

만주에서 발원한 황사현상 (II) -2001년 이후 사례를 중심으로-

김수민* · 전영신 · 김승범
국립기상연구소 황사연구과

(접수일 : 2010년 5월 7일, 수정일 : 2010년 7월 6일, 게재확정일 : 2010년 8월 3일)

The Features of Asian Dust Events Originated in Manchuria

Sumin Kim*, Youngsin Chun, and Seung-Bum Kim

Asian Dust Research Laboratory / National Institute of Meteorological Research

(Received : 7 May 2010, Revised : 6 July 2010, Accepted : 3 August 2010)

Abstract : The northeast part of China(hereafter Manchuria) is one of Asian dust source regions along with Gobi, Inner Mongolia and Loess Plateau. In this study, a geographical survey over the area was carried out to determine its soil characteristics in June 2009. It revealed that some parts of the area, especially near Keerchin desert, consist of alkali clay soil mixed up with sand. Manchuria, where is a vast cornfield, can be a potential source region of Asian dust from fall to following spring after harvesting. The frequency of Asian dust over the region from 1996 to 2009 was examined using 3-hourly GTS SYNOP data and it showed that the occurrence of Asian dust over the region is high in the springtime. It was also revealed that snow cover is the key parameter affecting on the frequency through the analysis of NCEP reanalysis data. To scrutinize the path and structure of Asian dust from Manchuria, the event on 3~4 April 2008 and 25 January 2010 were intensively investigated with regard to features of synoptic weather patterns, satellite imagery, airstream, naked eye-observations, concentrations of PM10, 2.5 and 1.0. For this case, the Asian dust from the area reached to Korea less than a day. However, the duration time of the dust in Korea was short (< 7 hours). The average of hourly PM10 reached up to $340 \mu\text{g}/\text{m}^3$ at Baengnyeondo during the period. The high PM2.5 and PM1.0 concentrations were also observed at several sites in Korea, indicating that air pollutants could be transported along with the dust.

Key words: Hwangsa, dust occurrence, PM10 concentration, keoeolchin sandy land, keerqin desert

1. 서 론

황사의 주요 발원지는 타클라마칸 사막, 고비 사막, 중국 북부, 황토고원으로 알려져 있다. 1990년대에는 이 지역들에서의 황사의 기상학적 특징에 관한 연구가 활발히 수행되었는데, 저기압에 동반된 한랭전선 후면에 강풍이 불 때(윤용황, 1990; 정용승과 김태근, 1991), 한랭한 고기압 전면에서 지상에 강풍대가 형성

될 때(정관영과 박순용, 1994) 이들 지역에서 황사가 발원하여 한반도로 유입됨을 밝힌 바 있다. 한편, 중국의 북동쪽에 위치한 만주에 서고동저의 기압배치로 형성되는 강풍대가 자리 잡을 때 황사가 발원하여 북풍계열의 바람에 의해 우리나라로 수송됨을 보여 만주가 우리나라에 영향을 주는 황사 발원지임을 최초로 밝힌 연구도 있다(전영신 등, 2003). 이후 중국과 몽골의 기상관측소에서 관측한 발원횟수를 GTS(Global Telecommunication system) 기상전문으로 1993~2004년(Lim and Chun, 2006)과 1996~2007년(이종재와 김철희, 2008) 등 각각 10년 이상의 기간 동안 통계 분석하여, 2001년 이후 황사가 고비사막과 만주 지역에

*Corresponding Author: Sumin Kim, Asian Dust Research Laboratory/National Institute of Meteorological Research, 45 Gisangcheong-gil, Dongjak-gu, Seoul 156-720
Phone : +82-2-6712-0404, Fax : +82-2-849-0668
E-mail : sulla@korea.kr

서 집중적으로 발원하는 것을 밝혔다. 또, 1965~2004년의 40년 동안 우리나라에서 관측한 황사일수와 발원지의 기후조건을 분석한 연구에서도 이와 비슷한 결과를 보였다(Kim, 2008).

이와 같이 만주는 우리나라에 영향을 주는 황사의 주요 발원지로 발원빈도가 점차 증가하고 있다. 또한, 이 지역에서는 일반적인 황사 외에도 특수한 형태의 알칼리성 먼지폭풍 현상이 보고된 바 있고(Ku et al., 2003), 거리상 우리나라와 인접하기 때문에 황사예측이 어려워 이 지역 황사의 특성에 관한 연구가 절실한 실정이다.

본 연구에서는 전영신 등(2003)에 이어서 2001년 이후 만주에서 발생하는 황사의 특징을 조사하기 위해 이 지역을 직접 답사하였다. 또한, 만주에 위치한 기상관측소 중 통랴오(通遼), 스펡(西平), 셴양(瀋陽) 세 곳을 골라 1996년부터 2008년까지 각 관측소에서 관측한 황사 발원 횟수를 분석하여 황사 발원 빈도 변동의 특징을 조사하였다. 더불어, 적설, 풍속, 강수 등의 기상자료도 함께 비교하여 이 지역 황사와 기후인자간의 관계를 조사하였다. 또, 2001년부터 2010년 1월까지 만주에서 관측된 황사 사례를 정리하고, 2008년 4월 3~4일과 2010년 1월 25일의 사례를 집중분석하여 종관기압계 특성, 위성영상으로 본 황사의 수평분포, 기류의 이동경로, 황사 때 입자 질량 농도, 입자크기별 이온성분 분포 등 만주에서 발원한 황사의 특징을 종합적으로 분석하였다.

2. 황사 발원지 특성 및 발원 경향

2.1 황사 발원지 답사

만주는 중국의 북동쪽에 위치하여 행정구역으로는 동북3성(길림성, 요녕성, 흑룡강성)으로 나뉘며, 새로운 황사발원지로서 중요하기도 하지만 고구려와 발해를 일으켰던 우리 옛 선조들의 터전으로 역사의 의미가 깊은 곳이기도하다(Fig. 1). 이 곳 기후는 반건조/아습윤 특성을 띠어 강수량보다 증발량이 더 많으며(Table 1), 풍속은 연평균 4m/sec 이상으로 강한데, 특히 봄에는 바람이 많이 불고 건조한 현상(일명, 건조한 봄 - Spring aridity)이 나타나기도 한다. 그런데 1900년대 초에 “인구 이주 금지 정책”이 풀리면서 만주에 인구가 급격히 증가하여 1950년에는 약 43백만 명에 이르렀다가 2004년에는 약 118백만 명 이상으로 증가하였고 이에 따라 목초지와 습지 등의 면적이 감소하였는데, 이것이 결국 토지의 사막화를 가속화시킨 인위적 요인이 되었다(Li et al., 2008).

이러한 변화를 겪고 있는 만주의 현지 답사는 황사 문제를 국제적으로 대응하기 위해 환경부에서 2008년도에 설립한 「韓·中·日 황사 공동연구단 실무그룹(I)」을 통해 수행되었으며, 2009년 6월 14일~17일까지 4일 동안, 15명이 참가하였다. 이 중 한국인은 국립기상연구소 황사연구과 3명, 국립환경과학원 대

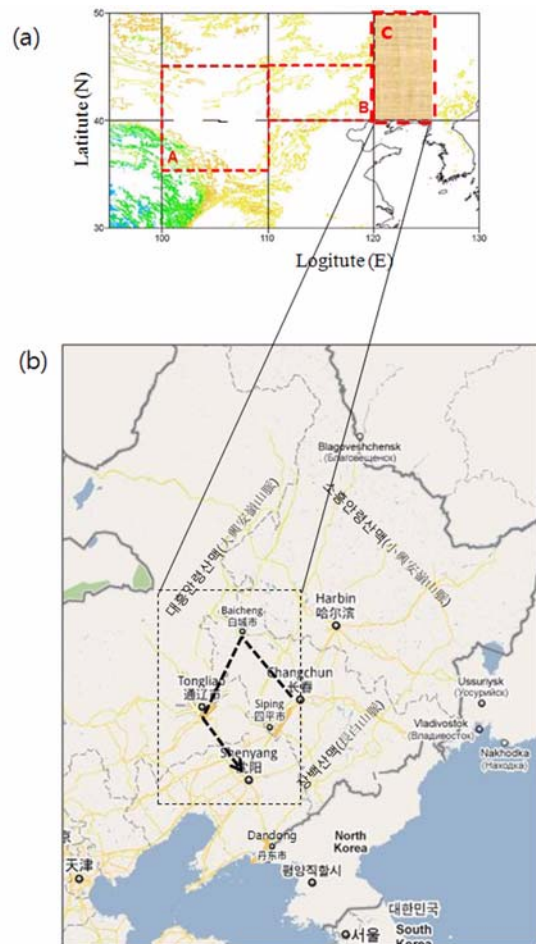


Fig. 1. Map of dust source area. (a) Dust source area. A, B and C represents the Gobi, Neimunggu and Manchuria(Lim and Chun, 2003) and (b) Survey route(Google map).

