

Shin *et al.* (2006)은 9차례 황사사례에 대하여 CMB 8.0을 이용하여 발생원별 기여도를 계산한 결과를 보고한 바 있다. 사례 1부터 9까지는 각각 2000년에 4차례, 2001년 2차례, 그리고 2002년 3차례의 황사사례를 표시하는 것으로 전체적으로 중국 황사발원지 토양과 지질학적 발생원에서 높은 기여율을 보이고, 해염입자나 2차 생성입자들에 의한 기여도 역시 모든 사례에 꾸준히 반영되고 있는 것으로 나타났다. 토양 및 해염입자가 SO<sub>2</sub> 가스 및 HNO<sub>3</sub>와 반응에 의하여 변환·변질되어 생성되는 CaSO<sub>4</sub>, Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaNO<sub>3</sub> 및 가스상들간의 반응에 의해 생성되는 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 등의 2차 생성입자에 대한 기여도를 평가하고자 하였으며, 모델 수행 결과 약 2~11%의 기여도를 각 사례별로 보였다. 가장 두드러진 기여도를 보이는 물질은 토양혼합입자인 CaSO<sub>4</sub>였으며, 그 뒤를 이어 CaNO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>와 같은 물질들이 황사시료의 입자상 물질에 기여하는 것으로 나타났다. 중국 황사발원지 토양에 의한 기여도를 살펴보면, TSP 농도가 300 µg/m<sup>3</sup> 이상인 황사사례의 경우 약 80% 이상의 기여도를 나타내었으며, 200 µg/m<sup>3</sup>보다 작은 질량농도를 기록한 사례에서 중국 황사

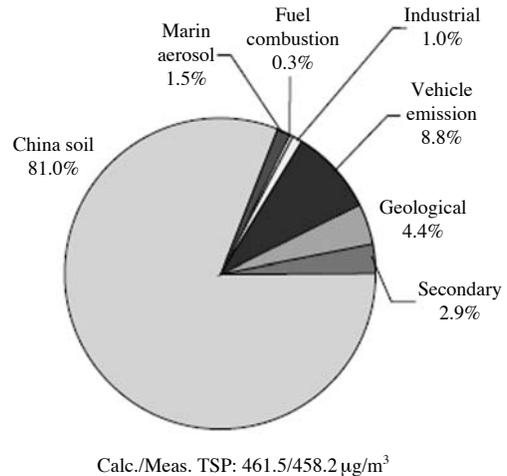


Fig. 2. Source apportionment of TSP during the Asian Dust episodes (Shin *et al.*, 2006).

발원지 토양은 약 65% 미만의 기여도를 보였다.

황사기간 동안의 평균 TSP에 대한 주요 발생원들 (China soil, marine aerosol, fuel combustion, industrial process, vehicle emission, geological, secondary products)의 기여도는 그림 2와 같이 나타났다. 평균 TSP 농도 458.2 µg/m<sup>3</sup>에 대해 기여도분석에 의한 총 질량 농도값은 461.5 µg/m<sup>3</sup>를 나타내었으며, 이 중에서 가장 큰 기여도를 보이는 발생원은 중국 황사발원지 토양으로 374 µg/m<sup>3</sup>, 81%의 구성비를 보이고 있으며, 그 외 자동차 배기가스와 지질학적 발생원의 경우 각각 8.8%와 4.4%, 해염에 의한 기여도는 1.5%를 나타내었다. 토양 및 해염혼합입자를 포함한 2차 생성입자들 CaSO<sub>4</sub>, Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaNO<sub>3</sub>, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>에 의한 기여도는 약 2.9%로 나타났으며, 산업공정 및 연료연소과정에서 발생하는 오염물질에 의한 배출 기여도는 1% 이하의 수준으로 황사시 TSP에 대해 비교적 작은 기여도를 보이고 있다.

### 3.8 황사예측모델

황사와 유사한 먼지폭풍에 대한 모델링은 사하라 사막의 조건을 모사하기 위한 1차원, 2차원 모델 (Berkofsky, 1982)연구를 시작으로 본격화 되었다. 이후 먼지폭풍에 대한 체계적인 연구는 Westphal *et al.* (1988, 1987)에 의해 이루어졌다.

우리나라 초기 황사모델 관련 연구는 주로 중관기

상과 수송에 관한 분석이 활발히 진행되었으며, 황사 지속시간과 종관특성 (Kim *et al.*, 2004), 장거리 수송 패턴 분석 (Chun *et al.*, 1999, 2000) 등이 활발히 진행되어 수치모의가 가능한 기반을 마련하였다.

기상청은 정량적인 예보의 일환으로 황사단기예측 모델인 ADAM (Asian Dust Aerosol Model)을 운영하여 예측을 실시하고 있다. ADAM은 1996~2006년의 봄철기간에 대해서 세계기상기구(WMO: World Meteorological Organization)의 종관기상관측(SYNOP: Synoptic observation) 자료를 통계 분석하여 동아시아 지역의 황사발원지와 발생을 위한 입계기상조건을 정의하였으며, 황사발원지에서 기상조건을 만족할 경우 마찰속도의 함수로 지표면 황사 발생속도를 계산한 모델이다 (Park and Lee 2004; Park and In, 2003).

국내의 경우 발원지에서 먼지폭풍의 발생, 상승, 이동 그리고 침착과정이 포함된 체계적인 모델연구는 Chung and Park (1995) 등에 의해 수행되었다. 현재 기상청에서 사용하는 모델의 원조격인 ADAM에 대한 연구로는 Cho *et al.* (2007) 등이 황사의 발생과 이동에 대한 예보 정확도를 분석하기도 하였다. ADAM에서 모의된 PM<sub>10</sub> 질량농도와 황사발원지에서 관측된 PM<sub>10</sub> 질량농도 값을 상호 비교하여 황사 초기 발생량 산출 결과를 평가하였다. 또한 한반도 수송과정에 대한 예측 수준을 평가하기 위해 서울(관악산), 백령도, 안면도 지구대기감시관측소 (Korea Global Atmosphere Watch; KGAWO) 및 제주 고산에서 관측된 PM<sub>10</sub> 질량 농도를 각각 비교하였다.

Kang *et al.* (2012)은 황사 모의시 가장 중요한 요인인 황사배출량을 2007년 사례에 적용하여 기존 봄 조건에서 모사되고 있던 황사모델 조건을 겨울까지 확장하는 연구를 진행하였고, 황사발생 기간동안 WRF/chem 모델을 이용하여 황사발원지의 지표면 특성이 발생량에 미치는 영향을 분석하였다. Moon (2010, 2009)은 WRF 모델을 기반으로 경험시간 황사발생량을 인공위성의 황사분석영상과 대조하는 연구를 진행하여 위성관련 연구로 영역을 확대하기도 하였다.

Lee (2009)는 위성에서 관측된 식생지수 (NDVI: Normalized Difference Vegetation Index)를 이용하여 계절에 따라 변화하는 지표면 식생 특성을 고려할 수 있는 황사발생량 모델을 제안하였으며, Park *et al.* (2010)은 NDVI와 SYNOP 황사발생빈도와의 상관관계를 도출하여 이를 발생량 함수의 보정항으로 사용

하여 사계절에 적용 가능한 ADAM2를 개발하였다.

한편 기상청에서는 차세대 수치예보시스템으로 영국의 통합모델 (UM: Unified Model)을 2008년 5월에 도입하고 2010년부터 현업에 활용하고 있다. 이를 바탕으로 UM 기상 예측장을 기반으로 하는 황사단기예측모델 시스템인 UM-ADAM2이 개발하였고, 2010년 3월부터 시험기간을 거쳐 11월부터 사계절 현업 황사예측에 활용하고 있다 (Lee *et al.*, 2012). UM은 영국 기상청의 통합모델로 기후, 전구, 지역, 악기상을 동일한 역학체계로 구성하고 운영하는 모델이다.

최근 황사와 관련하여 위성자료를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있으며, ADAM2는 위성 NDVI를 입력자료로 하여 발원지 식생의 변화를 고려할 수 있도록 개선되었으며, 통합기상모델 UM을 입력장으로 활용할 수 있도록 하고 있다.

