

황사의 사례분석과 한반도 유입량

On the occurrence of yellow sand and atmospheric loadings

정 용 승 · 윤 마 병

한·중대기과학연구소

한국교원대학교

(원고접수 : 1994. 6. 20)

Y. S. CHUNG, M. B. YOON

Korea-China Centre for Atmospheric Research,
Khangnae, Chongwon, Choongbook 363-791, Korea

(Received 20 June 1994)

Abstract

The phenomenon of yellow sand (dust clouds) occurred in Korea during the spring of 1993 and 1994 is studied in detail. In total 6 cases including 15 days of yellow sand were observed in 1993 and the annual number of these events was found to increased. Examinations in this study include meteorological charts, satellite imagery, pilot reports (PIREP) of Korea Air Force, and air concentrations of total suspended particulates (TSP). We present on estimation of total atmospheric loadings based on the observation and theory.

According to the PIREP, in general the dust clouds travelled in the lower troposphere up to the level 5km. The visibility within the clouds was in the range of 3~8km. The area covered by yellow sand in an event exceeded 0.4 M km. According to trajectory analyses, dust clouds invaded Korea in April and May 1993 were landed in the sink area after 2~4 days travelling for 2,000~3,000km from a source region. Estimates of total atmospheric loadings of a dust cloud for April 23~24 in 1993 were 1.5 M ton.

In addition, 7 dust storms were also reported in synoptic observations in NW China and Mongolia during the spring in 1994. The yellow sand was not reported with meteorological observations in Korea, however pilots reported significant dust clouds over the Yellow Sea on 8 and 13 April and 20 May 1994.

1. 서 론

봄철에 대륙에서 불어오는 먼지 폭풍을 황사라 하며, 극동 지방의 황사는 건조지대인 고비사막, 황하 상류의 황토지대, 타클라마칸 사막, 오도스 사막 등이 그 기원지로 알려졌다. 이곳은 Tienshan, Altai, Sayan 사막 등 높은 고산지대의 풍하측으로 매우 건조하며 저기압이 자주 형성되는 곳이다. 황

사입자는 대기중에 응결핵과 빙정핵으로 작용하여 구름물리에 영향을 주며(Arao and Ishizaka, 1986) 북태평양의 바다밑에 퇴적물로 작용한다(Chung, 1980). 황사는 토양과 채소 등에 축적이 이루어져 인간에게 간접적인 영향을 미치며, 황사 현상과 함께 내리는 비는 토양 성분이 많은 퇴적물을 포함한 토우로 내린다. 또한 황사는 정밀한 전자장비 및 항공 제트기관에 치명적인 손상을 입힐 수 있으며, 황

사에 의한 시정장애는 조종사로 하여금 비행착각 (vertigo) 및 비행불능을 초래하기도 한다. 황사인 모래먼지와 흙바람은 심한 경우 일본까지 영향을 주며 일본에서는 kosa라고 불리운다(Kobayashi, 1985).

최근 황사는 지구 온난화와 토양의 사막화 등에 의해 발원지가 계속 확대되고 발생 빈도가 증가하며 서해안에 인접한 중국의 북동부 공업지대에서 방출되는 중금속 오염 물질까지 황사에 실려와 심각한 국내의 오염문제 및 국제문제로 부각되고 있다. 우리의 황사에 대한 연구와 함께 일본과 중국에서도 활발히 시작되었으며 그 중요성을 인식하여 많은 연구가 이루어지고 있다. 황사의 입자형태와 대기중 농도(신은상 김희강, 1992), 황사 발생시 기후패턴, 황사의 발원지와 이동경로 및 한반도 황사의 일반적인 특징(Chung, 1990; 1992) 등이 밝혀졌다.

