

겨울철 황사 현상의 특징

The Features Associated with the Yellow Sand Phenomenon Observed in Korea in Wintertime

전영신 · 김지영¹⁾ · 부경온¹⁾ · 김남옥²⁾

기상청 기후국 기후예측과, ¹⁾기상연구소 응용기상연구실,

²⁾기상청 예보국 수치예보과

(2000년 5월 22일 접수, 2000년 8월 17일 채택)

Youngsin Chun, Jiyoung Kim¹⁾, Kyung-On Boo¹⁾ and Nam-Ok Kim²⁾

Climate Prediction Division / Korea Meteorological Administration

¹⁾*Applied Meteorological Research Laboratory / Meteorological Research Institute*

²⁾*Numerical Weather Forecast Division / Korea Meteorological Administration
460-18, Shindaebang-dong, Tongjak-gu, 156-720, KOREA*

(Received 22 May 2000; accepted 17 August 2000)

Abstract

Spring time is a favorable season to be easily observed the Yellow Sand phenomenon in East Asia. In particular, most of the phenomenon tend to occur in April. However, Yellow Sand phenomenon was observed from almost the whole country of Korea in winter of 1966, 1977 and 1999. The features of the synoptic weather pattern in the source regions, air stream flow between the source region and Korea, the measurement of TSP concentration, aerosol size distribution, and chemical composition of snow samples associated with Yellow Sand phenomenon were investigated.

The result showed the characteristic evolutionary feature of the synoptic system associated with Yellow Sand phenomena, that is, a strong low level wind mobilized the dust within 2 or 3 days before Yellow Sand phenomenon being observed in Seoul. The wind was remarkably intensified in the source region on January 24, 1999 under the strong pressure gradient. A trajectory analysis showed that the Yellow Sand particle could be reached to Korea within 2 days from the source region, Gobi desert, through Loess plateau and Loess deposition region.

The TSP concentration at the top of Kwanak mountain during the Yellow Sand phenomenon is abruptly increasing than the monthly mean concentration. The size resolved number concentration of aerosols ranging from 0.3 to 25 μm was analyzed during Yellow Sand episode. It was evident that aerosols were distinguished by particles in the range of 2~3 μm to result in the abrupt increase in January 1999. After Yellow Sand phenomenon, there was heavy snow in Seoul. By the analysis of snow collected during that time, it was observed that both the Ca^{2+} concentration and pH were increased abnormally compared to those in the other winter season.

Key words : Asian dust, aerosol number concentration, trajectory, Yellow-Sand Snow

1. 서 론

우리 나라에서 관측된 황사 현상에 관한 연구는 대기중 부유분진을 포집하여, 황사의 입경 분포 비교 및 화학 특성 분석(이민희 등, 1989; 이민희 등, 1988; 이민희 등, 1986)을 효시로 1980년대 후반부터 시작되었다. 또한 춘천에서 20년간(1970~1989년)의 자료에 대한 기상의 특징을 분석하여 황사 현상이 발생한 경우의 종관기상이 만주지역에 중심을 둔 한랭전선을 동반한 지상 저기압의 통과와 밀접한 관련이 있고 500hPa면에서 15~25 m/s의 서북서풍이 불고 한랭핵의 남하가 뚜렷함을 제시한 것(윤용황, 1990)으로부터 기상학적인 분석이 시작되었다. 이후 1990년 4월 8~10일의 황사를 분석한 이민희 등(1990)은 황사 때 분진이 모래색이고 무황사 때는 흑갈색이며, 농도 분포형은 이산형 분포임을 제시하였고, 1988년 4월 9~15일 황사 사례의 등엔트로피 궤적에 의한 이동경로가 분석되었으며(윤순창과 박경선, 1991), 1988년 4월~1991년 5월 TSP 관측을 통하여(신은상과 김희강, 1992) 황사의 입경분포가 1~2 μm 이며, 황사 때 Al, Fe의 평균 농도가 4.6배로 증가함을 보인 바 있다. 1988년 4월 황사 사례시 대기 중에 부유한 황사의 총량을 190 Mton으로 추정(정용승과 김태근, 1991)하였으며, 이재규 등(1993)은 1993년 4월 황사 사례 종관분석, 김유규 등(1995)은 1986년부터 1991년까지의 서울시 TSP 분포를 조사하여 서울에서 TSP 최고농도는 4월에, 최저농도는 7월에 나타남을 보인 바 있다. 정관영과 박순웅(1995)은 1983부터 1993년까지의 황사시 한반도의 종관기상 특징을 분석하여 황사 출현시 시정은 평균 8km, 황사 출현율이 4월에 65%를 차지하며, 황사 발원지의 한랭한 고기압 전면의 강한 지상 바람의 특성을 강조한 바 있다. 한편, 정관영(1996)은 1988년 황사 사례에 대해 오일러리안 모델링으로 수치 모의하였으며 황사의 부유 및 수송량을 양적으로 추정하는 방법을 제시하였다. 1993년에는 황사 사례에 대해 라그랑지안 모델링을 시도(전영신, 1997)하였으며, 황사 발원지의 황사 배출 조건 조사 및 개선법을 제안한 바 있다. 또한 미국까지 황사가 장거리 수송되어 국제적으로 황사에 대한 관심(Husar *et al.*, 2000)을 불러일으킨 1998년

4월 황사시 서울과 안면도의 대기 중 에어로졸 수농도 특성을 비교(Chun *et al.*, 2000; 전영신 등, 1999) 하였으며, 같은 해인 봄철에 안면도에서 관측된 황사의 광학적 특징(신도식 등, 1999)과 황사비의 중화특성(김지영 등, 2000)이 연구된 바 있다. 황사의 장거리 수송과 관련된 대기 순환 유형의 분류도 연구(전종갑 등, 1999)되었으며, 최근에는 우리 나라 고문헌에 기록된 황사 자료도 복원(전영신, 2000)되었는데, 이에 따르면, 조선시대의 황사 기록 중 겨울철 눈과 관련된 사례는 총 6건이 있었다.