Lee *et al.* (2012)은 UM-ADAM2의 성능 및 예측 정확도를 파악하기 위하여 2010년 3~12월 전기간 동안 12시간 간격으로 72시간 황사농도를 예측 모의하여 국내 및 중국에 위치한 관측소에서 관측한 PM<sub>10</sub> 농도와 비교 분석하였다. 발원지 지역에 대해 모의된 PM<sub>10</sub> 농도는 관측과 유사한 패턴을 보였으나 지역적으로 과소, 과대 모의되는 경향이 나타났으며 이는 발원지에 가까울수록 발생량 모의에 민감하게 반응할 것을 고려해 볼 때 풍속, 상대습도 및 지표조건 등의 정확성이 더욱 확보되어야 할 것으로 분석하였다. UM-ADAM2이 황사예측이 시간에 따라 안정적으로 개선되는 것으로 여겨지며 이는 본 연구에서 파악된 모델의 오차정도를 감안하여 황사예보에 활용되기에 적합한 수준인 것으로 분석되었다.

### 3.9 인공위성 자료를 이용한 황사연구

지상관측자료는 한지점에서의 황사의 강도 및 고도정보를 얻을 수 있지만, 황사층의 공간적인 분포 및 이동에 대한 정보를 얻는 데는 한계가 있다. 이러한 지상 관측에서 얻지 못하는 관측공백지역의 정보와 이동중인 황사의 공간적인 정보를 얻기 위해서는 위성자료의 사용이 절대적으로 필요하다. 위성을 이용한 황사관측의 장점은 해양 및 지상관측이 불가능한 광범위한 지역에서 황사층의 범위, 강도, 고도 정보를 얻을 수 있다는 것이다. 이러한 장점 때문에 위성자료에서 산출된 황사의 이동경로와 이동속도 정보는 예보모델 등에 매우 중요한 입력자료로 자리잡

고 있다.

위성자료에서 황사의 정보를 산출하기 위한 연구로는 MTSAT-IR 정지궤도 위성자료를 이용하여 적외선 광학두께지수 (Infraed Optical Depth Index)를 개발하여 지상관측자료 및 MODIS 센서에서 산출된 에어로솔 광학두께 (Aerosol Optical Depth), 라이다 자료 등과 비교를 통하여 개발된 알고리즘의 효율성을 평가한 연구가 진행된 바 있다(Kim, 2008). 이 연구는 가시채널을 이용한 AOD의 물리적 개념을 적외선 채널에 적용하는 방법으로 정기기상위성인 MTSAT-IR 자료로 황사탐지정보를 산출하였다는데 의미를 가진다.

적외선을 이용한 황사탐지는 11과 12  $\mu\text{m}$  두 채널의 밝기 온도차를 이용하여 구름과 황사를 구분하는 것으로 Prata (1989)에 의해 처음으로 시도되었다. 이후 Ackerman (1989), Ellrod (2003) 등이 채널을 늘려 황사를 탐지하였으며, 국내에서는 Ha *et al.* (2006) 등이 3채널 민감도 분석을 통해 MTSAT에 적용시켜 황사를 분석하였다. 이들 연구는 3.7  $\mu\text{m}$ 은 태양의 영향으로 주야간 경계값이 크다는 단점이 있으며, 11, 12  $\mu\text{m}$ 는 지표특성에 따라 잘못된 황사신호가 발생하는 단점이 발생한다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 Hong *et al.* (2010)는 배경 밝기 온도차를 도입하여 보정함으로써 황사측정의 민감도를 개선하였다. Park *et al.* (2012)은 정지궤도 위성에서 사용하던 BBTD (Background Brightness Temperature Difference, BBTD) 방법을 극궤도 위성인 MODIS에 도입하여 황사지수인 MODIS Yellow sand Index를 산출하였고, 이것을 MTSAT에 적용시킨 MTSAT YSI, 자외선을 이용해 황사를 관측하는 OMI 에어로솔 지수 (Aerosol Index, AI)를 통해 검증하기도 하였다.

적외선 영역 장파복사효과에 대한 연구로는 ARM (Atmospheric Radiation Measurement, ARM) 프로그램이 있다. 이는 미국의 에너지 관리국(U.S. Department of Energy, DOE)에서 대기 중의 온실기체와 에어러솔에 의한 장파복사 에너지의 변화가 기후에 미치는 영향을 파악하기 위하여 대기복사를 측정하는 것이다(Stokes and Schwartz, 1994). ARM 프로그램에서는 하향 장파복사를 측정하여 이론적 복사모델의 검증, 대기의 온·습도 연직 구조 복원, 구름의 미세 물리적 특성 연구, 에어러솔의 분광학적 특성 연구와 같은 다양한 응용 연구를 수행하고 있다(Knuteson *et al.*, 1994).

또한, 정확한 장파복사 측정을 위하여 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) 간섭계를 사용하고 있으며, FT-IR 간섭계를 이용한 장파복사 측정은 측정 자료의 정확성, 측정 시간의 효율성, 그리고 전체 분광 범위를 일정한 해상도로 측정할 수 있는 장점이 있다(Park, 1984).

국내에서는 황사시 지상 FT-IR을 이용한 하향복사 적외스펙트럼과 Aqua 위성의 센서인 Atmospheric Infrared Sounder (AIRS)에서 관측되는 상향복사 적외스펙트럼 분석을 통하여 동아시아 지역에서 대표적인 에어러솔인 황사가 장파복사 스펙트럼에 미치는 영향 및 황사의 분광학적 특성을 이해하고자 하는 연구를 Lee *et al.* (2009)이 진행한 바 있다.

이와 같은 위성을 이용한 각종 연구는 환경부에서 추진하고 있는 환경정지궤도 위성을 사업이 완료될 경우, 더 비약적으로 발전될 수 있을 것으로 보이며, 관련 기술의 적용하여 황사의 이동 및 공간적분포 파악에 더욱 도움이 될 것으로 보인다.

#### 4. 최근 황사사례 연구

2011년 5월 기상청의 황사기준관측지점인 흑산도에서 시간최고 PM<sub>10</sub> 농도 1,025  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 기록하며 전국규모로 관측된 매우 짙은 황사 이후 2012년과 2013년은 황사의 발생일수는 감소하였고 관측된 황사는 모두 옅은 황사사례였다(KMA, 2012, 2011). 기상청은 지난 10년(2002~2011)에 발생한 93회의 황사 이동경로를 파악하여 우리나라에 영향을 준 황사 발원지와 이동경로를 정리하였다.

지난 40년(1965~2004) 기간의 황사사례를 분석한 결과, 그 경로가 크게 5개의 유형으로 분류할 수 있다(Kim, 2008). 그림 3은 국내에 유입되는 황사의 경로를 분류한 것으로 5개의 경로(A-E)는 각각 전체 황사의 20.5%, 28.4%, 22.7%, 14.8%, 13.6%를 차지한다. 고비사막, 내몽골, 중국북동지역(만주)과 황토고원 등 최초 발원지와 이동경로를 중심으로 구분된 5개의 이동경로를 살펴보면 주로 고비사막/내몽골에서 발원하여 발해만(요동반도)를 거쳐 한반도로 유입되는 사례가 반이상 이었고, 2007년 이후 5년간은 만주지역에서 발원하여 요동반도(북한)를 거쳐 유입되는 사례가 증가하는 추세를 나타내었다.

2001년부터 2008년까지 8년간 전국을 대상으로 한 황사이동경로 분석결과 지속시간이 비교적 짧은 기간인 단기 황사사례가 증가하였다(Ghim, 2011). 황사의 주요 이동경로가 변화하면서 도달시간과 지속기간이 짧은 황사가 증가하는 경향은 기존의 황사 사례 분석에서도 보다 신속한 황사시료의 채취와 분석을 요구하고 있다. 황사를 재해의 하나로 정의하고 법정부적인 대책을 마련한 1차 황사피해방지종합대책(2008~2012)에서는 황사관측망 확대를 통한 예보 기술력 향상과 함께 황사 유해대기물질 관측 체계 구축을 통한 황사관측 능력 강화를 위해 전국 7개 권역에 황사 실시간 집중측정소를 구축하였다. 집중측정소에서는 EPA's Compendium Methos IO-3.3을 응용한 필터채취-비파괴분석 방식의 증금속 분석기(Yanca *et al.*, 2006)를 활용하여 매시간 간격으로

황사의 주요성분인 토양기원의 지각성분을 측정하였고, 이차생성입자인  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ 의 연속측정을 위해 Liquid Diffusion Denuder와 Particle Supersaturation Chamber를 사용하는 이온측정기(Wu and Wang, 2007)와 NIOSH 5040 분석법을 기반으로 한 탄소분석기를 활용하여 황사사례시 매시간 간격으로 금속, 이온, 탄소성분들을 측정하였다. 2011년부터 2012년까지 3년간 주요 황사사례들에 대해 2011년 기상청이 분류한 주요 경로별로 집중측정소에서 관측된 황사의 특성을 수도권 측정소를 중심으로 정리하여 보았다.