Table 1. The comparison of meteorological data between Dongbei plain and Seoul

	Manchuria*	Seoul**
The average annual precipitation	400~500 mm	1,344 mm
The average annual evaporation	1600~2000 mm	1094 mm
The average annual relative humidity	40~65%	67%

*Li et al., 2008

**Climatological Normals of Korea(KMA, 2001)

립(I)」을 통해 수행되었으며, 2009년 6월 14일~17일까지 4일 동안, 15명이 참가하였다. 이 중 한국인은 국립기상연구소 황사연구과 3명, 국립환경과학원 대

기환경연구과 1명, 고려대학교 지구환경과학과 4명 등 8명, 중국인은 환경부 산하 중국환경감측총참(China National Environmental Monitoring Center) 3명과 지역 환경 관측참(랴오닝, 셴양, 바이칭, 지린) 7명이었다. 답사는 지린성 창춘에서 출발하여 바이칭, 네이멍구 퉁랴오, 나이만을 거쳐 랴오닝성 셴양으로 차량으로 이동하면서 한·중팀이 합의하여 정착한 곳의 토양을 조사하는 방식으로 이루어졌다. 답사지역은 세가지의 대표적인 황사발원지(Lim and Chun (2006)) 중에서 고비사막과 내몽골을 제외한 만주(40~ 50°N, 120~125°E) 지역이었다. 답사지점의 상세한 정보는 Fig. 1과 Table 2에 정리하였다.

창춘에서 바이칭으로 이동하는 동안 볼 수 있는 너른 평원에는 옥수수 밭이 펼쳐져 있었다. 답사시되었던 6월 중순 경에는 옥수수가 약 30~50 cm 높이로 자라있었고 초원이 드넓게 펼쳐져 있어서 어디를 보든지 끝없이 이어지는 평원이었다. 만주의 옥수수밭이나 논 주변에는 방풍림이 조성되어 바람도 막아주고 바람에 날리는 토양의 손실을 막는 역할도 하였다. 한편, 바이칭에서 퉁랴오로 이동하면서 본 초원과 통유(通榆) 부근에서는 토양의 색깔이 백색에 가까웠고, 육안으로 볼 때 입자가 밀가루처럼 매우 고운 점토질이었으며, 손으로 문질렀을 때 부드러운데 토양은 짠 맛이 나고, 토양에 물을 부었을 때 천천히 스며들었으며 젖은 뒤 촉감과 점성이 진흙과 같이 변하였다. 바이칭에서 남쪽으로 내려와 태평천 부근으로 갈수록 토양의 색은 백색에서 황색으로 변하였고, 통유 부근의 백색 점토질과 비교하였을 때 토양알갱이가 맨눈으로 구분할 수 있을 만큼 컸다. 지린 성과 인접한 네이멍구 전가점 부근의 토양은 옥수수밭이 아닌 논 경작지도 매우 드물게 찾아 볼 수 있었다. 퉁랴오에서 남쪽으로 115 km 떨어진 커얼친(科爾沁, Keerqin 또는 Keoelchin) 사지는 광활한 모래땅이었다. 차가 들어

올 수 있는 비포장도로 주변은 낮은 구릉과 자연적으로 자라난 키 작은 초목이 있었고, 초목이 없는 곳은 옥수수대를 1 m × 1 m의 바둑판 무늬로 심어 모래가 날리지 않도록 하였으나, 옥수수대는 모두 말라있었다. 차량이 접근하기 힘든 곳은 식생이 거의 없는 모래언덕이었다.

만주가 계절에 따라 달라지는 식생의 변화를 표현하기 위해 퉁랴오와 나이만 지역의 답사 당시 사진을 계절별로 모아 보았다(Fig. 2). 봄에는 건조한 토양 위에 옥수수 뿌리의 흔적만 남아 있어서 바람만 불면 언제든 날릴 수 있는 조건을 갖고 있다. 그리고 5월 말에는 옥수수의 씨앗을 뿌려 풀이 수십 센티미터의 높이로 일정하게 자라고 있다. 또한 여름에는 옥수수가 빠르게 자라나서 늦여름에서 초가을 사이 옥수수의 키가 약 2 m가 될 만큼 높이 자라 있다. 늦가을에 추수하면 이 곳 토지는 다시 맨 모래땅이 드러난다. 겨울에는 옥수수 뿌리를 땀감으로 사용하며, 10월 이후부터 5월 초까지 이곳 토양은 맨땅으로 남아 있게 된다. 바로 이 시기가 드넓은 만주가 황사의 발원지로 역할을 하는 때가 된다.

2.2. 만주의 황사발원과 기후의 연관성

만주에서 황사가 발원한 횡수를 조사하기 위하여 이 지역의 퉁랴오, 스펡, 셴양 세 곳을 골라 이 곳 기상관측소의 1996~2009년 동안 황사 관측 자료를 월 자료로 정리하였다(Fig. 3(a)). 황사 관측 자료는 WMO의 기상관측소들이 자료를 매 3시간마다 공유하기 위해 사용하는 전지구통신체계(GTS; Global Telecommunication system) 기상전문을 사용하였다. GTS 기상전문 중 황사에 관련된 전문은 황사의 발원과 강도 등에 따라 현재일기 ww = 07, 08, 09, 30~35, 98으로 분류되는데, 여기서는 먼지나 모래가 바람에 의해 뜨는 현상에 해당하는 07의 횡수를 정리하였다. 봄(3~5월)에 관측된

Table 2. The information of survey site

	Prefectures	Latitude(°N) Logitude(°E)	Soil features
Jilin Prov.	Grassland, outside Baichung	45° 16' 20" 122° 48' 44"	White clay, salty taste
	Near Tongyu	44° 30' 47" 123° 08' 34"	
	Near Taipingchuan	44° 20' 30" 123° 14' 16"	Light yellow, visible grain
	Near Jinbaotun	43° 43' 45" 122° 32' 13"	Dark yellow, visible grain
Neimongu	Tongliao	43° 37' 36" 122° 15' 35"	Sand
	Keerchin desert	43° 10' 12" 122° 37' 48"	



Fig. 2. The view of cornfield in Manchuria. (a) spring (March 2003), (b)summer(June 2009), (c) late summer(August 2005) and (d) late fall (November 2008).

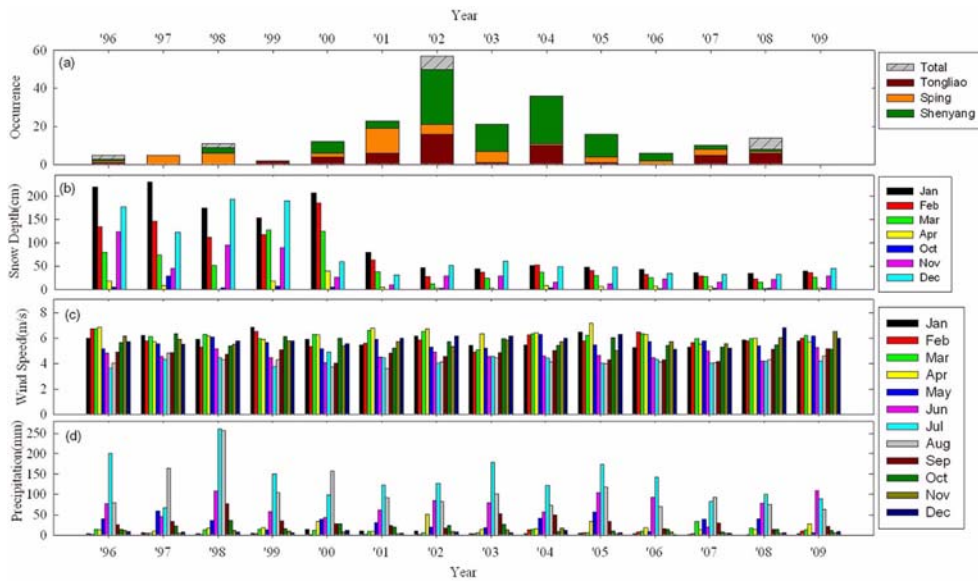


Fig. 3. Frequency of blowing sand events and monthly meteorological data from 1996 to 2009. (a) Event frequency, (b) snow depth, (c) wind speed and (d) precipitation.

횟수를 막대그래프로 표현하였고, 세 곳 관측소에서 1년 동안 관측된 횟수는 그늘칠로 표현하였다(Fig. 3(a)). 이곳에서 발원하는 황사는 대부분 봄에 집중되어 있으며, 2000년 이후 황사의 발원횟수가 급격히 증가하여 2002년에는 봄 50회, 연중 57회로 관측되었다(Fig. 3(a)). 이후 발원횟수는 차츰 감소하여 2006년 봄

에 6회(연중 6회), 2007년 봄에 9회(연중 10회), 2008년도 봄에 7회(연중 14회)로 관측되었다. 그러나 2009년도에는 만주에서 발원한 황사가 우리나라에 세 번 영향을 주었음에도(기상청, 2010) 세 곳 기상관측소에서는 발원 관측 기록이 없는 것으로 조사되었다. 2009년에 만주에서 황사가 발원한 위치를 MTSAT-1R 위

성영상으로 확인해 보면 통라오의 서쪽(3월 14일, 10월 20~21일 사례)과 북쪽(5월 13일 사례)에서 발원되었다(기상청, 2010). 이러한 최근의 자료는 만주에서의 발원이 봄 이외의 계절에도 증가하고, 발원 영역이 확대되었을 가능성을 보여준다.