본 연구는 1993년에 발생한 황사에 대한 사례분석을 통하여 한반도에 유입한 황사의 기원지와 그 양을 계산하였다. 한반도에 유입하는 황사량은 자연적인 오염물로서 그 규모가 크고 대기오염 물질의 장거리 수송에 큰 의미가 있다. 여기서는 구름사진과 조종사 보고(PIREP), 황사 발생시 TSP(total suspended particulates) 농도 측정에 의한 한반도 황사 유입량을 정량적으로 계산(estimate) 하였다. 추가적으로 1994년에 발생한 황사는 항공 관측으로 실시 되었으며 여기 포함 시켰다.

2. 분석자료

1993년 봄철 서울에는 여섯 차례에 걸쳐 15일간의 황사현상이 관측 되었다. 그림 1은 기상청이 관측한 1979~1994년의 황사 발생일이다. 이 기간동안 1993년은 1979년 이래 기상청의 황사 관측자료 중 최고 많은 황사 일수를 보인다. 통계자료는 적지만, 한반도의 황사는 1989년 이후 점차 증가 추세에 있다.

황사의 관측은 대개 목측에 의존하기 때문에 관측자에 따라 다소의 견해차가 존재하며, 일몰 후나 강수 현상시의 관측은 거의 불가능하다. 그러나 항공기상에서는 정밀한 관측장비를 이용하여 정확한 시정을 관측하고 있다. 여기에서 조사한 황사의 지속시간은 항공기의 활용관계로 청주 공군기상대의 관측자료를 이용했다.

황사현상은 그 범위가 광범위하며 대개 한반도 전체의 중관적인 기상상황에 관계가 있으므로 중부 지방에 위치한 청주 관측치를 그 대표값으로 사용

하였다. 황사기간중 강수후에도 황사가 계속되었으면 강수시간도 황사지속 시간으로 잡았고, 강수 현상 후 황사가 없었다면 강수시작 시간을 황사가 그치는 시간으로 정하였다. 표 1은 1993년 한반도에서 관측된 황사의 관측시간과 지속시간이다.

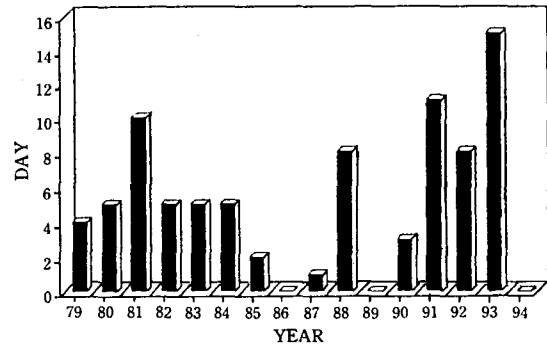


Fig. 1. Number of days with yellow sand observed in Korea(1979~1994).

Table 1. Duration of yellow sand phenomenon observed at Chongju in 1993.

Date	Time(hour)	Duration(hour)
4.1~2	4.1. 11~4.2. 03	16
4.3~4	4.3. 12~4.4. 13	25
4.7~8	4.7. 06~4.8. 12	30
4.23~24	4.23. 11~4.24. 16	29
4.27	4.27. 10~24	14
5.8~10	5.8. 11~5.10. 24	61

위성 사진에서 황사를 분석하기 위해 GMS-4 가 시광선영역의 구름사진과 NOAA 위성사진을 이용했다. 황사가 관측된 23일, 24일, 27일의 조종사보고는 사전의 계획과 협의에 따라 청주공군기지에서 경험이 많은 10명의 조종사에게 특별히 요청하여 보고 받았고, 비행 종료후 면담을 통하여 다시 조사 하였다. Trajectory 분석은 미공군에서 12시간마다 제공하는 오산 상층기류에 대한 backward trajectory를 이용했다. 황사기간중 대기부유분진량(TSP)은 환경처에서 측정하고 있는 전국 자료와 충북 청원군 한국교원대학교 내에서 매일 관측한 자료를 이용했다. 기상관측자료와 일기도는 공군기상대의 자료를 사용했다.