2011년 5월 1일~4일 황사사례는 전국 주요도시의 미세먼지( $PM_{10}$ ) 농도 분석결과 시간최고 미세먼지 농도는  $464 \sim 1,027 \mu\text{g}/\text{m}^3$  수준으로 “매우 짙은 황사”였으며 2차에 걸쳐 유입되었다(그림 4). 1차 유입은 황토고원에서 발원하여 황토고원과 산등반도를 거쳐 남부지방으로 유입되었고 내몽골에서 발원하여 만주를 거쳐 중부지방으로 2차 유입되었다. 수도권 측정소의 미세먼지 평균농도는  $PM_{10}$ 과  $PM_{2.5}$ 가 각각  $251, 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 주로 조대입자의 농도가 증가하였으며 관측된 지각성분인 Ca, Fe, K, Ti의 황사기간 중 평균농도는 황사전후에 비해 각각 18.5, 21.0, 17.8, 28.5배 급증한  $11.5, 6.9, 4.9, 1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타낸 반면 미량유해물질인 As, Se 등의 농도는 큰 차이가 나타나지 않는 특징을 보이고 있다.

2011년 5월 12~13일 사례의 경우 5월 4일 2차 유입과 동일한 경로로 유입되었으며 시간최고 미세먼지 농도는  $293 \sim 722 \mu\text{g}/\text{m}^3$  수준으로 “짙은 황사” 사례이며 수도권 측정소의 미세먼지 평균농도는  $PM_{10}$ 과  $PM_{2.5}$ 가 각각  $227, 60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 주로 조대입자의 농도가 증가하였다(그림 5).

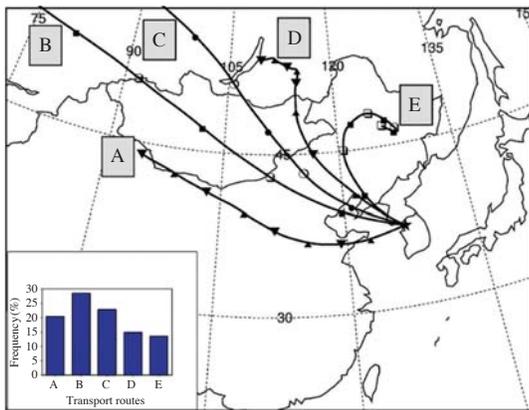


Fig. 3. The contribution rate of Asian Dust by inflow pathways during past 40 years (NIER, 2012a).

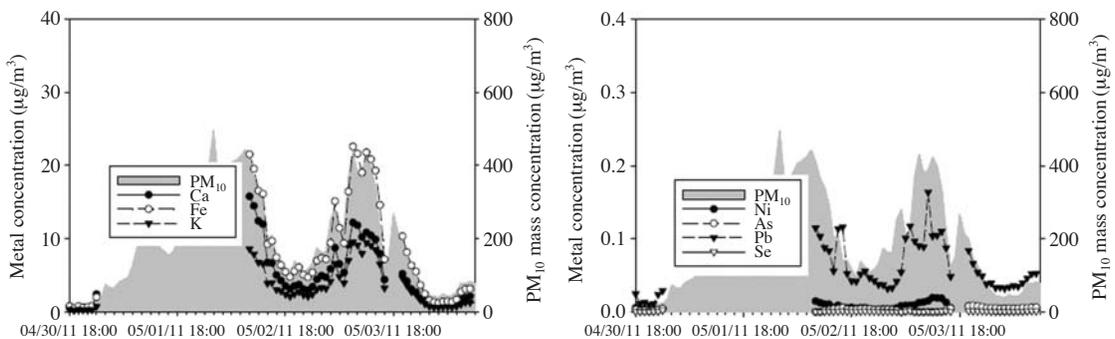


Fig. 4. The variation of element and mass concentrations of  $PM_{10}$  during 1~4 May, 2011 at Bulkwang stations.

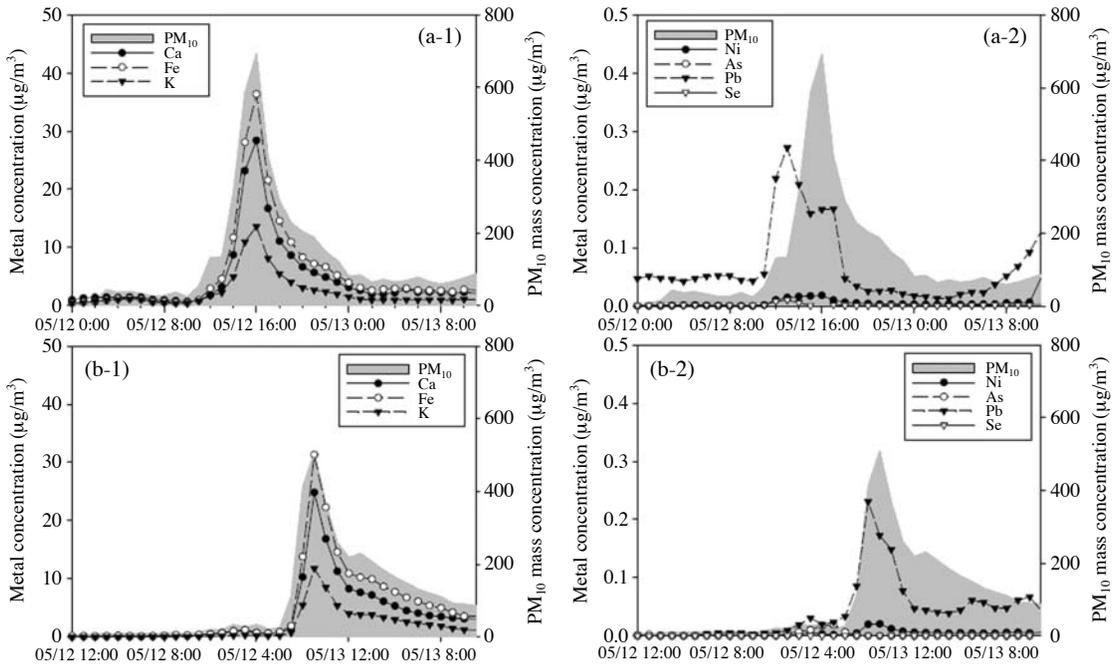


Fig. 5. The variation of element and mass concentrations of PM<sub>10</sub> during 12~13 May, 2011 at Baengyeong (a-1, a-2) and Bulkwang (b-1, b-2) stations.

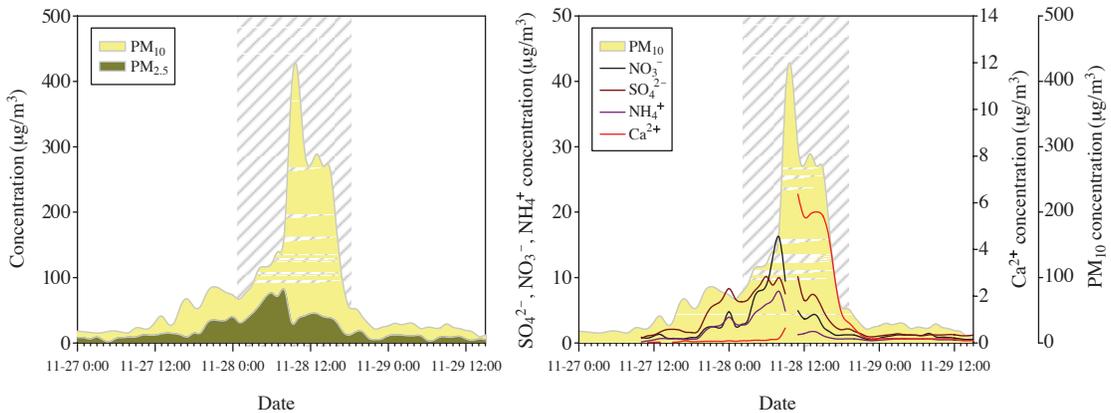


Fig. 6. The variation of ion and mass concentrations of PM<sub>10</sub> during 27~28 Nov, 2012 at Baengyeong station.