만주의 발원에 영향을 주는 요인에는 앞에서 언급한 사막화, 인구증가, 기후조건 등이 있으며, 여기서는 1996년부터 2009년까지 14년간의 황사 발원 횟수와 기후자료와의 관계를 살펴보고자 한다. 기후자료는 NCEP-DOE¹⁾ AMIP-II(Atmospheric Model Intercomparison Project) 재분석 자료(Kanamitsu, 2002) 중 40~50°N, 120~125°E 지역의 적설량(cm), 강수(mm), 풍속(m/sec) 값을 사용하였다. 적설량과 강수는 일평균 값을 월 누적 값으로 계산하였고(일평균 × 일수), 풍속 값은 6시간 자료를 월평균 값으로 계산하여 사용하였다 (<http://nomad1.ncep.noaa.gov/pub/reanalysis-2/month/flx/>).

만주에는 눈이 매 해 1~3, 11~12월에 내렸으며 주로 2000년까지는 적설량이 200 cm를 넘었으나, 이후 100 cm 이하로 급격히 줄었다. 이와 함께 황사 발원 횟수 또한 2000년 이후 늘어나서 적설량이 많을수록 황사발원 횟수가 감소한다는 연구와도 일치하였다(Kurosaki and Mikami, 2004). 이 연구에서 몽골, 중국 황토고원과 만주의 황사발원 횟수에 풍속과 적설량이 미치는 영향을 분석하였는데, 풍속이 강할수록 발원횟수가 증가하고, 일정한 강풍 값에 대하여 적설량이 클수록 발원횟수가 적었다. 또, 1960~2008년 동안 우리나라의 황사출현일수와 북극진동지수, 남극진동지수, 유라시아 대륙의 적설면적의 관계를 분석하여, 두 진동지수가 양의 값이고, 봄철 유라시아대륙의 적설면적이 감소하면 황사가 많이 발생함을 보인 연구도 있다(김선영과 이승호, 2009). 북극진동지수는 북극에서 20°N 영역의 월평균 해면기압 편차에 의한 주 성분 분석의 첫 번째 모드의 시계열을 나타내고, 남극진동지수는 남극에서 20°S 영역의 월평균 700 hPa 고도의 경험적 직교함수의 첫 번째 모드의 진폭을 나타내며, 이들 값이 양일 때 시베리아 고기압의 강도가 약해지며, 이는 곧 황사출현일수가 늘어남을 뜻한다.

풍속은 황사발원과 강도에 직접 영향을 주는 중요한 요인으로, 중국 북부와 내몽골에서 1968~1996년의 3, 4월 장기간 평균 풍속보다 2000~2002년의 평균 풍속이 더 강해져 2000년 이후 봄철 황사가 자주 발생하는 한 요인으로 보았다(Kim, 2008). 만주의 지난 14년간 월평균 풍속을 보면 매 해 3~5월의 평균풍속이 다른 월에 비해 높아 봄철 황사발원에 영향을 주는 중요한 요인이라 볼 수 있다. (Fig. 3(c)).

만주에서 강수는 매 해 7, 8월에 집중되었는데(Fig. 3(d)) 가장 많게는 2002년 7월에 약 180 mm까지 내렸으나, 2007년부터는 여름철 강수량이 100 mm 이하

로 감소하였다. 강수량이 감소하면 땅이 가물어 여름 이후 식생이 잘 자라지 못하는 환경이 되고, 바람이 불면 발원하기에 좋은 조건이 형성된다. 따라서 여름철 강수는 가을, 겨울의 발원횟수와 관련이 깊을 것으로 보이며 2002년과 2008년의 가을, 겨울에 있었던 황사발원은 여름철 강수가 적었던 점이 적설량과 함께 영향을 받았을 것으로 보인다.

2.3. 만주에서 발원한 황사사례 연구

만주에서 관측한 1900년대 초의 황사현상은 조선총독부 인천관측소의 소장인 와다유우지가 작성한 「조선고대관측기록조사보고」에 기록되어있다. 그 내용을 보면, 중국 요녕성과 길림성 등에서 황사가 관측되었고 1905년부터 1915년 사이에 황사현상이 모두 33일이며 대부분 4, 5월에 많이 관측되었다(전영신 등, 2003).

우리나라에서 관측된 황사현상 중 만주에서 발원한 기록을 보면 1983년부터 1993년 사이에 관측된 20회 황사사례 중 1993년 4월 7일 사례가 있고(정관영과 박순웅, 1995), 1994년부터 2000년 사이에는 1997년 3월, 1999년 2월, 2000년 3월의 세 차례 기록이 조사된 바 있다(전영신 등, 2003).

여기서는 2001년부터 2010년 1월까지 만주에서 발원한 황사 사례를 이동경로, PM10 시간평균값의 최고농도, 맨눈관측을 한 처음과 끝의 시간과 관측소, 황사의 지속시간 등을 정리하였다(Table 3).

황사 사례는 지난 10년 동안 모두 16개 사례였으며 2001년, 2003년, 2004년에는 각각 1개 사례가 있었고, 2005년에는 2개, 2007년에 5개, 2008년에 2개, 2009년에 3개, 2010년 1월에 1개 사례가 있었다. 만주에서 발원한 황사가 우리나라로 영향을 준 횟수는 2002년과 2006년도에는 없었으나 2007년 이후에 늘어났다.

지상 관측소에서 지역에 관계없이 황사를 맨눈으로 처음과 마지막에 관측한 시간을 우리나라에 영향을 준 지속시간으로 보았을 때, 황사가 가장 길었던 사례는 2008년 4월 3~4일에 26시간 동안 중부지방 일부에서 열린 황사로 관측되었고, 가장 짧았던 사례는 2007년 3월 6일에 3.8시간동안 백령도에서만 관측된 열린 황사였다. 지속시간이 길었던 순서대로 번호를 매겨 Table 3에 표시하였다.

16개 사례에 대한 지속시간의 평균은 12.7시간으로 두 사례(2001년 12월 13~14일, 2008년 4월 3~4일)를 제외하면 만 하루가 채 되지 않았다.

황사의 이동경로를 보면 두 사례(2007년 4월 4일, 2010년 1월 25일)를 제외하고 모두 북한을 거쳐 이동하였다. 북한을 거치지 않은 두 사례의 황사는 모두 요동반도에서 남하하여 백령도를 거쳐 서해상으로 유입되었다. 또, 만주에서 발원한 황사가 백령도에서 처음 관측된 사례는 62.5%로 서고동저형의 기압배치에

Table 3. Periods, durations and observed sites of dust from Manchuria during 2001~2010(January)

Case	Pathway	Max.PM10 Conc.($\mu\text{m}/\text{m}^3$)(site)	Naked eye observation	Duration (hour)	Duration Rank
1	M ¹⁾ - NK ²⁾ - Central - Southern	-	2001 12/13~ 12/14 10:20	25	2
2	M - NK - part of Central- west coast	232(Heuksando)	2003 3/27 11 : 10~22 : 30	11.3	9
3	M - NK- BND ³⁾ - Central · Southern	683(Seoul)	2004 4/23 0 : 22~20 : 40	20.3	3
4	M - NK - BND - Central · Southern	477(Seoul)	2005 3/29 2 : 10~3/29 17 : 25	15.3	5
5	M - NK - SP ⁴⁾ - BND- west coast	504(BND)	2005 5/1 8 : 30~22 : 53	14.4	6
6	M - NK - Central - Southern(Gyeongsangbuk-do)	375(Ganghwa)	2007 3/6 6 : 40~16 : 50	10.2	10
7	M - NK- BND	214(BND)	2007 3/25 6 : 50~10 : 40	3.8	16
8	M - LP ⁵⁾ - BND - west coast - Japan	180(BND)	2007 4/4 5 : 05~9 : 20	4.4	15
9	M - NK - Central(Gangwon) - Japan	228(Cholwon)	2007 4/21 16 : 20~21 : 40	4.8	14
10	M - NK - BND	186(BND)	2007 5/7 16 : 10~22 : 30	6.3	12
11	M - NK - BND - Central- Southern(Jeollabuk-do)	297(Cheonan)	2008 2/11 23 : 15~2/12 17 : 40	18.4	4
12	M - NK - BND - Central(Seoul, Gyeonggi)	322(BND)	2008 4/3 4 : 40~4/4 6 : 40	26	1
13	M - NK - Central(Seoul, Northern Gyeonggi)	169(Seoul)	2009 3/14 5 : 50~11 : 45	5.9	13
14	M - NK - BND - Jindo	174(BND)	2009 5/13 4 : 35~18 : 55	14.3	7
15	M - NK - Central	389(Ganghwa)	2009 10/21 3 : 40~16 : 28	12.9	8
16	Neimenggu/DP - 요동반도 - BND, west coast - NK, Central - Japam(Kyusyu)	354(Seoul)	2010 1/25 4 : 05~14 : 10	10.1	11

¹⁾M-Dongbei Plain, ²⁾NK-North Korea, ³⁾BND-Baengnyengdo, ⁴⁾Shandong Peninsula, ⁵⁾Liaoning Peninsula

의한 강풍대가 한반도상에서 북서-남동쪽으로 위치하거나 남-북으로 위치한 강풍대가 동편함에 따라 중부 지방부터 유입되기도 하였다.