3. 분석 및 논의

그림 2는 1993년 4월 17일부터 5월 1일까지의 청주 공군기상대에서 관측한 수일간의 기상 요소이

다. 이 기간동안(14일) 몽고와 중국의 건조지대에서 발달하여 우리나라를 통과한 저기압은 모두 7회였다. 비교적 빈번한 기압골 통과로 흐린 날씨와 강수, 뇌우가 있었다.

22일 몽고 남쪽에 전선을 동반한 강한 저기압이 점차 발달하면서 야간에 한국을 통과하였고, 19시 이후 뇌우를 동반한 강수가 있었다. 한랭전선이 통과했던 24시경에는 청주에 50~60 kts의 돌풍이 불었다. 23일에는 중국대륙의 이동성 고기압 영향권에서 맑은 날씨를 보이며 한반도 전역에 짙은 황사가 발생하였다. 야간에 들어서 저기압이 다시 발해만 남쪽을 통과하며 청주와 중부지방에 뇌우를 동반한 토우가 발생되었다. 24일에는 중국 화남지방의 고기압 세력이 장출하면서 25~30 kts의 강한 바람과 함께 황사와 낮은 구름이 끼었으며 오후 늦게 황사현상은 소멸되었다. 25일에도 강한 바람(20~30 kts)이 계속해서 불었고 오후 늦게 남 만주지방에 위치한 기압골의 영향으로 약한 강수가 있었다. 26일에도 30~45 kts의 강풍이 불었고 강수를 동반하지 않은 기압골이 통과 하며 그 후면에서 27일에 황사가 다시 나타났다.

이 기간동안 황사가 나타난 시기에는 고도 3~6km 상층풍이 50~100 kts로서 비황사의 평균풍보다 2~3배 강하게 불었고 270도 방향의 서풍이었다. 특히 한반도에 황사가 나타나기 하루 전날인 22일과 26일의 6km 상층 풍속은 평상시보다 3배 정도 급격히 증가 했음을 보인다(그림 2a).

기압의 변화는 고·저기압의 통과와 크게 관련되어 있다. 18일부터 기압은 점차 상승하다가 22일 이후 기압이 하강하여 23~24일 최저 기압을 나타냈다. 25~26일 남쪽 고기압의 영향으로 약한 기압 상승을 보이다가 27, 28일 기압은 다시 하강하여 두번째 최소 기압을 보였다. 황사현상은 이 기간동안 최저 기압이 나타난 시기와 일치하며 기압이 상승하기 시작할 때 특히 강한 황사를 보였다(그림 2b).

4월 20일 지상 일기도에서 994hPa의 강력한 저기압 중심이 몽고 북쪽 러시아(50N, 115E) 근처에서 강수없이 발달하였다. 이때 저기압 남쪽(42N, 120E)인 고비사막 남동부와 황하 상류지역에서 강한 먼지 폭풍이 일기 시작했다. 22일에 지상 저기압은 상층 강풍대의 남하와 함께 크게 남동진하여 996hPa의 저기압 중심이 발해만에 위치하고, 한반도 북부지방에는 강수현상이 있었다. 황사는 남쪽으로 쳐지면서 화북지방까지 나타나며 남으로는 제주도에서도 관측되었다. 23일에 강한 한랭전선이 한반도를 통과하고, 그 후면의 고기압 영향권에서 맑은 가운데 중·남부지방에 짙은 황사현상이 있었다.

이때 인공위성사진에서는 중국 동해안지방과 한반도 남부에 걸쳐 황사 belt가 나타났다.