본 연구에서는 겨울철인 12월, 1월, 2월에 우리 나라에서 관측된 황사 현상의 과거 기록을 조사하여 겨울철에 출현한 황사 현상의 빈도와 그 특징을 밝혔다. 최근에 관측된 황사 사례의 지상과 상층의 기압 분포 특성과 황사의 이동 경로, 대기 중 총 부유분진의 농도, 에어로졸 수농도, 황사 현상 후 내린 눈의 화학 특성 등을 고찰함으로써, 겨울철에 나타난 황사 현상의 발생과 수송, 그리고 침전에 대한 종합적이고 전반적 특성을 밝히고자 한다.

2. 연구방법

2.1 최근 우리 나라의 황사 일수 조사

우리 나라에서 관측된 황사 현상의 추이를 파악하기 위해 북한의 관측소를 포함한 한반도의 최근 황사 일수를 조사하였다. 또한 서울에서 관측된 황사 일수의 연변화 특성을 조사하였다.

2.2 겨울철 황사 관측 기록 조사

1960년 이후 우리 나라에서 겨울철인 12월, 1월, 2월에 관측된 황사 현상의 기록을 살펴보았다. 1966년 2월 3일~4일에 걸쳐 15개 도시(춘천, 강릉, 서울, 인천, 울릉도, 추풍령, 포항, 전주, 울산, 광주, 부산, 목포, 여수, 제주, 서귀포)에서, 전국적인 황사 현상이 관측되었다. 또한 1977년 2월 22일부터 28일 사이에는 23개 도시(속초, 대관령, 춘천, 서울, 원주, 수원, 청주, 대전, 추풍령, 포항, 군산, 대구, 전주, 울산, 광주, 부산, 통영, 목포, 여수, 완도, 서귀포)에서 7일 동안이나 황사 현상이 관측되었다. 최근에는 1999년 1월 25일부터 28일에 걸쳐 전국적으로 70개 관측 지점(속초, 철원, 동두천, 대관령, 춘천, 강릉, 동해, 인천, 원주, 울릉도, 수원, 영월, 서산, 울진, 청주, 대전, 추풍

령, 안동, 포항, 군산, 대구, 전주, 울산, 광주, 부산, 통영, 무안, 목포, 여수, 완도, 제주, 제주 고산, 진주, 이천, 강화, 부여, 금산, 부안, 임실, 정읍, 남원, 장수, 순천, 양평, 이천, 인제, 홍천, 태백, 제천, 충주, 보은, 천안, 보령, 장흥, 해남, 고흥, 성산포, 춘양, 영주, 문경, 영덕, 의성, 구미, 영천, 거창, 합천, 밀양, 산청, 거제, 남해)에서 매우 뚜렷한 황사 현상이 나타났으며, 이와 같이 겨울철인 1월과 2월에도 전국적으로 황사 현상이 뚜렷하게 관측된 것을 확인하였다.

2.3 사례 선정

1월에 관측된 황사 현상(표 1)은 1950년 이후 전국 각지에서 국지적으로 관측되었으며, 전국적으로 광범위하게 관측된 것은 1999년 1월임을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 겨울철 황사 현상으로서 최근에 가장 뚜렷하게 나타난 1999년 1월의 사례를 선정하였다.

2.4 황사 에어러졸의 수농도 관측

에어로졸의 수농도를 입경별로 살펴보기 위해 미국 Micro Air社의 광산란식 입자계수기(Optical

Particle Counter; Model HIAC/ROYCO 5230)로 관측하였다. 이 기기는 내장된 펌프에 의해 흡인된 시료 공기가 광원의 조사 영역을 통과 할 때 개개의 입자에 의해 산란된 산란광의 강도를 측정하는 방식으로 산란광의 세기와 기기적으로 보정된 세기의 관계로부터 입자의 크기를 측정한다. 일정량의 공기량에 대해 일정한 시간동안 측정한 입자수를 특정한 입경보다 큰 입자의 개수를 헤아리며, 그 크기가 0.3~25 μ m인 에어로졸을 로그 눈금으로 동일한 8개 채널(표 2)로 나누어, 단위부피당 개수로 정의되는 수농도(number concentration)를 관측하였다. 이 연구에서는 기상청(서울시 동작구 소재) 7층에 기기를 설치하여 매시간마다 진공펌프에 의해 1분당 1ft³의 공기를 자동 흡입하여 측정하였다.

2.5 황사논의 포집 및 화학 분석

시료는 강설 자동채취기를 이용하였으며, 채취기는 지름이 26cm인 원통형 플라스틱으로, 용기 속에 40 l 용량의 비닐 백을 씌워 사용하였다. 채취기는 채취기에 부착되어 있는 강설감지기(1mm 간격으로 배치된 금선이 코팅되어 있는 기관을 사용)에 눈이 닿으면 자동으로 뚜껑이 열려 눈시료가 채취되고, 눈이 오지 않을 때는 뚜껑이 닫혀 건식 강하물의 유입을 최소화시킬 수 있도록 설계되었다. 강설 시료 채취 시각은 오전 09시부터 다음날 오전 9시로 하였다. 채취된 시료는 실험실로 옮겨 부피를 측정 한 후 직경 47mm GF/C 필터(Whatman, USA)를 펌프에 연결하여 여과시킨후 즉시 pH(Orion, 720A, USA)를 측정하였다.

이온 분석용 시료는 증류수로 세척한 HDPE병(Nalgene, 125ml)에 담아 분석 전까지 4°C 이하에서 냉장 보관하였다. 음이온 성분(SO₄²⁻, NO₃³⁻, Cl⁻, F⁻)과 양이온 성분(NH₄⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺)은 기상청 기상연구소 배경대기관측소에서 이온 크로마토그래피(Dionex, DX-500)를 이용하여 분석하였으며, 분석 조건은 표 3과 같다.

Table 1. Yellow Sand phenomenon of January observed in Korea.

Year	Date	Observation site
1950	1	Chupungryong
1961	24	Sogwipo
1966	6, 10	Mokpo
1966	14	Ulrungho
1966	17	Mokpo, Cheju
1966	30	Cheju
1970	12	Tongyoung
1976	4~5	Cheju, Sogwipo
1978	26	Kunsan
1979	8~9	Puan
1979	18	Ichon
1988	26	Puan
1994	25	Puan
1999	25~28	Seoul, Incheon, Chunwon, Kangnung, Taejeon, Seasan, Kunsan, Puan etc. (Total 70 sites)

Table 2. The aerosol size range (Dp) from 0.3 to 25 μ m.