PM10 농도가 $683 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (관악산)으로 가장 높았던 2004년 4월 23일 사례는 북한 전역에 골고루 관측되었고, 맨눈 관측한 지점은 자강도 중강, 양강도 혜산, 평안북도 신의주, 황해북도 사리원, 강원도 원산 등을 포함한 18곳으로 가장 많았다. 이때의 황사는 우리나라 백령도에서 시작하여 원주와 포항에서 마지막으로 관측되었고, 지속시간이 약 20시간이며 우리나라 전역에 영향을 준 사례였다.

3. 황사 사례 분석

앞장에서 언급한 바와 같이 2001년부터 2010년 1월까지 만주에서 발원한 황사는 모두 16차례였으며, 이 중 2008년 4월 3일 사례와 2010년 1월 25일 사례를 골라, 황사가 발원하여 수송된 기압배치, 위성사진으로 본 황사의 수평분포, 황사가 수송된 공기흐름의 역추적, PM10 농도로 본 황사의 강도, 황사를 입자크기별로 관측한 결과 등을 분석하였다. 2001년 이후 만주에서 발원하여 우리나라에 영향을 준 황사 16개 사례의 평균 지속시간은 12.7시간인데 2008년 4월 3일

에는 지속시간이 26시간으로 가장 길었던 사례이다. 또 황사가 나타난 계절별로 보면 봄에 12개, 가을에 1개, 겨울에 3개 사례이며, 2010년 1월 25일 사례는 가장 최근에 관측한 겨울 황사 사례이다.

3.1. 2008년 4월 3일 사례

3.1.1. 종관 기상 특징

만주에서 발원한 황사가 우리나라에 영향을 준 사례의 지상일기도 패턴은 한반도 북서쪽에 고기압이 자리 잡고, 동해에 저기압이 있는 서고동저형의 기압배치로 45N, 120E 부근에 강한 기압경도력이 형성될 때임을 전영신 등(2003)이 밝혔다. 2008년 4월 2일 00UTC의 일기도를 보면 강풍대가 형성된 곳의 지상 풍속은 7 m/sec, 850hPa 면에서는 15 m/sec, 500 hPa에서는 25~30 m/sec이었으며, 발원지에서 흩먼지가 공중으로 부유할 수 있는 강풍 조건이 형성된 것을 알 수 있다(Fig. 4).

3.1.2 기상 위성영상으로 본 황사 수평분포

황사의 발원과 유입과정의 수평분포를 파악하기 위하여 일본의 정지기상위성인 MTSAT(Multi-functional Transport SATellite)-1R의 적외광학두께 (Infrared Optical Depth Index, IODI) 영상을 분석하였다. 적외광학두께

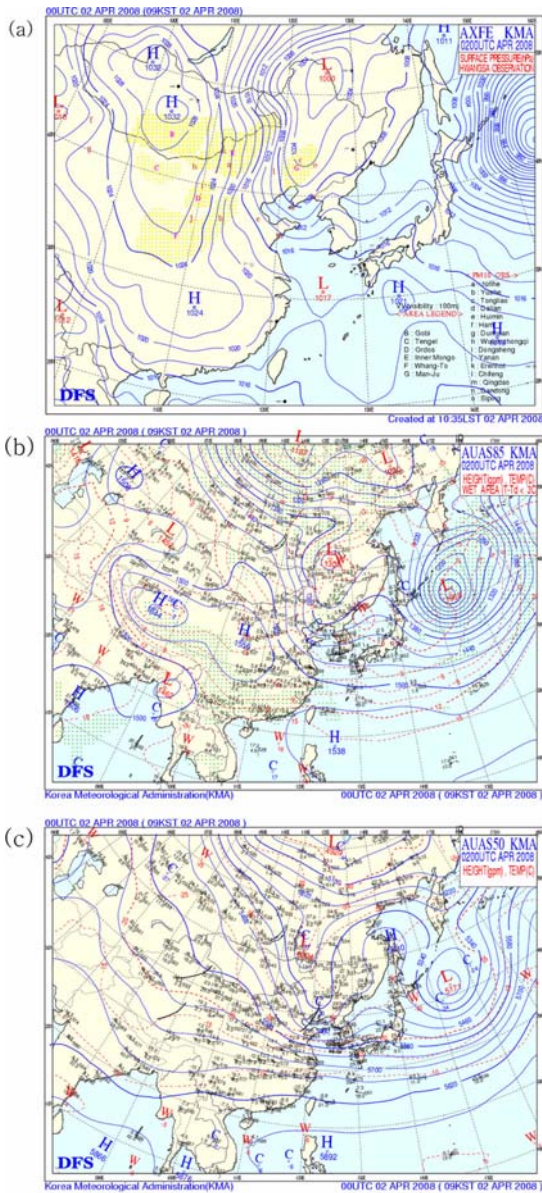


Fig. 4. Weather charts at (a)surface, (b)850 hPa and (c)500 hPa at 09KST 2 April 2008.

지수(IODI)는 맑을 때와 황사가 있을 때의 복사회도의 변화비율을 이용하는 방법으로 주·야간, 육지와 해상에서의 황사강도가 변함없이 표출되어 현재 기상청에서 황사감시에 활용되고 있다(김미자 등, 2008). 위성영상의 황사탐지 신호를 보면 2008년 4월 2일 낮에 만주에서 황사가 발원하여(Fig. 5(a)) 4월 2일 오후부터 북한을 거쳐 4월 3일 우리나라에서 황사가 관측되었다(Fig. 5(b)). 위성영상의 지도에 표시한 붉은 점

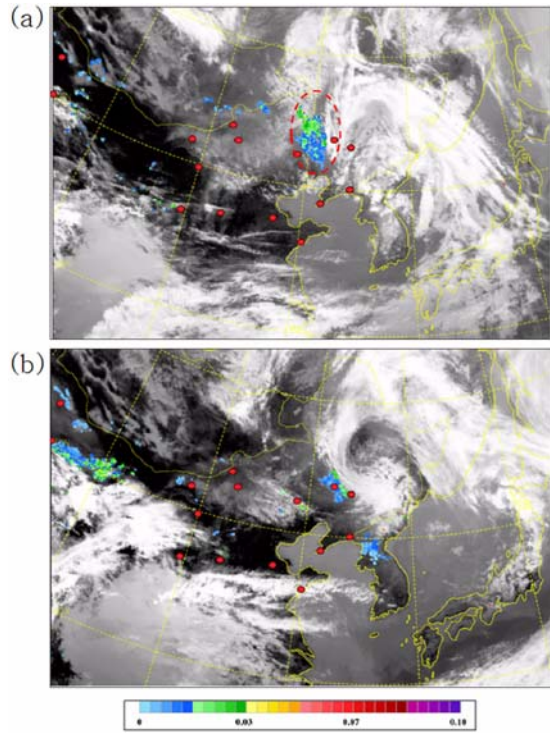


Fig. 5. MTSAT-1R IODI images at (a) 15 : 33KST 2 April 2008, (b) 14KST 3 April 2008.

은 중국 기상청의 PM10 관측소 중 일부이며 우리나라 기상청에 실시간으로 관측자료가 제공되고 있다.

3.1.3 황사현상의 관측현황

3시간마다 보고되는 GTS 전문 중 먼지현상을 일기도에 나타난 황사일기도를 황사의 유입부터 시간순서로 나열하였다(Fig. 6). 4월 3일에 백령도에서 처음으로 황사가 관측된 이후 수도권으로 유입되었고 점차 영동 북부로 이동하면서 소멸되었다. 관측자가 맨눈으로 관측한 기록을 보면 백령도에서 3일 새벽 4시 40분에 가장 먼저 나타났고, 지역별로 황사현상이 관측된 시간은 다음과 같다.