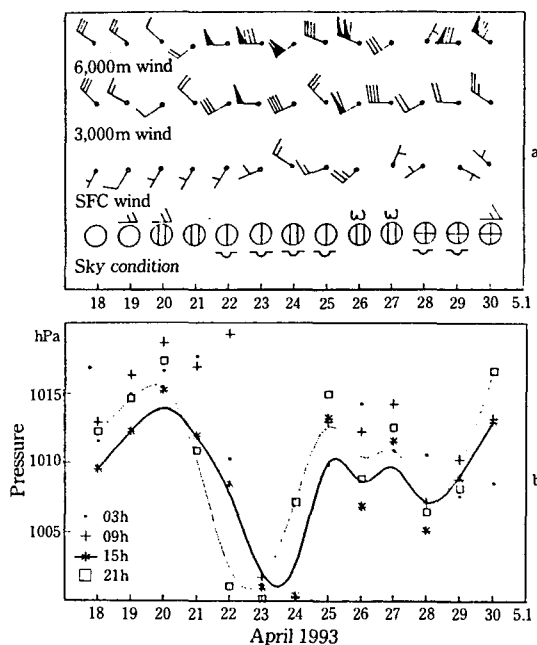


Fig. 2. Pressure, upper wind and sky condition observed in 18 April~1 May 1993.

그림 3은 지상일기도에서 황사관측에 의한 경로를 추적한 것이다. 20일 1200GMT에는 강수를 동반하지 않은 저기압 후면의 고비사막 남동부와 황하 상류 건조지대(42N, 120E)에서 먼지폭풍이 일기 시작했다. 22일에는 상층 강풍대의 남하와 함께 황사도 남하 하였고 제주도까지 관측되었다. 23일에는 한반도 남부 전역과 산둥반도, 그리고 상하이에 걸쳐 동서로 황사 belt가 형성되었다. 발생초기(21일)에는 3km 상층풍이 29020kt의 북서풍이 불면서 남동진 하였고, 한반도에 황사가 내습한 23, 24일에는 상층풍이 25030kt의 남서풍으로 바뀌면서 황사구름은 북동진 하였다. 한반도의 23~24일 발생한 황사는 주로 남부지방에서 강하게 나타났고 지속시간은 29시간이었다. 이 경우 황사의 기원지는 고비사막 남동부 사막지대와 황하 상류 건조지대(42N, 120E)이고 한반도까지 이동하는데 48~60시간이 경과했다.

4. Backward trajectory 분석

Trajectory 분석은 상층기류가 이동하는 경로를 추적하는 것인데 공기 입자가 지나는 정확한 자취

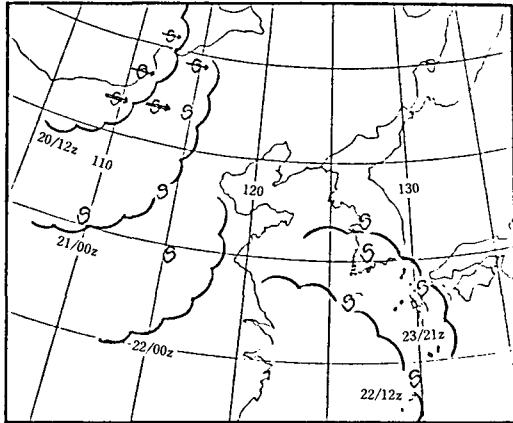


Fig. 3. A chart showing the movement of the forwarding edge of a dust cloud from 20 April 1993.

를 분석하는 것은 아니고, 일반적인 기류의 흐름 자취를 묘사하는 방법이다. trajectory에는 후진형(backard)과 전진형(forward)이 있으며 후진형은 먼지나 기류의 발원지를 추적할 수 있게 하고, 전진형은 먼지의 침전 예상지역을 추정하게 한다. 미공군이 제공하는 trajectory 분석은 등압면(isobaric)에서 지균풍을 계산하여 수행된다(허성현, 1983). 이론적으로 지균풍은

$$V_g = -\frac{1}{fg} \frac{dP}{dn}$$

여기서 g 는 그 지역의 중력값, f 는 Coriolis 힘, dp/dn 는 기압 경도력으로 기압과 기온 등의 기상관측 자료를 이용하여 각 지점의 지균풍을 구할 수 있다. 매 시간 관측된 기압과 온도 등의 관측 자료를 객관 분석한 후 127km grid system 위의 지균풍을 계산하여, 계산된 지균풍과 실제 바람과의 경험적 차이를 보정한후 grid상에 시간별로 연결하면 trajectory가 완성된다. 이와 같은 방법으로 미 공군에서는 오산 상층기류에 대한 backward trajectory를 매일 두번씩(0000 GMT, 1200 GMT) 분석하고 있다.