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8
Size range (mm)	0.3 ≤ D _p < 0.5	0.5 ≤ D _p < 0.82	0.82 ≤ D _p < 1.35	1.35 ≤ D _p < 2.23	2.23 ≤ D _p < 3.67	3.67 ≤ D _p < 6.06	6.06 ≤ D _p < 10	10 ≤ D _p < 25

Table 3. Analytical condition of ion chromatography.

	Cation	Anion
Ion species	NH ₄ ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ ,	SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , Cl ⁻ K ⁺ , Na ⁺
Analytical column	CS12	AS4A
Guard column	CG12	AG4A
Eluent	20 mM MSA	1.8 mM Na ₂ CO ₃ ⁺ 1.7 mM NaHCO ₃
Suppressor	CSRS	ASRS
Eluent flow	1.0 ml/min	2.0 ml/min

3. 분석결과

3.1 최근 우리 나라의 황사 일수

우리 나라에서 관측된 황사 현상의 추이를 파악하기 위해 북한의 관측소를 포함한 한반도의 최근 황사 일수를 조사하였다. 이 때 황사 일수라 함은 하루 중에 황사 현상이 짧은 동안이라도 관측된 날의 수를 뜻하므로 실제로 황사 현상이 지속된 절대적인 시간을 의미하지는 않는다.

3.1.1 한반도의 황사 일수

한반도에서 관측된 1982년부터 1999년까지의 황사 일수를 그림 1에 나타내었다. 북한에서는 백두산

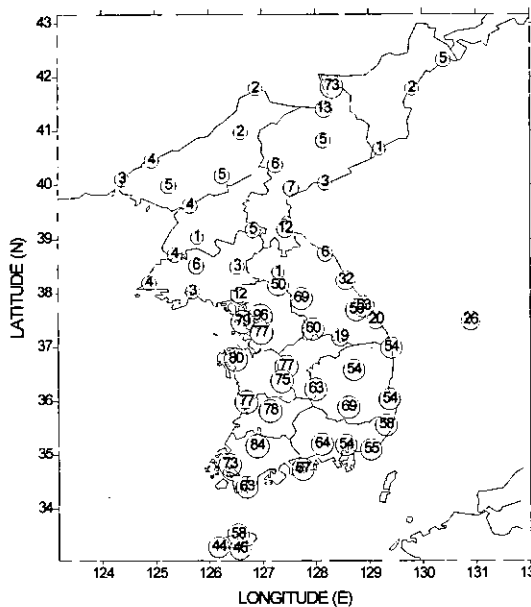


Fig. 1. Yellow Sand days in Korean peninsula during the period from 1982 to 1999.

부근의 삼지연(41° 49'N, 128° 19'E, 1386m) 관측소에서 73일로 가장 많았고, 바로 남쪽에 위치한 해산(41° 24'N, 128° 10'E, 714m)에서 13일을 기록하였으며, 그 외 관측소에서는 1~7일로 기록되었다. 한편, 우리 나라의 경우는 북한에 비해 상대적으로 많은 황사 일수가 기록되었는데, 이러한 차이를 보이는 것은 기상학적인 원인보다는 결측이나, 목적에 의존하는 관측 방법 때문에 객관적인 기준이 결여된 원인으로 추정된다. 우리 나라에서는 전라남·북도와 서울을 비롯한 경기도에서 더욱 많은 황사 일수를 보임으로써 중국에 가깝게 위치한 서쪽 지역에서 황사 현상의 출현 빈도가 더 높은 것으로 나타났다.

3.1.2 서울의 황사 일수

서울에서 관측된 1982년부터 1999년까지의 연별 황사 관측 일수를 그림 2에 나타내었다. 해에 따라 매우 다른 출현 빈도를 보이는데, 황사가 전혀 관측되지 않은 해(1986년, 1989년, 1994년)도 있으며, 1993년에는 황사 일수가 14일로 가장 많은 일수를 기록하였다. 또한 서울에서 최근 21년간 평균 황사 일수는 약 5일로 나타났다. 이처럼 황사 일수가 해마다 큰 차이를 보이는 것은 대규모 대기 순환과 관련이 있고, 중국 건조지역에서의 황사 배출량에 대한 정보와 봄철의 기류의 흐름 등 동아시아 지역의 기후와 황사의 관련성을 분석해야 한다. 최근 황사 관측일수는 약간의 증가 추세를 보이는 것으로 나타났다.

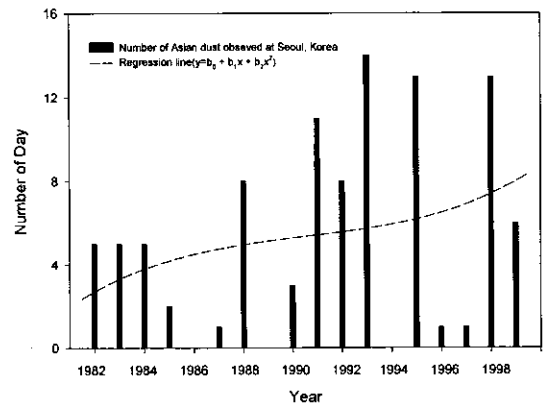


Fig. 2. Yellow sand days in Seoul during period from 1982 to 1999.

Table 4. Time table for Yellow Sand and precipitation in Seoul.

Date	Yellow Sand (LST)	Precipitation
January 25, 1999	1145~2400	Rain (3.0 mm): 0445~0506
January 26, 1999	0000~0445, 0940~2400	
January 27, 1999	0000~0210, 0810~2400	Rain (0.7 mm): 1230~1520
January 28, 1999	0000~0430	Snow (0.2 cm): 2330~2400
January 29, 1999		Snow (8.4 cm): 0000~0312

3. 1. 3 1월에 관측된 황사 현상

1999년 1월 25일부터 28일까지 황사 현상이 전국에 걸쳐 뚜렷하게 관측되었으며, 이 황사 기간중에는 황사 현상만으로 출현하기보다 적은 양의 비와 다량의 눈이 혼재되어 나타났으며, 29일 새벽에는 서울에 8.4cm의 눈이 내렸다(표 4).