백령도(3일 4:40~4일 00:35), 서울(3일 9:10~4일 6:30), 동두천(3일 9:35~4일 6:40), 문산(3일 9:40~4일 6:30), 인천(3일 9:50~4일 6:10), 철원(3일 9:50~18:20), 속초(3일 12:45~14:15), 수원(3일 23:05~4일 6:40)

만주에서 발원한 황사는 우리나라 백령도에 처음 도착하여 동두천과 수원에서 마지막으로 관측하기까지 26시간 지속되었다. 또, 곳에 따라 짧게는 속초에서 1시간 30분, 길게는 서울에서 21시간 30분 동안 영

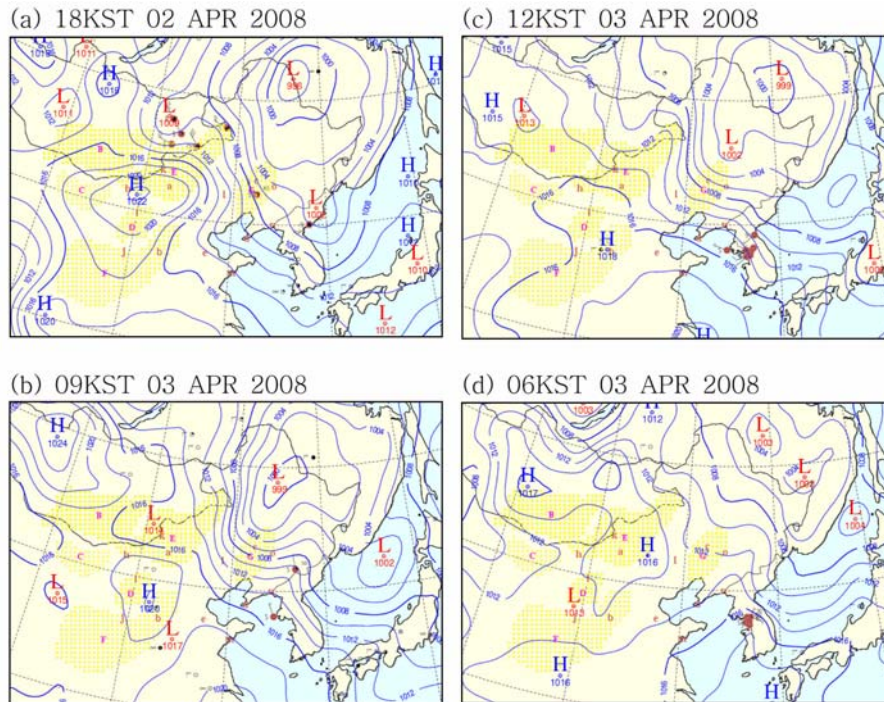


Fig. 6. Dust phenomenon observed in 2~4 April 2008.

향을 주었으며, 대체로 서울, 경기 등 수도권에서 장시간 관측되었다.

3.1.3 후방공기궤적 분석

황사가 우리나라에서 관측되었던 2008년 4월 3일 21KST에 기상청의 28개 PM10 관측소 위치의 1,500 m 고도에 있는 공기궤가 지난 48시간 동안 이동해온 경로를 조사하였다. 이를 위해 미국 해양기상청(NOAA)의 HYSPLIT모델을 활용하여 후방공기궤적선을 분석한 결과(Fig. 7) 중부지방의 경우 북서기류가 한반도로 유입되었음을 확인할 수 있다. 만주의 위치를 Fig. 7에 점선원으로 표시하였다.

3.1.4 미세먼지농도 (PM10) 관측

황사가 만주에서 2008년 4월 2일에 발원하여 2008년 4월 3일에 우리나라로 유입되기까지 관측한 PM10 농도의 시간평균값을 나타내었다(Fig. 8). 4월 2일에 만주의 통랴오에서 PM10 농도는 시간당 $1,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이 넘는 농도를 약 5시간 넘게 유지하면서 발원한 황사는 약 14시간 뒤인 4월 3일 새벽에 백령도에 도달하였다. 이 황사 동안 PM10의 최고 농도는 $322 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (3일 12시)였고, 서울, 경기에서 $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 열은 황사로 관측되었다.

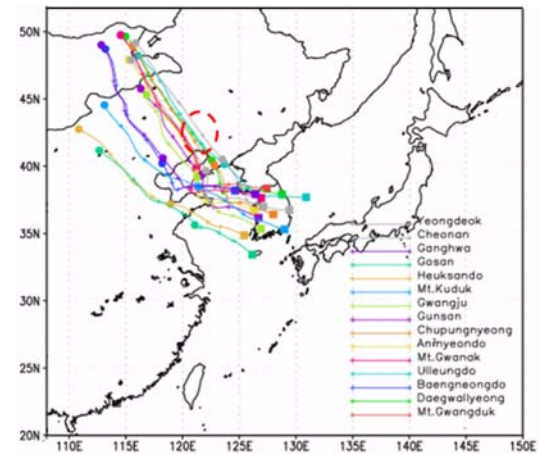


Fig. 7. 48-hour backward trajectories originating from a KMA PM10 station on 21KST 3 April 2008 at 1500m height.

3.1.5 입자크기별 질량농도 변화

황사의 입자크기는 2~6 μm 범위에 집중되어 나타나며(전영신 등, 1999), 대기오염물질은 주로 2 μm 이하의 초미세 입자로 존재한다. 입자크기에 따른 질량농도의 분포로 황사와 비 황사를 구분하는 방법이 이영근 등(2008)의 연구에서 제시되기도 하였다. 기상청

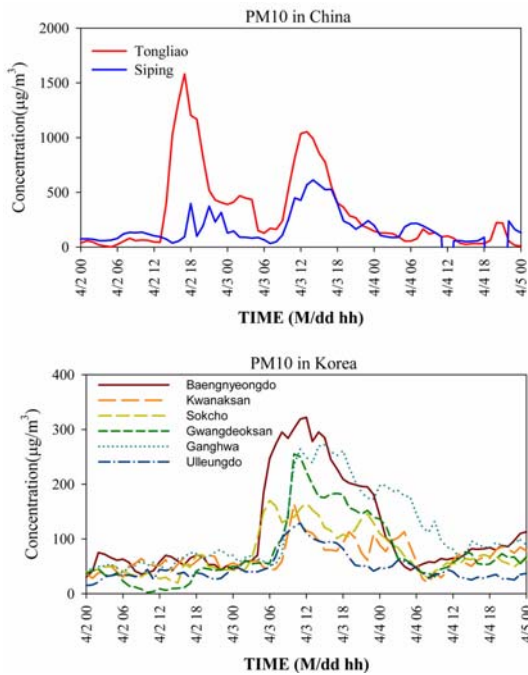


Fig. 8. PM10 concentrations in China(above) and Korea (below) on 2-4 April 2008.

은 황사와 대기오염 등의 연무를 구분하기 위하여 2008년부터 2009년까지 대부분의 황사가 가장 먼저 관측되는 백령도, 서해안에 위치한 군산과 흑산도, 중부 내륙에 위치한 서울, 강원도에 위치한 철원 등 6 곳에 입자계수기(Atmospheric Particle Spectrometer,

GRIMM사)를 설치하여 운영하고 있다. 입자계수기는 0.25~32 µm의 범위에서 32채널로 나누어 입자크기별로 개수를 측정하여 PM10, PM2.5, PM1.0의 질량농도를 실시간으로 계산하여 표출한다. 2008년도에는 백령도, 서울, 문산, 군산에 입자계수기를 운영하였고 이중 4월 3-4일 동안 황사가 영향을 주었던 곳의 자료를 Fig. 9에 나타내었다.

처음으로 황사가 유입된 백령도에서는 PM10과 PM2.5의 값이 4월 3일 새벽 4시부터 급격히 높아졌고 PM1.0의 값은 낮아졌다. 이러한 현상은 4월 4일 0시까지 지속되었는데 이는 황사를 맨눈관측한 시간과 일치하였다(Fig. 9(a)). 백령도에서 PM10 농도가 급격히 증가한 지 약 5시간 뒤에 서울의 PM10값이 높아졌고 4월 4일이 지나서야 PM10 값이 감소하고 PM10과 PM1.0의 차이가 줄어들었다(Fig. 9(b)). 서울에서 황사를 맨눈관측한 시간은 3일 9시 10분에서 4일 6시 30분까지이나 입자계수기의 관측결과는 황사가 좀 더 지속되었을 가능성을 보여준다.

3.1.6 입자크기별 이온농도

황사 사례에 서울시 종로구 송월동에 위치한 「서울황사감시센터」에서 다단입자채집기로 시료를 4월 3일 오전 9시부터 4월 4일 오전 9시까지 포집하여 이온 성분을 분석하였다. 다단입자채집기(MOUDI; Micro Orifice Uniform Deposit Impactor)는 0.056~18 µm 범위의 입자를 크기에 따라 10개 구간으로 나누어 포집하는 장비이다. 시료를 포집한 여지는 47 mm, 2 µm pore size의 테플론 필터이고, 시료를 포집하기 전과 뒤에 24시간 동안 습도 30~40%, 온도 25°C에서 항량

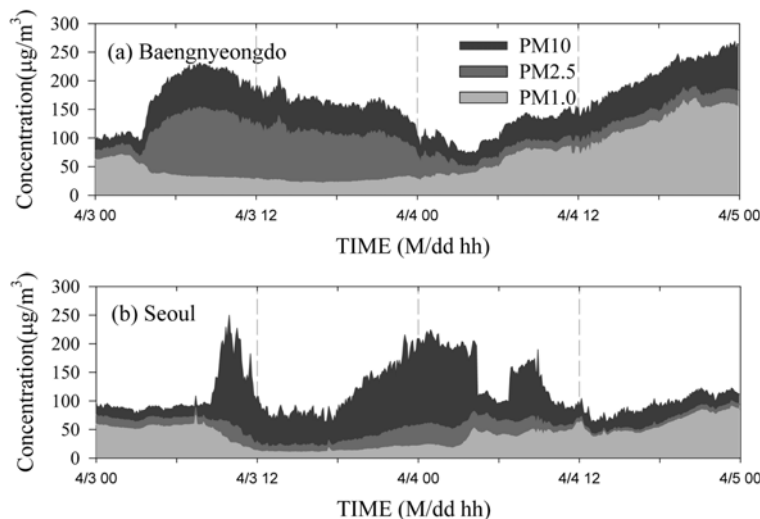


Fig. 9. Concentrations of PM10/2.5/1.0 from (a)Baengnyeongdo and (b)Seoul on 3~4 April 2008.