2012년의 경우 11월 가을 황사가 전국적인 규모로 관측되었다. 고비사막과 내몽골에서 발원하여 요동반도를 거쳐 유입된 “열은 황사”는 백령도에서 최고농도가 관측되었다(그림 6). 황사가 유입되면서 미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)의 농도도 증가하는 특징을 나타내었

는데 미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)의 최고농도는 백령도에서 80 µg/m<sup>3</sup>을 기록하여 초반은 미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)의 증가가 두드러지며 이후 황사의 영향이 크게 나타난 사례이다. 이온성분의 경우 황사와 함께 유입된 미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)로 인해 황사발생 초기에는 황산염, 질산염과

암모늄의 농도가 큰 폭으로 증가하였으며, 이후 본격적인 황사로 인해 토양기원의 칼슘성분 농도가 큰 폭으로 상승하였다.

탄소성분 역시 28일 미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)로 인해 사례 발생초기에 큰 폭으로 증가하였고 미세먼지농도(PM<sub>2.5</sub>)에 따라 감소하는 경향을 나타내었다(그림 7).

사례발생 초기에는 토양금속들의 농도는 큰 폭의 증가가 없는 반면, 미량유해금속인 As, Se 농도는 대폭 상승하여 미세입자(PM<sub>2.5</sub>)가 동반 유입되었음을 뚜렷하게 보여주고 있으며 이후 토양금속성분의 농도가 크게 상승하는 경향이 나타났으며, 황사의 주성분인 Si, Ca의 황사 전/후비는 15 이상으로 나타나 토양금속성분의 뚜렷한 증가가 관측되었다(그림 8).

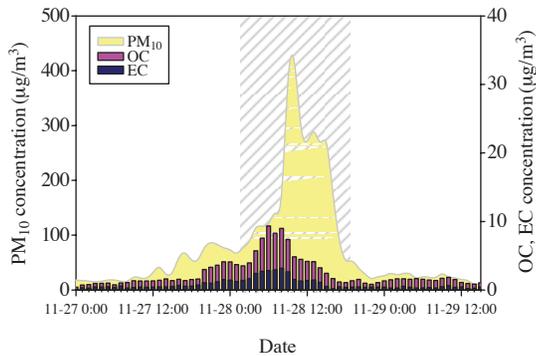


Fig. 7. The variation of OC/EC and mass concentrations of PM<sub>10</sub> during 27~28 Nov, 2012 at Baengyeong station.

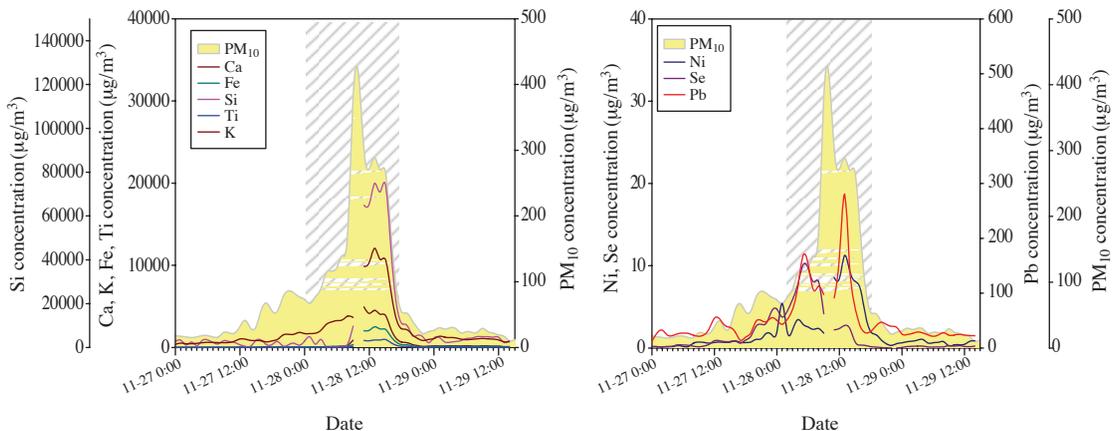


Fig. 8. The variation of metal and mass concentrations of PM<sub>10</sub> during 27~28 Nov, 2012 at Baengyeong station.

## 5. 국내의 황사연구단과 대책

### 5.1 황사의 예·경보제

월드컵을 앞둔 2002년 3월 21일 황사는 매우 큰 의미를 갖는다. 미세먼지 시간 최고농도가 2,000 µg/m<sup>3</sup>를 초과하여 평상시의 농도보다 20배 이상이나 높았음에도 불구하고 별도의 조치가 강구되지 못함에 따라 사회전반적인 비난여론의 형성과 함께, 황사시 국민, 농·축산산업, 학교 등에서 활용할 수 있는 종합적인 국민 대처요령 마련의 필요성이 강하게 제기되었다.

환경부는 황사피해 최소화를 위해 황사 강도별 행동요령을 제시하는 운영지침을 마련하고, 시·도지사가 황사경보를 발령하고 행동요령을 전파하도록 하는 황사 경보제를 2002년 4월 8일부터 시행하였다. 그러나 부족한 준비기간을 거쳐 실시된 예보·경보 대책은 경보 환경부와 예보 기상청으로 이원화되어 시행함에 따른 혼동을 야기시키는 등의 문제점을 노출하였다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 예·경보 기능을 기상청으로 일원화하도록 조정하였다.

### 5.2 동북아 황사 대응을 위한 국가간 협력 사업

황사는 지역적인 문제에서 벗어나 국제적으로 영향을 미치는 특이한 환경문제로, 몽골과 중국지역에서 발원하지만 국경을 넘어 한국, 일본 등지에 건강 및 산업, 생태계 등과 같은 다양한 형태로 영향을 미

치고 있다. 최근 중국은 거대한 자금력과 통제력으로 인공강우 및 산림 조성, 목축관리 등으로 문제를 해결하기 위해 노력을 하고 있으나 실효성에 대해서는 아직 보고된 바 없다. 몽골 또한 자체적으로 인공강우 등 각종 방안을 강구 중이나 자금과 시설의 부족으로 많은 어려움을 겪고 있다. 또한 발원지 황사를 저감하기 위해 여러 나라와 NGO에서 식목사업을 지원하고 있다.

이러한 발원지 황사 저감을 위한 사업은 2001년부터 국가간 협의를 통해 추진되었으며, 대표적인 국가간 협력 사업인 「GEF」는 “2001년 4월 중국 환경부장관이 「중국서부 생태복원사업」에 대한 UNEP의 지원을 요청하는 것을 발단으로 UNEP가 유엔 사막화 방지 협약(UNCCD)과 공동으로 중국 임업국(SFA)의 협조 아래 “GEF 최종안”을 작성하여 2002년 12월에 승인을 얻어 본격적으로 추진되었다. GEF 프로젝트는 효과적인 사업 추진을 위하여 산하에 3개의 기술위원회를 설치하여 지역협력체계를 구축, 황사 모니터링 및 조기경보체계 구축, 황사발원지 발생량 저감을 위한 투자전략을 수립하고 집행하는 행정적인 기능을 갖도록 하였다(Han, 2003).

몽골의 사막화는 UNEP, 스위스 등에서 오래 전부터 관심을 가지고 투자와 지원을 하고 있다. 한국 역시 정부(환경부, 산림청, 외교부 등)와 기업, 단체, NGO 등이 사막화 해결을 위한 한·몽 그린벨트 프로젝트 등 조림, 태양광 발전, 지하수 개발 사업 등을 지원하고 있으나, 사업의 지속성, 조직과 사업간 연계가 부족하여 통합관리를 통한 효율의 제고가 필요하다(NIER, 2012b).