3. 2 1999년 1월 황사 현상의 특징

황사 현상이 발생할 당시 기상장의 특징을 살펴보면, 한반도에서의 황사관측일 2~3일전의 중국내륙 황사 발원지에서의 중관기상장이 중요하며(정관영과 박순용, 1995), 한반도에서 황사관측전일에 한반도 북쪽지역의 저기압이 황사의 수송과정에 중요한 역할을 한다고 알려져 있다. 그리고 700hPa 혹은 500hPa 등압면에 강한 풍속대에 동반된 바람시어(wind shear)가 황사 입자 부유에 영향을 주거나, 지상 및 상층저기압의 동해상 진출을 통한 급격한 발달이 큰 기압골을 형성하여, 그 후면의 북서기류는 한반도로 황사를 유입시키는데 중요한 역할을 한다. 1월에 발생한 황사 현상은 주로 화북지역의 고비사막과 그 서쪽으로 연해 있는 지역에서 유래되고, 한반도에 도달하기 2~3일전에 황사 발원지에서 주로 황사가 부유하는 것으로 알려져 있다. 한편 황사 발원지 부근에는 겨울철의 전형적인 대륙성 극기단이 형성되어 있지 않고, 독립된 세포 형태의 고기압과 저기압이 산재해 있는 경우가 많았으며, 대기 상층의 등고선과 등온선이 조밀한 가운데 서로 교차하여 경압 불안정(baroclinic instability)을 야기한 사례가 많았다.

3. 2. 1 1999년 1월의 중관 기상 조건

1999년 1월 발생한 황사 현상에 영향을 미친 중

관 기상 조건을 살펴보기 위해 지상, 850hPa, 500hPa 등압면의 중관 일기도를 살펴보았다(그림 3). 각 고도별 풍속을 보면, 황사 발원지(40~50°N, 100~110°E)의 지상풍속은 약 15m/s, 850hPa 등압면에서는 20m/s, 500hPa에서는 50m/s로 추정된다. 또한 황사 발원지의 1.5km 상공(850hPa 등압면)에서는 등압선과 등온선이 서로 교차(그림에 표시된 등근영역)하여 경압 불안정을 야기하고 있다. 이것은 황사 발원지에서 황사가 공중으로 부유할 수 있는 좋은 조건을 제공하고 있는 것으로 볼 수 있다.

한편, 미국 해양기상청(NOAA)의 기후 예보 센터가 분석한 동아시아의 기온 아노말리와 강수량을 보면, 1999년 1월 24일부터 30일까지의 황사 발원지 부근(몽골과 중국의 접경 지역)에서 지표 기온이 평균보다 5°C 이상이 높은 것으로 보아 고온 조

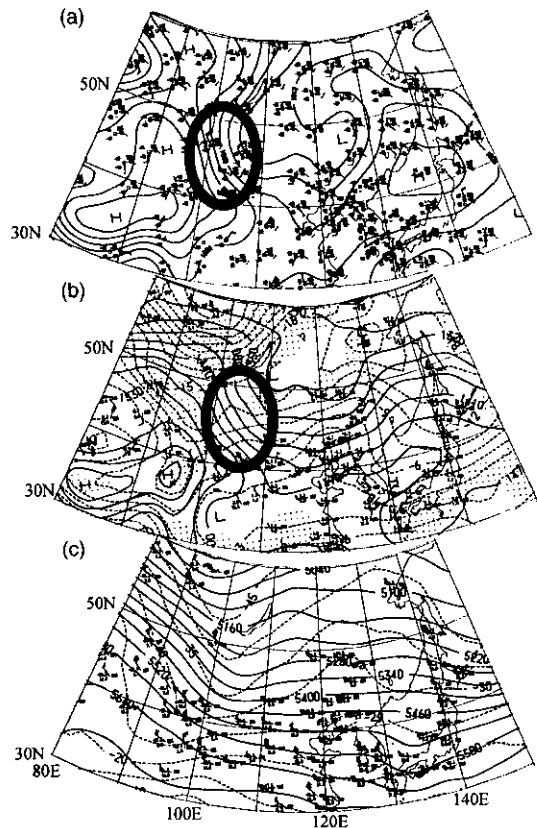


Fig. 3. Weather charts at surface (a), 850 hPa (b) and 500 hPa (c) on 24 January 1999.

건을 유지하였음을 알 수 있었다. 이와 같은 고온 현상은 중국의 동부와 한반도의 대부분에서 나타났다. 또한 강수량은 황사 발원지에서 1mm 미만으로