하였다. 시료를 추출하여 이온크로마토그래피(DX-500, Dionex)로 Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , NH_4^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- 의 8가지 이온을 분석하였다.

토양기원의 Ca^{2+} 농도가 입자크기 $1 \mu\text{m}$ 이상에서 높았고, 같은 입자크기에서 NO_3^- 농도도 높았다. 이는 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 의 형태로 입자에 NO_3^- 가 흡수되었음을 의미한다. 황사가 이동하면서 HNO_3 와 반응하여 굵은 입자에서 NO_3^- 가 검출되는데, 특히 습도가 높을수록, 이 동시간이 길수록 굵은 입자에서 NO_3^- 의 농도가 높아진다(Takiguchi et al., 2008). 또, 친수성인 NO_3^- 은 습도가 높은 환경에서나 혹은 수분함량이 많은 광물을 감싸서 입자의 크기가 더 커지게 된다(La and Shao, 2009). 입자크기가 $1 \mu\text{m}$ 이하에서는 오염기원인 SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 의 농도가 높아 전체로 볼 때 쌍봉우리 분포를 보였다(Fig. 10).

3.2. 2010년 1월 25일 사례

3.2.1 종관 기상 특징

2010년 1월 24일 12UTC의 일기도를 보면 고비사막에 중심을 둔 고기압과 연해주와 동해에 중심을 둔 저기압 사이에서 강풍대가 형성되었으며 우리나라로 북풍계열의 바람이 부는 것을 확인 할 수 있다. 강풍대의 지상 풍속은 7 m/sec, 850 hPa면에서는 20 m/sec, 500 hPa에서는 25~30 m/sec으로 황사 발원지에서 황사가 공중으로 부유할 수 있는 강풍 조건이 형성되었다. 또한 기류가 만주에서 한반도로 형성된 모습을 볼 수 있다(Fig. 11).

3.2.2 기상 위성영상으로 본 황사 수평분포

2010년 1월 24일 만주 서쪽에서 형성된 강풍대가 점차 동진함에 따라(Fig. 11.) 황사가 발원하였으며 위

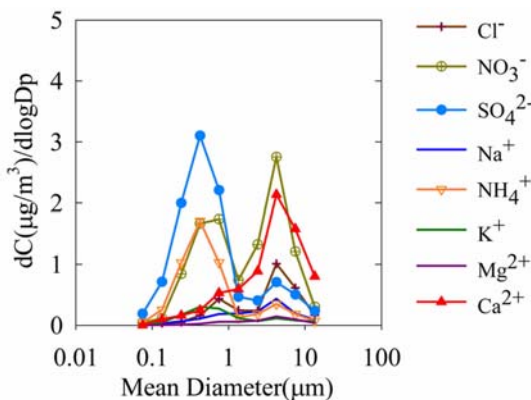


Fig. 10. Size distributions of ion concentration for each component on 3 April 2008.

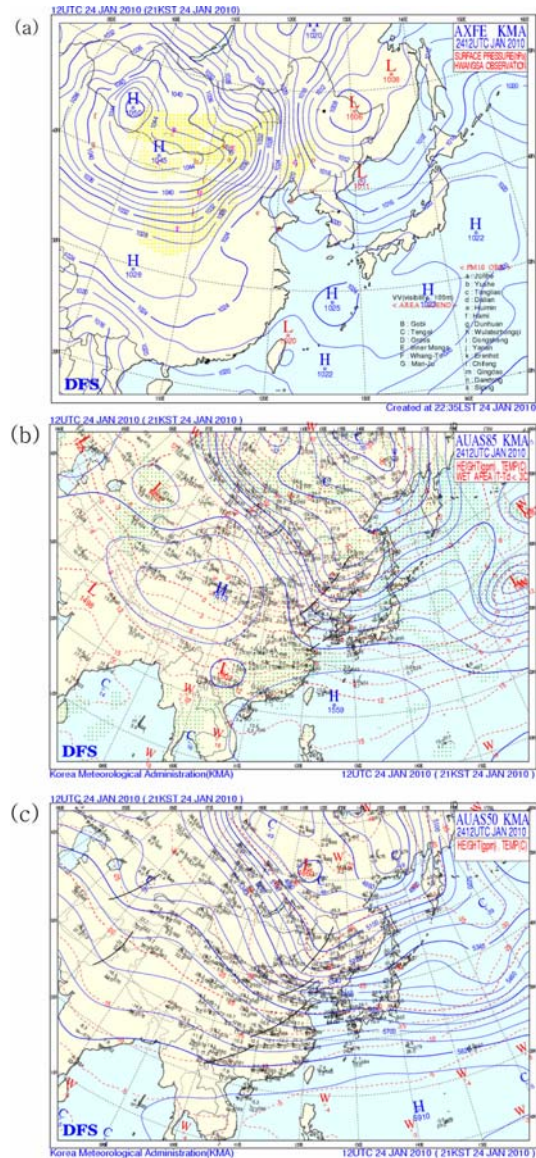


Fig. 11. Weather charts at (a)surface, (b)850 hPa and (c)500 hPa at 09KST 24 January 2010.

성영상에서 통랴오와 츠평 사이의 점선으로 표시한 황사 신호를 확인할 수 있다(Fig. 12(a)). 이 황사는 북한을 거쳐 우리나라로 유입되었다(Fig. 12(b)).

3.2.3 황사현상의 관측현황

3시간마다 보고되는 GTS 전문 중 먼지현상을 일기도에 나타낸 황사일기도를 황사의 유입부터 시간순서로 나열하였다(Fig. 13). 1월 25일 백령도에서 처음으로 황사가 관측된 이후 서해안으로 유입되었고, 점차

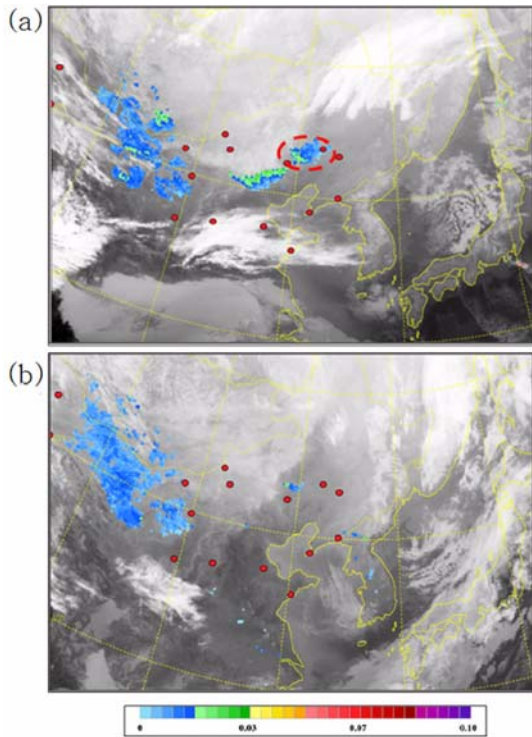


Fig. 12. MTSAT-1R IODI images at (a) 16KST 24 and (b) 12KST 25 January 2010.

중부지방 및 남부지방으로 확산된 후 일본으로 빠져 나갔다. 기상관측소에서 관측자가 맨눈으로 관측한 기록을 보면 백령도에서 4시 5분에 가장 먼저 나타났으며, 지역별로 황사현상이 있었던 시간은 다음과 같다.

백령도(4:05~6:30), 흑산도(6:27~13:15), 문산(6:30~13:50), 인천(7:40~13:55), 수원(8:30~13:50), 서산(9:20~10:40), 서울(9:25~13:50), 고산(9:30~14:10), 제주도(9:30~13:10), 성산(9:34~13:16), 보령(9:35~11:30), 서귀포(9:40~13:10), 이천(9:40~13:55), 군산(9:48~12:20), 천안(9:50~12:40), 전주(10:10~13:20), 광주(10:18~13:25), 대전(10:20~12:30), 추풍령(10:20~12:45), 동두천(10:25~12:30), 정읍(10:30~12:10), 충주(10:30~13:20), 청주(10:35~13:27), 목포(10:45~13:30), 고창(10:50~13:15), 남원(11:19~13:52), 순천(11:30~13:40)

이와 같이 만주에서 발원한 황사는 백령도에 처음으로 도착하여 지역에 따라 짧게는 서산에서 1시간 20분, 길게는 문산에서 7시간 20분정도의 영향을 주었다.