그림 4는 4월 21~24일간의 오산 상층기류에 대한 backward trajectory이다. 매 6시간 간격으로 48시간 전까지의 상층 850hPa와 700hPa, 500hPa의 backward trajectory를 동북아시아 지도상에 표시 하였다.

21일과 22일 500hPa, 700hPa의 상층기류는 48시간 전에 Taklamakan 사막과 몽고 남동부에서 기원하여 36시간 전에는 고비사막을 통과했고, 황하 상류 건조지역을 지나 한반도에 유입했다. 850 hPa

의 기류 역시 48시간 전 몽고 남쪽에서 기원하여 고비사막과 황하 건조지대를 지나 한반도에 유입되었음을 보인다(그림 4a와 그림 4b). 한반도에서 황사가 관측된 23일 trajectory에서도 700hPa와 500hPa 상층기류는 모두 고비사막과 황하 상류가 그 기원임을 보인다. 그러나 850hPa 기류는 몽고 동부지방에서 기원하여 내몽고를 지나서 한반도 북쪽에 유입되었다(그림 4c). 황사가 소멸된 24일에는 500hPa와 700hPa, 850hPa 상층 기류는 한반도의 북쪽인 북만주와 몽고 동쪽에서 유입되었다. 이것은 24일에 기온이 5~6도 하강하였고, 북서풍이 유입했던 사실과 일치한다 (그림 4d).

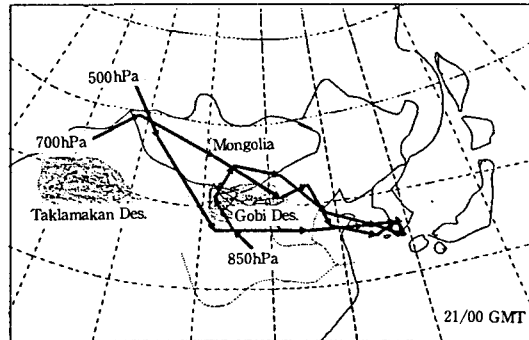


Fig. 4a. Backward trajectories starting at Osan, central Korea.

Each arrow denotes the order of 06 hours beginning from the end point at 0000 GMT, on 21 April 1993.

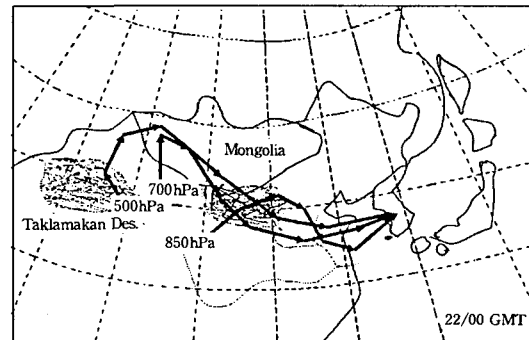


Fig. 4b. Same as Fig. 4a, but for 22 April 1993.

황사기간중 상층기류의 trajectory 결과 21~23일, 한반도에 유입된 기류는 몽고 남부 건조지대인 고비사막 남동부와 황하 상류 건조지대가 그 기원이었고, 이것은 지상일기도에서의 황사 이동경로와 일치한다.