건조하였으므로 겨울철이지만 황사가 배출될 수 있는 조건으로 사료된다. 일반적으로 겨울과 봄 특히 봄에는 찬 성질의 기단이 시베리아 지역에서 중국

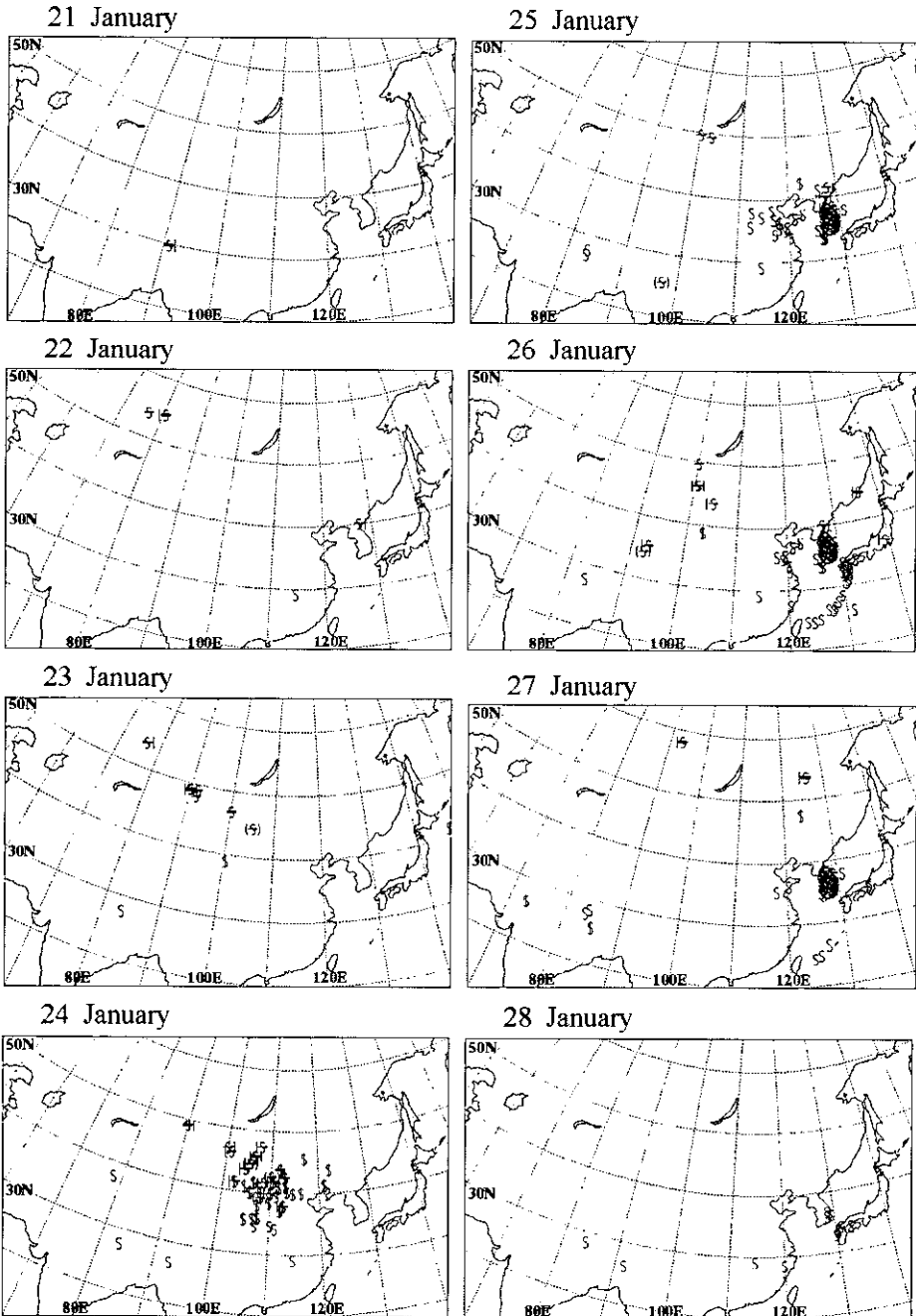


Fig. 4. The dust phenomenon during the period from 21 to 28 January 1999.

북부로 장출한다. 봄에는 식물이 많지 않고, 식생이 없는 지표는 온도가 급격히 상승하기 때문에, 수일간 맑은 날이 지속될 경우 지표 부근의 기온이 크게 상승할 수 있다. 찬 성질을 띤 기단이 통과하게 되면, 대기가 열적으로 불안정하므로, 쉽게 황사가 부유할 수 있는 조건이 된다.

3.2.2 먼지 현상 추적도

1월의 황사 현상과 관련되어 지상 관측소에서 관측된 기상 현상 중 먼지 현상을 일별로 그림 4에 나타내었다. 1999년 1월 21일부터 23일에는 아시아 대륙에서 국지적으로 먼지 현상이 관측되다가 1월 24일에는 황사 발원지(40°N, 100~120°E) 부근의 광범위한 지역에서 황사가 배출되어 모래폭풍, 먼지 회오리의 형태로 관측되었다. 이 때 배출된 황사는 25일에 한반도 전역과 중국의 청도 부근의 황사 현상으로 났으며, 26일과 27일에 우리 나라 뿐만 아니라 일본열도에서도 황사 현상이 관측되었고, 28일에는 거의 소멸되었다.

3.2.3 등온위면상 유적선 분석

1월 25일부터 한반도 전역에서 관측되기 시작한 황사 현상의 발원지를 살펴보기 위해 기상청 수치예보과의 전지구모형에 의한 분석자료를 이용하여 등온위면상 유적선을 계산하였다. 먼저 1월 23일과 24일에 황사가 발생한 발원지 기류의 진행을 전진 유적선을 통하여 알아보았다(그림 5). 290 K 등온위면에서 6시간 간격으로 48시간동안 황사의 이동 위치 계산으로부터 발원지의 기류가 북서쪽 방향에서 한반도로 유입되고 있음을 볼 수 있다. 이동속도를 보면 24시간 이내에 한반도로 발원지의 기류가 유입되는 것을 볼 수 있었으며 여기서 25일 이후에 한반도에서 관측된 황사 현상의 발원지를 확인할 수 있었다. 그리고 전진 유적선과 더불어 황사의 발원지를 좀더 정확히 확인하기 위하여 서울을 기점으로 한 후진 유적선을 분석하였다(그림 6). 대체적으로 한반도의 북서쪽에서 기류가 유입되고 있음을 볼 수 있는데 서울에서 황사가 관측된 25일부터 28일까지는 기류가 동일한 경로를 보이고 있었고 1월 24일과 29일의 경우는 기류가 각각 남쪽과 북쪽으로 조금씩 치우쳐 나타났다. 따라서 유적선 분석으로부터 황사 기간중에 한반도 북서쪽에 위치한 황사 발원지로부터의 기류 유입을 뚜렷이 볼 수 있었다.

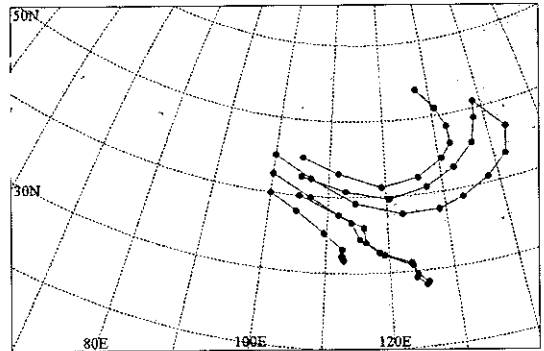


Fig. 5. 48 hour forward trajectories on 290 K from the source region at 00UTC 24 January 1999. The black dots represent every 6 hour.

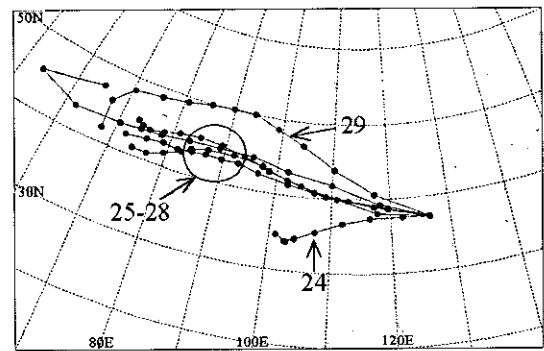


Fig. 6. 72 hour backward trajectories on 290 K from Seoul at 06UTC 24-29 January 1999. The black dots represent every 6 hour.