3.2.3 후방공기궤적 분석

황사가 우리나라에서 관측되었던 2010년 1월 25일 12KST에 기상청의 28개 PM10 관측소 위치의 고도 1,500 m에 있는 공기궤가 지난 48시간 동안 이동해온 경로를 역으로 조사한 결과(Fig. 14) 중부지방의 경우

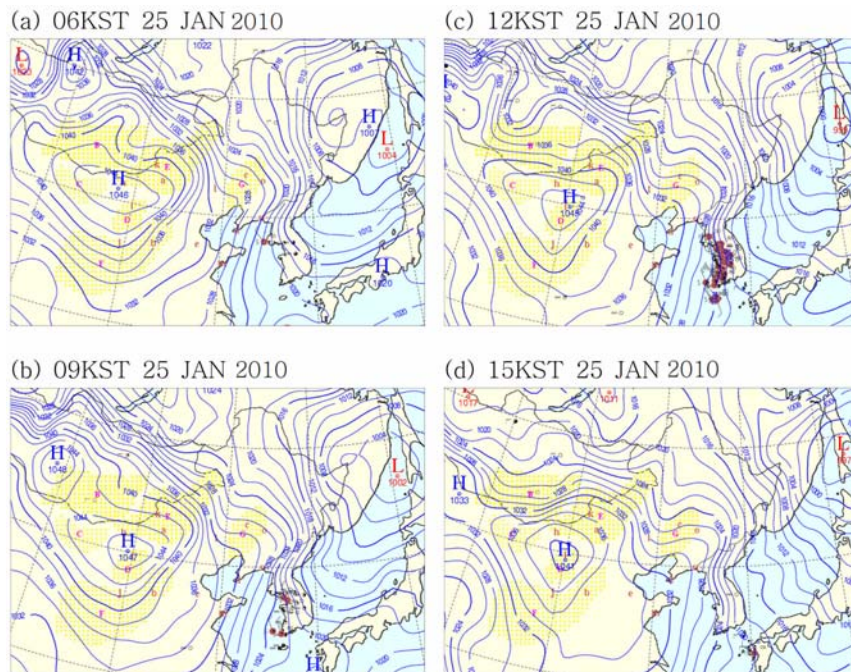


Fig. 13. Dust phenomenon observed in 25 January 2010.

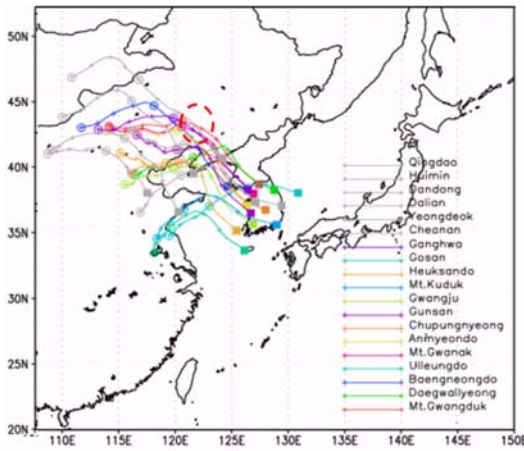


Fig. 14. 48-hour backward trajectories originating from a KMA PM10 station on 12KST 25 January 2010 at 1500m height.

북서기류가 만주를 거쳐 한반도로 유입되었다.

3.2.4 미세먼지농도 (PM10) 관측

황사가 만주에서 2010년 1월 24일에 발원하여 2010년 1월 25일에 우리나라로 유입되기까지 관측한 PM10 농도의 시간평균값을 나타내었다(Fig. 15). 관측결과를 보면 1월 24일에 통랴오에서 시간당 1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이 넘는 농도를 8시간 넘게 유지하면서 황사가 발원한지 약 10시간 만에 우리나라에 도달하였다. PM10의 최고 농도는 백령도에서 340 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (25일 05시)였고, 서울에서 319 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (25일 12시)였으며, 대부분 지역에서 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 열은 황사로 관측되었다.

3.2.5 입자크기별 질량농도 변화

2010년 1월 24~26일 동안 백령도, 군산, 흑산도, 서울, 철원 5곳의 입자계수기 결과를 Fig. 16에 나타내었다. 처음으로 황사가 관측되었던 백령도와 흑산도에서는 맨눈 관측이 보고된 시각에도 PM10과 함께 PM2.5, PM1.0의 농도가 여전히 높게 나타났으며, 이는 이번 황사가 유입되던 초기에 오염물질과 같은 미세입자와 함께 유입되었을 가능성을 보여준다. 그러나 3~5시간 뒤에 황사가 관측된 군산, 서울, 철원에서는 PM10의 값이 높아지면서 PM2.5와 PM1.0의 값은 급격히 감소하였다(Fig. 16(d),(e)).

3.2.6 입자크기별 이온농도

황사 시료는 1월 25일 8시부터 26일 8시까지 포집하였다. 입자크기별 이온농도의 분포는 2008년 4월 3일 사례와 비슷하나(Fig. 10) 굵은 입자 범위에서 NO_3^- 의 농도가 높게 나타나지 않았다(Fig. 17). 2008년과

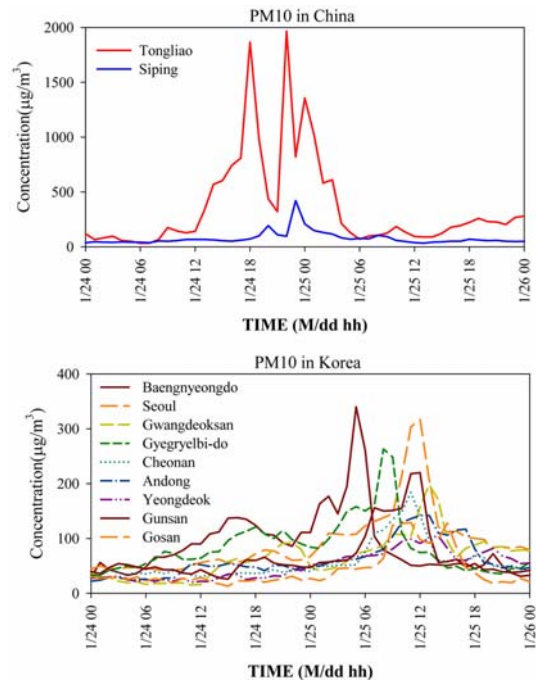


Fig. 15. PM10 concentrations in China(above) and Korea (below) on 24-25 January 2010.

2010년의 두 사례는 발원지와 이동경로가 비슷한 열은 황사이지만, 서울에서 황사를 관측한 시간은 2008년도 4월 사례가 21시간 10분이고, 2010년 1월 사례가 4시간 25분으로 지속시간의 차이가 컸다. 따라서 2008년 4월 3일 NO_3^- 가 굵은 입자 범위에서 높게 나타난 것은 황사가 지속되는 동안 입자의 화학 반응이 있었을 것으로 추측된다. 그러나 이에 대하여는 황사의 이동경로, 유입한 뒤 시료를 포집한 곳의 환경, 풍속, 습도 등의 기상조건과 함께 가스상 물질의 농도 분포, 입자와 가스상의 화학반응 등 더욱 다양한 면에서의 연구가 필요하다.

4. 결 론

우리나라에 영향을 주는 황사의 대부분이 고비사막, 황토고원, 내몽골과 동북 평원에서 발원하며, 2000년대 이후로는 만주에서 발원하는 황사의 횟수가 증가하고 있다. 만주는 우리나라에서 지리적으로 가까워 황사 발원 후 유입시간이 1일 이내로 짧아 예보하기 어려운 점이 있다. 본 연구에서는 만주의 토양 특징과 황사 발원 기록, 2008년 4월 3일과 2010년 1월 25일의 황사 사례의 중관기상과 수평분포, PM10 농도, 화학 성분 등을 분석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

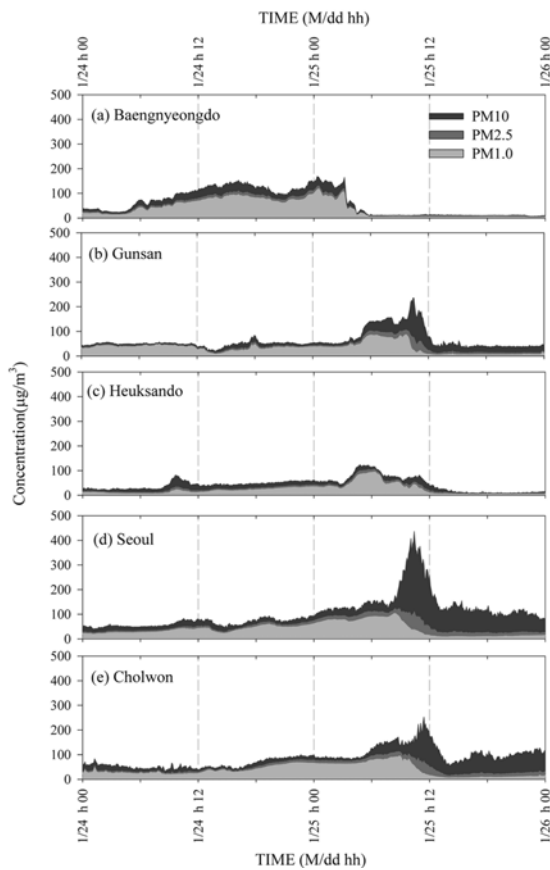


Fig. 16. Concentrations of PM10/2.5/1.0 from (a)Baengnyeongdo, (b)Gunsan, (c)Heuksando, (d)Seoul and (e)Cholwon on 24-26 January 2010.