국립환경과학원은 국토 면적의 40%가 사막이며, 특히 고비사막 등 몽골 중남부지역의 사막화 되는 수준이 중국보다 심각한 수준인 몽골을 대상으로 국제협력사업을 추진한 바 있다(NIER, 2012b). 최근 몽골의 사막화 현황 및 원인, 사막화 방지를 위한 지구 공학적 접근방법을 제시하고자 기초자료 분석 및 방지사나리오를 개발하였다. 시나리오에 따른 가장 효과적인 방법으로 두 가지가 제안되었으며, 먼저 기상조절기술 및 물관리시스템을 이용한 시나리오는 여름철 몽골 북부에서 인공강우를 하고 확보된 수량을 댐이나 보 등으로 저장해 두어 필요시 지하 인공수로를 이용하여 사막화지역으로 보내는 방법이며, 두 번째 방법은 정책 규제를 통해 정부차원에서 정

확한 가축 수 및 수자원, 국외기금 등을 파악관리하여 무분별한 광산개발 및 목초지 회손을 막는 방법이 제안되었다. 최근 중국의 급격한 자본력, 영향력 팽창은 황사문제와 같은 국제 문제 접근을 더욱 어렵게 할 가능성과 상호협력을 통한 해결책 제시를 가능하게 하는 2가지 측면을 동시에 부여함으로 신중한 접근이 필요하다.

### 5.3 황사피해방지 종합대책 수립

우리나라의 황사는 장거리이동에 의해 한시적으로 봄철에 나타나는 현상에서 점차 연중 계절을 가리지 않고 나타나는 현상으로 바뀌고 있다. 이와 같은 황사의 피해를 체계적으로 대처하기 위하여, 환경부는 2006년 황사피해방지 종합대책을 수립하여 2008년부터 2012년까지 14개 부처가 참여하는 「제1차 황사피해방지 종합대책」을 추진하였다(MOE, 2012).

1차 대책은 주로 모니터링 기반 구축, 사후관리 중심의 피해 최소화, 동북아 협력체계 구축, 피해 사후관리 강화 등에 주안점을 두어 추진되었으며, 추진결과 황사관측망 확충, 황사예보기술력 향상, 황사정보 서비스 개선 등이 이루어진 것으로 평가되고 있다. 그러나 1차 대책을 추진하는 과정에서 한계로 지적된 취약계층(호흡기계 질환자, 피부질환자, 어린이, 노인, 실외근무자 등) 대책, 위해성 관리 대책, 체계적인 실행기반 부족 등이 부족한 점으로 지적되었다. 2차 대책에서는 1차 대책의 부족한 점을 보완하고 실행력 있는 추진을 담보하기 위하여 ‘황사대책위원회’ 위원장을 환경부 장관에서 환경부차관으로 조정하도록 법령(대기환경보전법 제14조)을 개정하는 것을 시작으로, 사전관리 중심의 대책 수립을 목표로 2단계 대책이 수립되어 2013~2017년까지 추진하고 있다(MOE, 2012).

2단계 대책 중 가장 눈에 띄는 부분은 취약계층에 대한 대책이며, 연령, 질환, 장애특성, 직업특성을 고려한 대책이 마련되었다. 또한 국가황사연구단을 확대 개편하여, 분과별 전문가 네트워크를 구성하여 기관별로 수행되는 각종 연구사업 등에 대한 조정기능을 강화토록 하였다. 또한 대기환경보전법 개정을 통해 대기오염 물질에 대한 예측·발표가 가능하도록 관련 규정 개정하여 예보능력을 강화할 수 있는 기반을 마련하였다.

## 6. 요약 및 제언

자연현상으로 알려져 있으나, 동북아시아 지역 국가간 대기오염 현상에 중요한 이슈(Issue)인 황사는 80년대와 90년대 우리나라 대기오염연구의 주된 연구 주제였으며, 90년대 이후 오존, 미세먼지 등의 다양한 대기오염문제가 부각되며 관심이 줄어들었다. 2002년 월드컵을 앞둔 3월, 4월 발생한 강력한 황사는 다시 관심을 유발시켜, 2006년 제1차 황사피해방지종합대책을 수립하게 하였다. 현재는 2차 황사피해방지종합대책이 수립되어 추진 중이며, 기존의 사후 대책에서 벗어나 선제적인 사전대책을 강조하고, 취약층을 보호하기 위한 대책과 건강위해성 대책을 보완하여 추진하고 있다.

본 총설에서는 과거 30년 동안 추진되어온 황사관련 연구의 주요쟁점을 되돌아보았다. 또한 최근 황사 사례의 실시간 분석 사례를 살펴 보았다.

황사는 아직까지 우리나라 대기환경조건 ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ) 수준을 결정하는 아주 중요한 요소의 하나이다. 과거 황사의 연구관점이 주로 농도와 유입경로, 발생원, 예측모델 개발에 주안점을 두었다면 앞으로 황사의 건강 영향 평가, 자연 영향 평가, 이동에 따른 오염물질 전달 매체로서의 역할 등이 조명되어야 할 것이다. 본 연구에서 미약한 부분이지만 수은, PAHs, 중금속 등 유해대기오염물질을 간략하게나마 언급한 것은 그동안 기술적인 제한점, 국내 여건 등에 의해 활발히 추진되지 못하였던 분야를 확인해 보고, 앞으로 과제를 설정하기 위한 것이었다.

바로 이전 황사와 관련된 총설에서 Ghim (2011)은 황사에 대한 국제적인 관심은 많이 줄어들었으나, ACE-asia을 통해 제기되었던 문제들이 해소된 것은 아니라고 지적하고 있다. 아직까지 한중일 장관회의 (TEMM) 의제에 황사가 포함되고 있으며, 근원적인 대책을 당사국인 중국이나 몽골에 맡겨 놓아서는 안 된다는 데에 동북아 국가들은 의견을 같이하고 있다. 국가간, 연구자간에 아직도 황사분야에 있어 아직도 해결되지 않은 분야가 남아 있음을 공감하는 것이다.

최근 대기오염 물질 관측을 위한 측정기술은 위성 기반 기술, 실시간 분석기술, 비파괴분석 기술 등 이루어 헤아릴 수 없는 분야에서 기술이 개발되고 환경 분야에 적용되고 있다. 특히 기후변화를 유발하는

BC (Black Carbon), 혹은 BrC (Brownian Carbon)에 대한 관심이 매우 중요한 연구 이슈화 되고 있는 상황에서 기존 입자상 물질을 대표하는 황사에 대한 연구결과를 종합하고, 이를 기반으로 미래 입자상 물질의 연구방향을 설정하는 것이 필요하다고 생각된다. 단기적으로 한반도 주변에서 자주 나타나는 황사와 최근 겨울, 봄철 고농도 현상에 대한 지속적인 모니터링을 통해 그 발생 원인을 파악하고 대처하는 것이 필요할 것이다.

## References

- Ackerman, S.A. (1989) Using the relative temperature difference at 3.7 and 11  $\mu$ m to tract dust outbreaks. *Remote Sensing of Environment*, 27(2), 129-133.
- Arimoto, R., Y.J. Kim, Y.P. Kim, P.K. Quinn, T.S. Bates, T.L. Anderson, S. Gong, I. Uno, M. Chin, B.J. Huebert, A.D. Clarke, Y. Shinozuka, R.J. Weber, J.R. Anderson, S.A. Guazzotti, R.C. Sullivan, D.A. Sodeman, K.A. Prather, and I.N. Sokolik (2006) Characterization of Asian dust during ACE-Asia, *Global and Planetary Change*, 52, 23-56.
- Berkofsky, L. (1982) A Heuristic Investigation to Evaluate the Feasibility of Developing a Desert Dust Prediction Model. *Mon. Wea. Rev.*, 110, 2055-2062.
- Cho, C.B., Y.S. Chun, B.Y. Ku, S.U. Park, S.S. Lee, and Y.A. Chung (2007) Comparison of ADAM's (Asian Dust Aerosol Model) Results with Observed  $PM_{10}$  Data. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 17(1), 87-99. (in Korean with English abstract)
- Choi, G.H., K.H. Kim, C.H. Kang, and J.H. Lee (2003) The Influence of the Asian Dust on the Metallic Composition of Fine and Coarse Particle Fractions, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 19(1), 45-56. (in Korean with English abstract)
- Chun, Y.S. (1997) Long range transport of yellow sand with special emphasis on the dust rise condition in the source regions. *Dissertation*, Seoul National University.
- Chun, Y.S., J.Y. Kim, J.C. Choi, and D.S. Shin (1999) The Characteristics of the Aerosol Number Concentration Observed in Seoul and Anmyondo During Yellow sand Phenomenon. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 15(5), 575-586. (in Korean with English abstract)
- Chun, Y.S., J.Y. Kim, K.O. Boo, and N.O. Kim (2000) The