3.2.4 관악산의 총 부유분진 농도

한반도에 황사 현상이 관측될 당시 환경부의 총먼지량 관측 결과를 보면 1월 25일부터 27일 사이에 총 71개 먼지 측정소 중 16개소(도시수로는 총 39개도시 중 15개 도시)에서 환경기준값 300 µg/m³을 초과하였다. 한편, 기상청 예보국 관측관실에서는 관악산 레이더 기상대(633m)에 총 부유분진(TSP) 관측 기기를 설치하여 황사를 탐지하고 있다. 관악산 정상은 해발고도가 높고 주변에 국지적인 오염원이 없어서 황사 현상을 관측하기에 매우 좋은 위치이다. 1999년 1월부터 3월까지의 부유분진 관측 결과를 보면(그림 7), 대부분 300 µg/m³ 이하의 농도를 기록하였으나, 황사 현상이 관측된 1월 말일에는 최고 1900 µg/m³에 육박하는 매우 높은 값을 나타

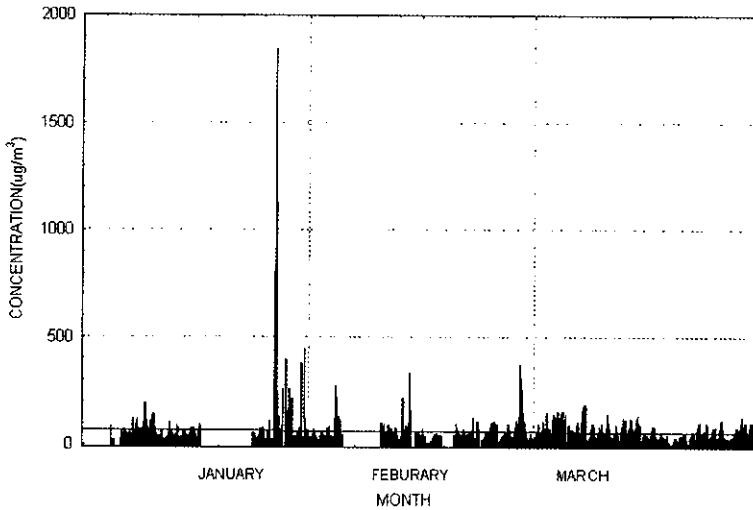


Fig. 7. TSP concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) observed at Kwanak Mountain during the period from January to March 1999.

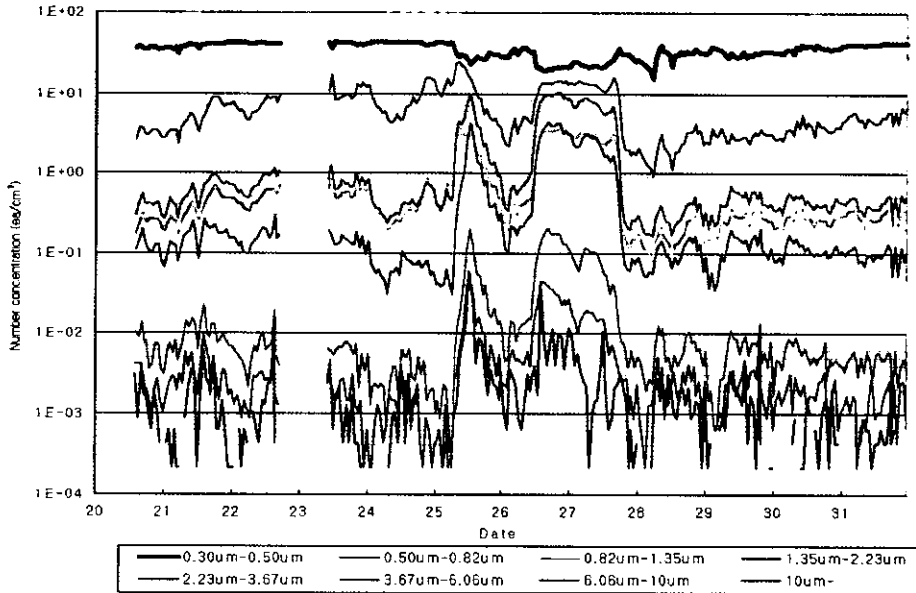


Fig. 8. Aerosol number concentration observed in Seoul during January 1999.

내었고 겨울철의 황사 현상이 뚜렷하게 탐지되었다.

3.2.5 서울의 에어로졸 수농도

1999년 1월 20일부터 31일까지의 서울에서 관측된 입경별 에어로졸의 수농도(그림 8)를 살펴보았

다. 그림 8의 세로축은 로그 눈금으로 나타낸 입자 개수로 단위는 개수/cm³이다. 우선 가장 작은 크기인 0.3~0.5 μm 구간의 입자 개수는 가장 많아 수백 개가 되며, 황사 기간중에는 수농도가 감소하였다. 이같이 감소하는 것은 1998년 4월 황사시 서울

과 안면도의 에어로졸 수농도 비교에서 나타난 결과와 일치한다(전영신 등, 1999). 그 다음으로 작은 0.5~0.82 μm 구간의 입자 개수는 0.3~0.5 μm 구간의 입자보다 절대적인 개수는 적은 편으로 수십 개 정도로 황사 기간중에 두 개의 최고값이 보이며, 두 번째 최고값은 하루 정도 지속되었다. 1.35~2.23 μm 구간의 입자 개수는 수 개~수십 개로 그 변동폭이 크며, 황사 기간 중 변화 경향이 앞의 0.82~1.35 μm 구간의 입자의 변동 추세와 거의 일치하고 있다. 입경이 1.35~3.67 μm 구간의 입자의 변동 추세도 작은 두 구간의 에어로졸과 유사하게 변화하고 있다.