첫째, 만주의 창춘, 바이칭, 통랴오, 나이만 그리고 셴양을 답사하였고, 바이칭 부근에서는 백색 점토질의 알칼리 토양을 관찰하고 통랴오와 나이만에서는 밝은 황색의 모래땅을 관찰하였다. 답사를 하던 2009년 6월에는 만주별판에는 옥수수가 자라고 있었으나, 10월에 추수하여 다음해 5월에 씨를 뿌릴 때까지 나지는 모두 잠재적인 황사 발원지가 될 수 있었다.

둘째, 1996년부터 2009년까지 만주에서의 황사발원 횟수와 적설량, 풍속, 강수량, 기온 등 기후자료를 분석하여 2000년대 이후 황사발원횟수가 증가한 것은 적설량의 감소와 관계가 깊었음을 확인하였다. 2002년 이후에는 적설량이 80 cm이하로 감소하였고, 봄철 월평균 풍속이 7 m/sec 이상인 조건이 황사의 발원횟수가 늘어나는데 중요한 요인으로 작용하였다. 또, 2007년 이후 여름철 강수량이 100 mm이하로 줄어들었던 점은 땅을 가물게 하여 가을, 겨울의 황사발원에 영향을 준 것으로 보인다.

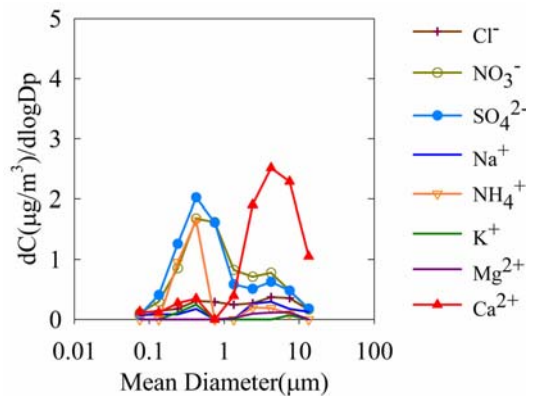


Fig. 17. Size distributions of ion concentration for each component on 25 January 2010.

셋째, 2001년부터 2010년 1월까지 만주에서 발원한 황사가 우리나라에 영향을 준 사례는 모두 16차례였으며, 2002년과 2006년에는 만주 황사가 없었다. 황사의 지속시간은 평균 12.7시간으로 만 하루 이내였다. 만주에서 발원한 황사의 87.5%가 북한을 거쳐 유입되었고, 62.5%가 백령도에서 처음 맨눈 관측이 되었다. 이러한 이동경로는 서고동저형의 기압배치에 의한 북풍계열의 강풍대가 황사를 수송하기 때문이다.

넷째, 2008년 4월 3일과 2010년 1월 25일의 사례는 서고동저의 기압배치로 강풍대가 만주에 놓일 때 발원하였으며, 위성영상으로 발원과 이동하는 모습을 확인하였다. 2008년 4월 3일 사례는 옅은 황사였으며, 우리나라에 유입되어 빠져나가기까지 지속시간이 26시간으로 만주에서 발원하여 우리나라에 영향을 준 황사들 중 가장 길었다. 또, 영향을 준 곳은 서울과 경기도 일부였다. 2010년 1월 25일 사례는 중부에서 제주도까지 지역에 따라 1시간에서 5시간으로 짧게 영향을 미쳤고, 25일 오후에 황사는 일본으로 빠져나갔다. 중국 통랴오에서 8시간 동안 시간당 1,000 µg/m³ 가 넘는 농도의 황사가 발원하였고, 후방공기계 분석 결과, 황사가 북풍계열의 기류로 빠르게 이동하였으며, 우리나라에서 백령도에 최고 340 µg/m³ (25일 5시), 대부분의 지역에서 300 µg/m³ 이하의 옅은 황사로 관측되었다.

다섯째, 두 황사 사례는 백령도로 처음 유입이 되었을 때 PM₁₀과 함께 PM_{2.5}, PM_{1.0}이 높게 나타나 오염물질과 함께 유입되었을 것으로 보이나, 두 사례 모두 서울에서는 PM₁₀ 값만 높았다. 만약, 황사와 함께 유입된 미세입자가 대륙에서 장거리 수송된 오염물질이라면 서울 등의 내륙으로 들어오면서 급격히 감소한 원인은 앞으로 풀어야 할 과제로 생각된다.

여섯째, 두 황사 사례의 이온성분은 큰 입자크기에

서 토양기원의 Ca^{2+} 농도가 높았고 작은 입자크기에서 오염기원의 SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 의 농도가 Ca^{2+} 농도 수준만큼 높아 전체로 볼 때 쌍봉우리 분포를 보였다. 서울에서 황사가 20시간 이상 지속했던 2008년 4월 사례에서는 큰 입자크기에서 NO_3^- 의 농도가 Ca^{2+} 보다 높았으나, 황사가 5시간 이하로 지속했던 2010년 1월 사례에서는 큰 입자크기에서의 NO_3^- 농도가 낮았다. 명확한 규명을 위해 가스상, 기상조건과 함께 입자의 화학 변화에 대한 연구가 필요할 것이다.

마지막으로, 만주는 사막화와 급속한 인구증가로 인한 오염물질 등이 일반적인 모래먼지에 섞여 수송될 가능성이 있어, 앞으로 만주에서 발원하는 황사의 화학 성분 분석에 대한 집중 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 기상청 국립기상연구소 주요과제 「황사 감시 예측기술 지원 및 활용 연구」와 국립환경과학원 용역과제 「선정사례에 대한 황사집중분석 및 황사관측능력 배양공동연구(I)」의 지원으로 수행되었습니다. 만주의 발원지 답사를 도와준 China National Environmental Monitoring Center의 Wang Ruibin과 Shi Feng에게 감사드립니다.

참고문헌

기상청, 2001: 한국기후표(1971~2000).
 기상청, 2006: 2005년도 황사보고서. 14-22, 86-93.
 기상청, 2008: 2007년도 황사보고서. 35-60, 96-135.
 기상청, 2009: 2008년도 황사보고서. 8-18, 61-71.
 기상청, 2010: 2009년도 황사보고서. 28-44, 85-99, 142-159.
 김미자, 김윤재, 손은하, 김금란, 안명환, 2008: 정지기상위성 자료를 이용한 정량적 황사지수 개발 연구. *Atmosphere*, **18(4)**, 267-277.
 김선영, 이승호, 2009: 한국의 황사출현에 영향을 미치는 요인에 관한 연구. *대한지리학회지*, **44(6)**, 675-690.
 윤용황, 1990: 한반도에 수송되는 황사의 특징에 관한 연구. *한국기상학회지*, **26(2)**, 111-120.
 이영곤, 조천호, 김명수, 2008: Aerodynamic Particle Sizer(APS)를 이용한 고농도 PM10 사례 중 황사 판별 기법 개발, *Atmosphere*, **18(1)**, 25-32.

이종재, 김철희, 2008: 최근의 황사 발원지에서의 먼지 발생 특성-2002년 이후 먼지발생 경향 분석. *Atmosphere*, **18(4)**, 493-506.
 전영신, 김지영, 최재천, 신도식, 1999: 황사시 서울과 안면도의 대기중 에어로졸 수농도 특성. *대기환경학회지*, **15**, 575-586.
 전영신, 조경숙, 김영화, 이종국, 2003: 만주에서 발원한 황사 현상. *한국기상학회지*, **39(2)**, 251-263.
 정관영, 박순용, 1995: 한반도에 황사 출현시의 종관 기상 특징. *한국기상학회지*, **31(1)**, 45-63.
 정용승, 김태군, 1991: 대기오염의 장거리 이동 사례연구: 황사, TSP, Sulphate의 발원지 추적. *한국대기보전학회지*, **7(3)**, 197-202.
 Kanamitsu M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S. K. Yang, J.J. Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter, 2002: NCEP-DOE MIP-II REANALYSIS (R-2), *Bul. of the Atmos. Met. Soc.*, 1631-1643.
 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.
 Ku H., Y. Liu, Z. Cao:2003, Two Different Dust Storms in Northeast China: the Sources and Influences in East Asia. *Geosci.Res.NE Asia*, **6(1)**, 99-104.
 Kurosaki Y., and M. Mikami: 2004, Effect of snow cover on threshold wind velocity of dust outbreak. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, **31**, L03106.
 Li F., B. Zhang, W. Su, Y. He, Z. Wang, K. Song, D. Liu, and Z. Liu, 2008: Sandy desertification change and its driving forces in western Jilin Province, *North China. Environ Monit Assess*, **13(6)**, 379-390.
 Li, W. J. and L. Y. Shao, 2009: Observation of nitrate coatings on atmospheric mineral dust particles, *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 1863-1871.
 Lim J. Y. and Y. Chun, 2006: The characteristics of Asian dust events in Northeast Asia during the springtime from 1993 to 2004. *Global and Planetary Change*, **52**, 231-247.
 Yoshihiro T., A. Takami, Y. Sadanaga, X. Lun, A. Shimizu, I. Matsui, N. Sugimoto, W. Wang, H. Bandow, and S. Hatakeyama, 2008: Transport and transformation of total reactive nitrogen over the East China Sea, *Journal of Geophysical Research*, **113**, D10306.