- Feature Associated with the yellow Sand Phenomenon Observed in Korea in Wintertime. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 16(5), 487-497. (in Korean with English abstract)
- Chung, K.-Y. and S.U. Park (1995) Characteristic Synoptic Features Associated with the Transport of yellow Sand to Korea. *Korean Meteorological Society*, 31(1), 45-63. (in Korean with English abstract)
- Chung, K.-Y. (1996) Assessment of Long-Range Transport of Atmospheric Pollutants using a Trajectory Model with the Puff Concept, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 12(2), 167-177. (in Korean with English abstract)
- Chung, Y.S. and T.G. Kim (1991) On the Long Range Transport of air pollutants-source and observations of Yellow sand, TSP and Sulfate in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 7(3), 197-202. (in Korean with English abstract)
- Clarke, A.D., Y. Shinozuka, V.N. Kapustin, S. Howell, B. Huebert, S. Doherty, T. Anderson, D. Covert, J. Anderson, X. Hua, K.G. Moore II, C. McNaughton, G. Carmichael, and R. Weber (2004) Size distributions and mixtures of dust and black carbon aerosol in Asian outflow: Physiochemistry and optical properties, *J. Geophys. Res.*, 109, D15S09, doi:10.1029/2003JD004378.
- Du, W., J. Xin, M. Wang, Q. Gao, Z. Li, and Y. Wang (2008) Photometric measurements of spring aerosol optical properties in dust and non-dust periods in China, *Atmospheric Environment*, 42, 7981-7987.
- Eck, T.F., B.N. Holben, O. Dubovik, A. Smirnov, P. Goloub, H.B. Chen, B. Chatenet, L. Gomes, X.-Y. Zhang, H.S. El-Zanan, D.H. Lowenthal, B. Zielinska, J.C. Chow, and N. Kumar (2005) Determination of the organic aerosol mass to organic carbon ratio in IMPROVE samples, *Chemosphere*, 60, 485-496.
- Ellrod, G.P., B.H. Connell, and D.W. Hillger (2003) Improved detection of airborne volcanic ash using multispectral infrared satellite data. *Journal of Geophysical Research*, 108(D12), 4356.
- Ghim, Y.S. (2011) Impacts of Asian Dust on Atmospheric Environment, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 27(3), 255-271. (in Korean with English abstract)
- Gillete, D.A. (1979) Environmental factors affecting dust emission by wind erosion, in *Saharan Dust*, edited by C. Morales, pp. 71-99, John Wiley, Hoboken, N.J.,
- Gillete, D.A., J. Adams, A. Endo, and D. Smith (1980) Threshold velocities for input of soil particles in the air by desert soils, *J. Geophys. Res* 85, 5621-5630.
- Ginoux, P., J.M. Prospero, O. Torres, and M. Chin (2004) Longterm simulation of global dust distribution with the GOCART model: correlation with North Atlantic Oscillation, *Environ. Modelling Software*, 19, 113-128.
- Ha, J.S., J.H. Kim, and H.J. Lee (2006) Sensitivity Analysis of IR Aerosol Detection Algorithm. *Korean Journal of Remote Sensing*, 22(6), 507-518. (in Korean with English abstract)
- Han, J.S. (2003) 20th History of KOSAE, *Korean Society of Atmospheric Environment*, 311-357.
- Han, J.S., S.A. Shin, B.J. Kong, M.S. Park, S.U. Park, and S.J. Kim (2004) Soil Chemical Properties in Asian Dust Source region in Northern China. *Environmental Impact Assessment of Korea*, 13(6), 277-284. (in Korean with English abstract)
- Han, Y., X. Dai, X. Fang, Y. Chen, and F. Kang (2008) Dust aerosols: A possible accelerant for an increasingly arid climate in North China. *J. Arid Environ.*, 72, 1476-1489.
- Hong, S.J., J.H. Kim, and J.S. Ha (2010) Possibility of Applying Infrared Background Threshold Values for Detecting Asian dust in Spring from Geostationary Satellite. *Korea Journal of Remote Sensing*, 26(4), 387-394. (in Korean with English abstract)
- Huebert, B.J., T. Bates, P.B. Russell, G. Shi, Y.J. Kim, K. Kawamura, G. Carmichael, and T. Nakajima (2003) An overview of ACE-Asia: Strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts, *J. Geophys. Res.*, 108(D23), 8633.
- Husar, R. (2003) Local and global dust over North America, 2nd International Workshop on Mineral Dust, September 10-12, Paris, France.
- Kang, J.-Y., S.-W. Kim, and S.-C. Yoon (2012) Estimation of Dust Emission Schemes and Input Parameters in wintertime Asian Dust Simulation: A Case Study Winter Dust event on December 29, 2007. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(1), 1-11. (in Korean with English abstract)
- Kim, D.-H., B.-J. Sohn, T. Nakajima, T. Takamura, T. Take-mura, B.-C. Choi, and S.-C. Yoon (2004) Aerosol optical properties over east Asia determined from ground-based sky radiation measurements, *J. Geophys. Res.*, 109, D02209, doi:10.1029/2003JD003387.
- Kim, D-R., J.-S. Kim, and S.-J. Ban (2010) A Study on the

- Charateristics of Soil in the Asian Dust source regions of mongolia, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 26(6), 606-615. (in Korean with English abstract)
- Kim, J. (2008) Transport routes and source regions of Asian dust observed in Korea during the past 40 years (1965~2004), *Atmospheric Environment*, 42, 4778-4789.
- Kim, J.-H. and H.-G. Yeo (2004) Validation of airborne Fungal spore composition due to the asian dust trajectories, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 20(1), 69-76. (in Korean with English abstract)
- Kim, J., S.-C. Yoon, A. Jefferson, and S.-W. Kim (2006) Aerosol hygroscopic properties during Asian dust, pollution, and biomass burning episodes at Gosan, Korea in April 2001. *Atmospheric Environment*, 40, 1550-1560.
- Kim, K.-H. and M.-Y. Kim (2003) The effect of Asian Dust on particulate matter fractionation in Seoul, Korea during spring 2001, *Chemosphere*, 51, 707-721.
- Kim, K.-H., C.-H. Kang, J.-H. Lee, K.-C. Choi, Y.-H. Youn, and S.M. Hong (2006) Investigation of airborne lead concentrations in relation to Asian Dust events and air mass transport pathways, *J. Aerosol Sci.*, 37, 1809-1825.
- Kim, S.-W., S.-C. Yoon, A. Jefferson, J.A. Ogren, E.G. Dutton, J.-G. Won, Y.S. Ghim, B.I. Lee, and J.S. Han (2005) Aerosol optical, chemical and physical properties at Gosan, Korea during Asian dust and pollution episodes. *Atmospheric Environment*, 39, 39-50.
- Kim, S.-W., S.-C. Yoon, J. Kim, and S.-Y. Kim (2007) Seasonal and monthly variations of columnar aerosol optical properties over Easts Asia determined from multi-year MODIS, LIDAR and AERONET Sun/sky radiometer measurements. *Atmospheric Environment*, 41(8), 1634-1651.
- Kim, S.-W., S. Berthier, J.-C. Raut, P. Chazette, F. Dulac, and S.-C. Yoon (2008) Validation of aerosol and cloud layer structures from the space-borne lidar CALIOP using a ground-based lidar in Seoul, Korea. *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 3705-3720.
- Kim, Y.K., H.W. Lee, Y.S. Moon, and S.K. Song (2001) Long range transport mechanism of Asian dust associated with the synoptic weather system, *Environment Sciences*, 10(s-4), 197-206.
- Kim, Y.-K., S.-K. Song, and J.-E. Gang (2004) Characteristics of Concentration variation and Synoptic conditions by the lasting time of asian dust, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 20(4), 429-578. (in Korean with English abstract)
- KMA (Korea Meteorological Administration, 2011) 2010 Annual report of Asian dust. (in Korean)
- KMA (2012) 2011 Annual report of Asian dust. (in Korean)
- Knuteson, R.O., W.L. Smith, S.A. Ackerman, H.E. Revercomb, H.M. Woolf, and H. Howell (1994) Atmospheric Emitted Radiance Interferometer (AERI) data analysis method,
- Koo, B., E.-H. Lee, Y. Chun, S.-U. Park, M.-S. Park, and J.-C. Nam (2005) Introduction of Asian Dust (AD) storm Source in China and The status of installation and operation of AD Monitoring Tower in China. *Proceeding of the Spring Meeting of KMS*, 304-305. (in Korean)
- Kurosaki, Y. and M. mikami (2004) Effect of snow cover on threshold wind velocity of dust outbreak. *Geophysical Research Letter*, 31, L03106.
- Kwon, Y.-I., S.-G. Lee, K.H. Kim, J.-B. Shin, and K.-M. Yu (2004) Geochemical characteristics of the surface sediments from the middle-to-eastern Taklimakan desert, China. *Journal of Geological of Korea*, 40(4), 383-393. (in Korean with English abstract)
- Lee, B.I., S.C. Yoon, and Y.J. Kim (2008) Analysis of Vertical profile and Optical Characteristic of the Asian Dust Using Ground-based Measurements. *Korean Meteorological Society*, 18(4), 287-297. (in Korean with English abstract)
- Lee, B.I., E.H. Shon, M.L. Ou, and Y.-J. Kim (2009) Infrared spectral signitures of dust by ground-based FT-IR and space AIRS, *Journal of Korean Meteorological Society*, 19(4), 319-329. (in Korean with English abstract)
- Lee, E.-H., S.-B. Kim, J.-C. Ha, and Y.-S. Chun (2012) Performance Analysis of Simulation of Asian Dust Observed in 2010 by the all-Season Dust Forecasting Model, UM-ADAM2, *Journal of Korean Meteorological Society*, 23(2), 245-257. (in Korean with English abstract)
- Lee, H.S. and B.W. Kang (2001) Chemical characteristics of principal PM<sub>2.5</sub> species in Chongju, South Korea, *Atmospheric Environment*, 35(4), 739-746.
- Lee, K.H., Z. Li, M.S. Wong, J. Xin, Y. Wang, W.-M. Hao, and F. Zhao (2007) Aerosol single scattering albedo estimated across China from a combination of ground and satellite measurements, *J. Geophys. Res.*, 112, D22S15, doi:10.1029/2007JD009077.
- Lee, K.Y., Y.Y. Yoon, S.Y. Cho, K.S. Koh, and Y. Kim (2008)