그 다음으로 큰 3.67~6.06 μm 구간의 입자 개수는 황사 기간 중 변동폭이 매우 크며, 2.23~3.67 μm 구간의 입자와 마찬가지로 황사 기간중 두 개의 최고 값을 보이는 기간이 있다. 6.06~25 μm 구간의 입자도 앞의 구간의 경향과 매우 유사하다. 따라서 3.67~25 μm 구간의 입자 개수는 서로 매우 유사한 변동 추세와 그 변동폭이 두 자리 수로 매우 크고 황사 입자에 의한 수농도 증가의 결과로 해석된다. 가장 큰 입자 범위인 10 μm 이상의 입자는 매일 매일의 일변화를 뚜렷이 나타내고 있으며, 황사 현상인 1월 27일에도 일변화를 보이고 있다.

3.2.6 황사시 서울의 에어로졸 크기 분포

앞 절의 에어로졸 관측 기기로 크기가 0.3~25 μm 인 에어로졸을 로그 눈금으로 동일한 29개 구간으로 나누어, 단위부피당 개수로 정의되는 수농도를 1999년 1월 26일 17시에 관측하였다. 이와 같이 자세하게 입자의 크기를 분할하여 특별 관측을 실시하면, 에어로졸의 크기 분포를 알 수 있으므로 분포 형태를 조사할 수 있다. 그 결과 그림 9에서 보면, 수농도는 1 μm 미만과 1~3 μm 에서 최고 농도를 보이며, 표면적 농도와 부피농도는 2~3 μm 구간에서 최대값을 나타낸다. 부피농도의 경우는 1~10 μm 의 입자에 의한 부피가 큰 부분을 차지하는 것으로 보아 입자의 밀도가 일정하다면, 황사 입자의 질량에 크게 기여하는 것이 1~10 μm 의 입자에 의한 것임을 알 수 있다. 한편, 봄철의 에어로졸의 크기 분포(전영신 등, 1999)와 비교하면, 수농도는 1 μm 미만과 2~3 μm 에서 최고 농도를 보이는 것은 매우 유사하다 하겠다.

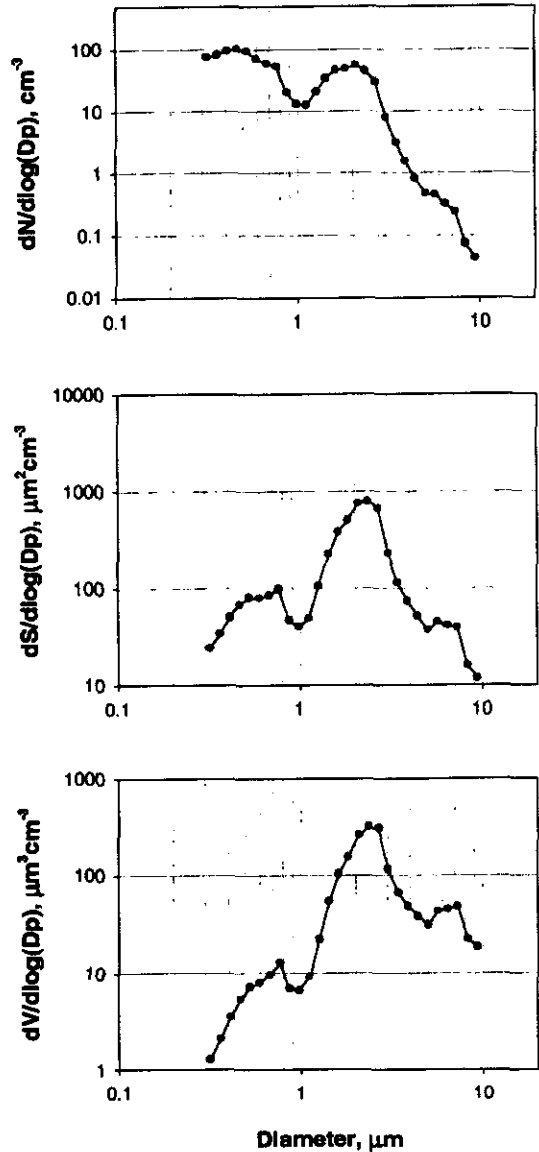


Fig. 9. Aerosol size distribution of Yellow Sand episode at Seoul, 1700 LST 26 January, 1999.

3.2.7 황사비의 화학 분석

1999년 1월 29일, 황사 현상이 끝난 후 서울에 내린 눈과 강원도 인제에서 내린 눈(96년 1월 15일) 속에 함유된 이온 성분을 비교하였다(그림 10). 그 결과, 황사비의 경우 Ca^{2+} 의 함유율(56%)이 보

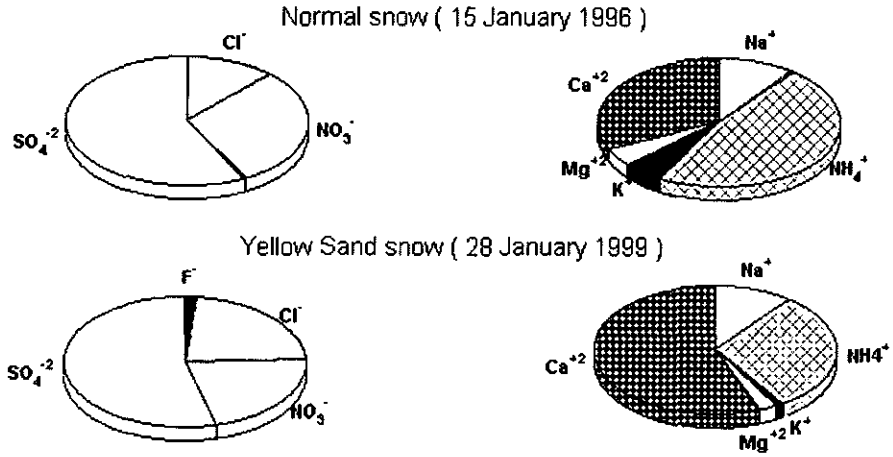


Fig. 10. Comparison of ion composition of snow between Yellow Sand episode and normal condition.

통때(31.7%)에 비해 높았으나, SO_4^{2-} 이온 등 음이온의 변화는 뚜렷하지 않았다. 한편, 보통 눈의 경우 pH는 5.14인데 반해 황사눈의 경우는 6.25나 됨으로써 황사눈의 경우 황사 입자에 의한 토양 기원의 알칼리 성분인 칼슘 이온의 농도가 크게 증가하여 이들 성분이 강수를 중화(김지영 등, 1999)시킴으로써 황사눈의 pH값이 높게 나타난 것으로 해석된다.