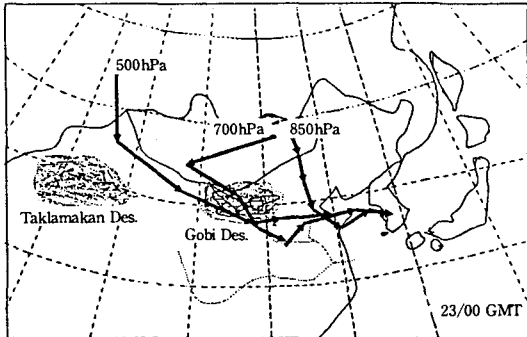


Fig. 4c. Same as Fig. 4a, but for 23 April 1993.

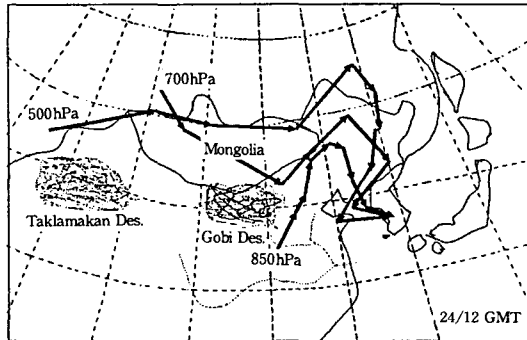


Fig. 4d. Same as Fig. 4a, but for 24 April 1993.

5. 위성사진 관측

인공위성 구름 사진을 통해서도 중국 내륙 지방에서 발생한 초기 단계의 황사를 관측할 수 없었다. 그 이유로는 황사구름이 해상보다는 대륙에서 잘 나타나지 않는다는 점(Murayama, 1988)과 황사 발원지의 강수 현상으로 많은 구름량 때문이었다. 그러나 23, 24, 26일은 맑은 하늘을 보여 가시광선 영역의 인공위성 구름사진에서 황사구름이 잘 나타났다. 황사가 구름사진에서 분석 되려면 맑은 날씨에서 그 층이 충분히 두꺼워야 하고, 황사구름과 비구름이 서로 혼합되지 않아 구분될 수 있어야 한다.

위성사진 관측은 제한된 파장영역에서 관측되며 정지위성인 GMS-4는 상공 35,900km에서 0.55~0.75 μ m(VIS)와 10.5~12.5 μ m(IR)의 파장대를 사용한다. 극궤도위성인 NOAA는 약 850km의 저고도에서 가시광선 영역인 CH1(0.55~0.68 μ m)과 CH2(0.73~1.1 μ m)를 이용하며 적외선 영역에서는 CH3(10.5~11.5 μ m)과 CH4(11.5~12.5 μ m)를 사용한다. 여기서는 매시간마다 수신되는 GMS-4 가시광선 영역 사진과 하루에 2~3회로서 불규칙하게 수신되지만 GMS보다 훨씬 저고도에서 분석되는

NOAA 위성사진을 분석하였다. 가시사진(VIS)은 반사도(albedo)에 의해 사진의 밝기가 좌우되며 적외선사진(IR)은 온도에 의해 밝기가 결정된다. 따라서 VIS 사진은 하층운에서 밝게 나타나고, IR 사진은 온도가 낮은 상층운에서 비교적 밝게 나타난다. 보통 황사와 같이 대기 하층에서 나타나는 먼지 구름은 IR 사진 보다 VIS 사진이 효과적이다.