- Natural Radioactivity of surface sediments by source regions of the asian dust, *Journal of Analytical Science & Technology*, 20(6), 474-479.
- Lee, J.-K., Y.-H. Kim, and J.-S. Kim (1993) The case study of asian dust storm occurred during 1 to 3 April. 1993. Annual Report for National Institute Meteorological Research, 10(1), 51-73. (in Korean)
- Lee, M.H., E.J. Han, and Y.S. Won (1986) Yellow Sand Phenomena Influence to the Atmosphere in Korea. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 2(3), 34-44. (in Korean with English abstract)
- Lee, M.H., E.J. Han, C.K. Shin, and J.S. Han (1988) A Study on the Size Distribution and Chemical Component of Suspended I Particulate during the Period of Sandy Dust Phenomena. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 4(2), 57-67. (in Korean with English abstract)
- Lee, M.H., J.S. Han, E.J. Han, and C.K. Shin (1989) A Study on the Chemical Composition of Precipitation during the Period of Study Dust Phenomena, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 5(2), 1-11. (in Korean with English abstract)
- Lee, M.H., E.J. Han, C.K. Shin, J.S. Han, and S.K. Kim (1993) Behaviors of Inorganic Components in Atmospheric Aerosols on the Yellow Sand Phenomena. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 9(3), 230-235. (in Korean with English abstract)
- Lee, Y.-N., R. Weber, Y. Ma, D. Orsini, K. Maxwell-Meier, D. Blake, S. Meinardi, G. Sachse, C. Harward, T.-Y. Chen, D. Thornton, F.-H. Tu, and A. Bandy (2003) airborne measurement of inorganic ionic components of fine aerosol particles using the particle into liquid sampler coupled to ion chromatography technique during ACE-Asia and TRACE-P, *J. Geophys. Res.*, 108(D23), 8646, doi:10.1029/2002JD003265.
- Lee, Y.S., J.-W. Cha, Y.-K. Kim, H.-W. Lee, J.K. Park, B.I. Jeon, C.B. Cho, and H.-S. Chung (2006) Seasonal aerosol optical properties at Anmyon-do global atmosphere watch observatory, Korea. *Journal of Korean Meteorology Society*, 42(5), 265-275. (in Korean with English abstract)
- Lee, Y.S. (2009) In situ measurement of Asian dust aerosols off the California coast: optical closure. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 45(3), 293-305.
- Liu, W. and P.K. Hopke (2003) Origins of fine aerosol mass in the western United States using positive matrix factorization, *J. Geophys. Res.*, 108(D23).
- Lu, H. and Y. Shao (1999) A new model for dust emission by saltation bombardment, *J. Geophys.*, 104, 16827-16842.
- Ma, C.J., M. Kasahara, R. Hooller, and T. Kamiya (2001) Characteristics of single particles sampled in Japan during the Asian dust-storm period, *Atmospheric Environment*, 35(15), 2707-2714.
- Marticorena, B. and G. Bergametti (1995) Modeling the atmospheric dust cycle: I. Design of a soil-derived dust emission scheme. *J. Geophys. Res.*, 100, 16, 415-16, 430.
- Matthias-Maser, S. and R. Jaenike (1995) Size distribution of Primary biological particles with radii  $>0.2 \mu\text{m}$  in the urban/rural influenced region. *J. Atmos. Res.*, 39, 279-286.
- Ministry of Environment in Korea (2012) The Master plan for asian dust storm damage prevention [2013-2017], (in Korean)
- Moon, Y.-S. and S.-H. Lee (2009) Estimation of Hourly Emission Flux of Asian Dust using Empirical Formulas in the source area. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 25(6), 539-549. (in Korean with English abstract)
- Moon, Y.S. (2010) Estimation of Concentration of Asian Dust and Ozone Using WRF-CMAQ (MADRID), Proceeding of the 50th Meeting of KOSAE (2010), (in Korean)
- Mori, I., M. Nishikawa, T. Tanimura, and H. Quan (2003) Change in size distribution and chemical composition of kosa (Asian dust) aerosol during long-range transport, *atmospheric Environment*, 37, 4253-4263.
- Murayama, T., N. Sugimoto, I. Uno, K. Kinoshita, K. Aoki, N. Hagiwara, Z. LiuIchiro, M. Tetsu, S. Takashi, Shibata Kimio Arao, B.-J. Sohn, J.-G. Won, S.-C. Yoon, T. Li, J. Zhou, H. Hu, Makoto Abo, K. Iokibe, R. Koga, and Y. Iwasaka (2001) Ground-based network observation of Asian dust events of April 1998 in east Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(16), 18345-18359.
- Nakajima, T., S.-C. Yoon, V. Ramanathan, G.-Y. Shi, T. Take-mura, A. Higurashi, T. Takamura, K. Aoki, B.-J. Sohn, S.-W. Kim, H. Tsuruta, N. Sugimoto, A. Shimizu, H. Tanimoto, Y. Sawa, N.-H. Lin, C.-T. Lee, D. Goto, and N. Schutgens (2007) 2005 and a study of the aerosol direct radiative forcing in east Asia. *Journal of Geophysical Research*, 112(24).
- Nakajima, T. and S.C. Yoon (2005) Implementation Plan for ABC Gosan Campaign: East Asian Regional Experiment 2005, Meteorological Research Institute, KMA,