4. 결론 및 고찰

우리 나라에서 겨울철에 출현한 황사 현상에 대해 종합적으로 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 1960년 이후 우리 나라에서 겨울철에 전국적으로 관측된 황사 현상은 1966년 2월 3~4일, 1977년 2월 22~28일, 1999년 1월 25~28일이었다. 이와 같이 겨울철인 1월과 2월에도 전국적으로 뚜렷하게 관측된 황사 현상이 있었다.

둘째, 한반도에서 겨울철인 1월에 관측된 황사 현상의 2일전 황사 발원지의 기상 조건을 살펴본 결과 황사 발원지에서 강풍이 나타났으며, 강풍 형성을 위한 조건으로는 발달된 한랭한 고기압의 전면에서 기압 경도력이 강한 조건이 공통적으로 나타났다.

셋째, 겨울철인 1월이라 해도 황사 발원지에는 모래 먼지가 존재하는데, 1999년 1월의 경우, 황사 발

원지가 평년에 비해 건조하고 지표의 기온이 높았으므로, 겨울철이라도 대량의 모래 먼지가 지표면에서 제공될 수 있었다.

네째, 겨울철 황사는 봄철의 황사보다 이동 속도가 빨라, 황사 발원지에서 발원후 24시간만에 우리나라에서 관측되었다.

다섯째, 관악산 정상은 주변의 국지적인 오염원이 적어 황사 관측에 매우 좋은 조건을 갖춘 것으로 사료되며, 총 부유분진의 모니터링으로 겨울철 황사를 뚜렷하게 탐지할 수 있었다.

여섯째, 에어로졸 수농도 관측 결과로 보아, 겨울철 황사시 황사 입자의 분포는 $1\mu m$ 미만과 $1\sim 3\mu m$ 에서 최고 농도를 보이는 이산 분포 형태를 나타냈다. 또한 봄철 황사 현상과 유사한 에어로졸의 크기 분포를 나타낸 공통점을 찾을 수 있었다.

일곱째, 본 연구에서 관측된 에어로졸 입경중 가장 적은 범위에 속하였던 $0.3\sim 0.5\mu m$ 구간의 크기를 갖는 입자는 황사 현상시 감소하는 추세를 나타내었다. 이는 황사를 포함하는 기류의 유입과 관련되어 황사 입자가 다량 증가하는 것과는 대조적인 특징(Chun *et al.*, 2000)으로써, 황사 침적과 관련된 특징으로 확인하였다.

여덟째, 1999년 1월 황사 입자 중 질량 농도에 크게 기여하는 입자 크기는 $1\sim 10\mu m$ 이고 황사눈의 화학성분 분석결과 칼슘이온이 다량 함유되어 있음을 확인하였다.

감사의 글

이 연구는 1999년도 기상청 기상연구소 응용기상 연구실의 기본연구과제 “황사현상과 관련된 에어로솔 특성연구”의 일환으로 이루어졌으며, 연구에 많은 조언을 해주신 최재천님, 김 산님, 박기준님, 관악산 레이더 기상대 직원 여러분께 고마움을 전합니다. 또한 세심하게 심사해주신 두 분의 심사위원님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

김우규, 전영신, 이원환(1995) 서울 부유분진 농도와 황사 특성에 관한 사례 연구, 한국대기환경학회지, 11(2), 199-209.

김지영, 전영신, 조하만, 최재천, 남재철, 김 산(2000) 도시 지역과 농촌지역에 내린 강수의 중화 특성, 한국기상학회지, 36(1), 15-24.

신도식, 김 산, 김정식, 차주환(1999) 안면도에서 1998년 봄철에 관측된 황사의 광학적 특징, 한국대기환경학회지, 15(6), 739-746.

신은상, 김희강(1992) 서울시에서의 대기부유먼지에 대한 황사의 영향, 한국대기환경학회지, 8(1), 52-57.

이민희, 한의정, 원양수(1986) 황사 현상이 우리 나라에 미치는 영향, 한국대기환경학회지, 2(3), 34-44.

이민희, 한의정, 신찬기, 한진석(1988) 황사 현상시 분진의 입도 분포와 화학조성에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 4(2), 57-66.

이민희, 한진석, 한의정, 신찬기(1989) 황사 현상시 강수의 화학적 성분에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 5(2), 1-11.

이민희, 황규호, 김은식, 평정영이, 정자철지, 궁기원일(1990) 황사 현상시의 대기오염 물질 동태에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 6(2), 183-191.

윤순창, 박경선(1991) 동엔트로피 제적에 의한 황사의 장거리 이동경로 분석, 한국대기환경학회지, 7, 89-95.

윤용황(1990) 한반도에 수송되는 황사의 특징에 관한 연구, 한국기상학회지, 26(2), 111-120.

이재규, 김정선, 김영화(1993) 한반도에 수송되는 황사의 특징에 관한 연구, 기상연구소 논문집, 111-120.

전영신(1997) 황사발원지의 배출조건을 고려한 황사의 장거리 수송 모의, 서울대학교 대기과학과 박사학위논문, 129pp.

전영신, 김지영, 최재천, 신도식(1999) 황사시 서울과 안면도의 대기 중 에어로졸 수농도 특성, 한국대기환경학회지, 15(5), 575-586.

전영신(2000) 朝鮮王朝實錄에 나타난 黃砂 현상, 한국기상학회지, 36(2), 285-292.

정용승, 김태근(1991) 대기오염의 장거리 이동 사례 연구: 황사, TAP, Sulphate의 발원지 추적, 한국대기환경학회지, 7(3), 197-202.

전종갑, 예상욱, 권민호, 정용승(1999) 황사의 장거리 수송과 관련된 대기 순환 유형의 분류, 한국기상학회지, 35(4), 575-586.

정관영, 박순용(1995) 한반도에 황사 출현시의 종관 기상 특징, 한국기상학회지, 31(1), 45-63.

정관영(1996) 한반도에서 관측된 황사의 수치모의, 서울대학교 대기과학과 박사학위논문, 160pp.

Chun, Youngsin, J. Kim, J. C. Choi, K. O. Boo, S.N. Oh, and M. Lee (2000) Characteristic Number Size Distribution of Aerosol During Asian Dust Episode in Korea, Atmospheric Environment, (Printed).

Husar *et al.* (2000) The Asian Dust Events of April 1998, (submitted to JGR).