- March 2005.
- NIER (National Institute of Environmental Research, 2007) Emission Mechanism of Asian Dust in Source Regions and Its Characteristics by Transport Routes (I), Report from Hankuk University of Foreign Studies.
- NIER (2008) Emission Mechanism of Asian Dust in Source Regions and Its Characteristics by Transport Routes (II), Report from Hankuk University of Foreign Studies.
- NIER (2009) Emission Mechanism of Asian Dust in Source Regions and Its Characteristics by Transport Routes (III), Report from Hankuk University of Foreign Studies. (in Korean)
- NIER (2010) Yellow sand occurrence case analysis source book (2009).
- NIER (2011) 2010 The Annual Report for Operating Result of Air pollution Intensive Monitoring stations.
- NIER (2012a) 2011 The Annual Report for Operating Result of Air pollution Intensive Monitoring stations.
- NIER (2012b) Strategy study on the fundamental prevention of the asian dust -Focused on developing asian dust prevention scenario.
- Park, C.K., S.M. Eo, W.J. Ki, K.H. Kim, and S.Y. Mo (2001a) The Influence of Yellow Sand Phenomena on the Concentration Variation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Ambient Air of Seoul. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 17(2), 179-192. (in Korean with English abstract)
- Park, C.-U., S.-K. Ha, S.-O. Hur, H.-Y. Weon, Y.-S. Zhang, Y.-H. Kim, and K.-H. Jung (2008) Physico-chemical Characteristics of Asian dust, NAAS, Report, 1038-1055.
- Park, J.H. (1984) Analysis and application of Fourier transform spectroscopy in atmospheric remote sensing, *Appl. Opt.*, 23, 2604-2613.
- Park, J.S., J.H. Kim, and S.J. Hong (2012) Detection of Yellow Sand Dust over Northeast Asia using Background Brightness Temperature Difference of Infrared Channels from MODIS. *Journal of Korean Meteorological Society*, 22(2), 137-147. (in Korean with English abstract)
- Park, M.H., Y.P. Kim, and C.-H. Kang (2001b) Aerosol composition change due to Yellow Dust: springtime measurement data between 1993 and 1996 at Kosan, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 17, 487-492. (in Korean with English abstract)
- Park, S.M., K.J. Moon, J.S. Sung, H.J. Kim, J.Y. Ahn and J.S. Kim (2012) Chemical Characteristics of Ambient Aerosol during Asian Dust and High PM Episodes at Seoul Intensive Monitoring Site in 2009. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(3), 282-293. (in Korean with English abstract)
- Park, S.U. (2002) Physical and chemical processes of yellow sand deflection, transport and transformation in East Asia, National Research Foundation of Korea, 61pp
- Park, S.U. and H.J. In (2003) Parameterization of dust emission for the simulation of the yellow sand (Asian dust) event observed in March 2002 in Korea. *J. Geophys. Res.*, 108, ACH 9-1-ACH 9-21.
- Park, S.U. and E.H. Lee (2004) Parameterization of Asian dust particle size distribution for use in dust emission model, *Atmospheric Environment*, 38, 2155-2162.
- Park, S.U., A. Choe, E.-H. Lee, M.-S. Park, and X. Song (2010) The Asian Dust Aerosol Model2 (ADAM2) with the use of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) obtained from the Spot4/Vegetation data, *Theor. Appl. Climatology*, doi:10.1007/s00704-009-0244-4.
- Prata, A.J. (1989) Observations of volcanic ash clouds in the 10 ~ 12  $\mu\text{m}$  window using AVHRR/2 data. *International Journal of Remote Sensing*, 10(4-5), 751-761.
- Shao, Y. (2004) simplification of a dust emission scheme and comparison with data. *J. Geophys. Res.*, 109, p.D 10202.
- Shin, S.A., J.S. Han, Y.D. Hong, and S.D. Kim (2006) Source Apportionment and the Origin of Asian Dust Observed in Korea by Receptor Modeling (CMB), *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 22(2), 157-166. (in Korean with English abstract)
- Stoke, G.M. and S.E. Schwartz (1994) A The Atmospheric Radiation Measurement (ARM) program: A Programmatic background and design of cloud and radiation test bed. *A Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 75, 1201-1211.
- Streets, D.G., F. Yan, M. Chin, T. Diehl, N. Mahowald, M. Schultz, M. Wild, Y. Wu, and C. Yu (2009) Anthropogenic and natural contributions to regional trends in aerosol optical depth, 1980-2006, *J. Geophys. Res.*, 114, D00D18, doi:10.1029/2008JD011624.
- Sun, 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.
- Tegen, I. and I. Fung (1996) The influence on climate forcing of mineral aerosols from disturbed soils. *Nature*, 380, 419-422.
- Uno, I.H. Amano, S. Emori, K. Kinoshita, I. Matsui, and N.

- Sugimoto (2001) Trans-Pacific yellow sand transport observed in April 1998: a numerical simulation. *J. Geophys. Res.*, 106(D16), 18331-18344.
- Uno, I., G.R. Carmichael, D.G. Streets, Y. Tang, J.J. Yienger, S. Satake, Z. Wang, J.-H. Woo, S. Guttikunda, M. Uematsu, K. Matsumoto, H. Tanimoto, K. Yoshioka, and T. Iida (2003) Regional chemical weather forecasting system CFORS: Model descriptions and analysis of surface observations at Japanese island stations during the ACE-Asia experiment, *Journal of Geophysical Research*, 108(D23), 8668, doi:10.1029/2002JD002845.
- Westphal, D.L., O.B. Toon, and T.N. Carlson (1987) A two-dimensional investigation of the dynamics and microphysics of Saharan dust storms. *Journal of Geophysical Research*, 92, 2027-3049.
- Westphal, D.L., O.B. Toon, and T.N. Carlson (1988) A case study of mobilization and transport of Saharan dust. *Journal of Atmospheric Science*, 45, 2145-2175.
- Wu, W.S. and T. Wang (2007) On the performance of a semi-continuous PM<sub>2.5</sub> Sulfate and Nitrate instrument under high loadings of particle and sulphur dioxide, *Atmospheric Environment*, 41(26), 5442-5451.
- Xuan, J. and I.N. Sokolik, (2002) Characterization of sources and emission rates of mineral dust in Northern China, *Atmospheric Environment*, 36(4), 863-876.
- Yanca, C.A., C.B. Douglas, A.P. Krag, P.N. Michael, and A.C. John (2006) Validation of Three new methods for determination of metal emissions using a modified environmental protection agency methods 301, *Air & Waste Management Association*, 56, 1733-1742.
- Yeo, H.G. and J.H. Kim (2002) SPM and Fungal Spores in the Ambient Air of West Korea During The Yellow Sands (Asian Dust Storm) Period, *Atmospheric Environment*, 36, 5437-5442.
- Yoon, S.-C. and K.-S. Park (1991) Isentropic analysis for the long range trajectories of yellow sands, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 7(2), 95-98. (in Korean with English abstract)
- Yoon, S.-C., J.-G. Won, A.H. Omar, S.W. Kim, and B.-J. Sohn (2005) Estimation of the radiative forcing by key aerosol types in worldwide locations using a column model and AERONET data. *Atmospheric Environment*, 39, 6620-6630.
- Yoon, S.-C., Y.-J. Lee, S.-W. Kim, M.-H. Kim, and N. Sugimoto (2010) Measurements of the Lidar ratio for Asian dust and pollution aerosols with a combined raman and back-scatter lidar, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 20(4), 387-530. (in Korean with English abstract)
- Yu, X., T. Chen, J. Chen, and Y. Liu (2006) A comparison of dust properties between China continent and Korea, Japan in East Asia. *Atmospheric Environment*, 40, 5787-5797.
- Zhang, X., R. Arimoto, Z. An, T. Chen, G. Zhang, G. Zhu, and X. Wang (1993) Atmospheric trace elements over sources and atmospheric deposition on the Loess plateau, *Atmospheric Environment, Part A*, 27A(13), 2051-2067.
- Zhang, D. and Y. Iwasaka (1999) Nitrate and sulfate in individual Asian dust-storm particles in Beijing, China in spring of 1995 and 1996, *Atmospheric Environment*, 33, 3213-3223.
- Zhang, D., J. Zang, G. Shi, Y. Iwasaka, A. Matsuki, and D. Trochkin (2003) Mixture state of individual Asian dust particles at a coastal site of Qingdao, China, *Atmospheric Environment*, 37, 3895-3901.
- Zhang, Y.-S., Y.-H. Kim, Y.-K. Son, G.-J. Lee, M.-S. Kim, S.-K. Kim, H.-Y. Weon, J.-H. Jo, Eom, S.-H. Kim, H.-K. Kwak, and H.-M. Kim (2005) Pedological characteristics of Asian dust in Korea, *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 38(6), 301-306.