5.1 4월 23~24일 구름사진

그림 5a는 23일 정오(0300 GMT)의 GMS-4 가시광선 영역의 위성사진이다. 사진의 황사구름은 한반도에 유입되기 시작한 초기의 황사 band로서 그 경계가 뚜렷하고, 얇은 층이나 안개처럼 나타나고 있으며 한반도 남부지방과 제주도, 일본 서해안까지 광범위하게 분포하고 있다. 그림 5b는 구름사진을 재분석한 그림이다. 황사구름은 "x x x"로 표시되어 있다. 중국 동해안 지방에 황사가 광범위하게 나타나며 서해남쪽해상과 한반도 중 남부지방, 남해와 제주도 멀리 일본 서해안까지 뚜렷한 band로서 잘 나타나고 있다. 대체로 맑은 하늘을 보였던 한반도 남쪽과 남서해상에서는 황사구름이 뚜렷하게 분석되고 있으나 중국내륙에서는 해상보다 잘 나타나지 않고, 많은 구름들로 인해 황사구름과 비구름의 경계를 구분하기가 어렵다. 위·경도 5도 간격의 각 grid를 미세한 subgrid로 재구성하여 자세히 분석한 결과 한반도의 부근에 있는 황사 band의 수평범위는

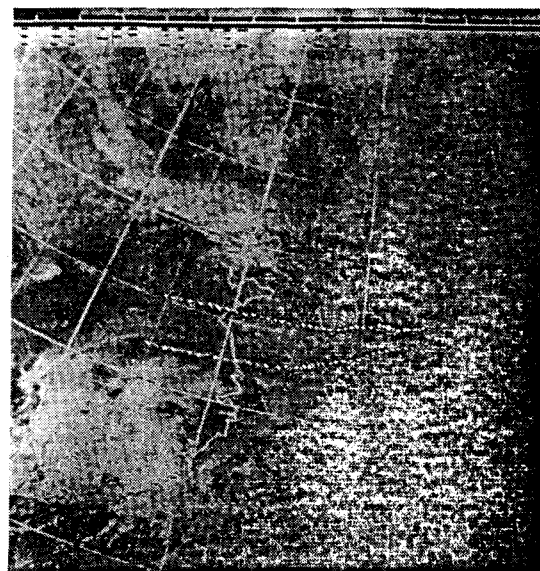


Fig. 5a. VIS image of GMS-4(0300 GMT, 23 April 1993).

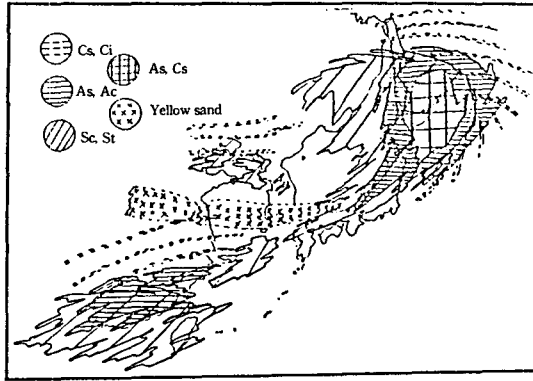


Fig. 5b. Detailed analysis of satellite image.

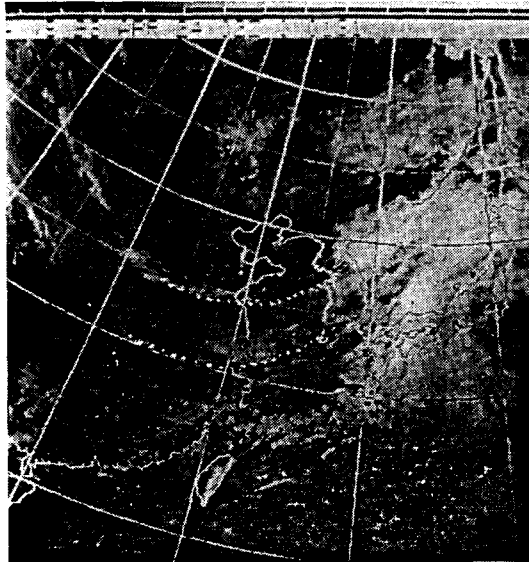


Fig. 6. VIS image of GMS-4(0200 GMT, 24 April 1993).

0.4×10⁹km²으로 계산되며 한반도에 유입되는 입되는 폭은 위도거리 300 km 정도이다. 그림 6은 하루 뒤인 24일 11시(0200 GMT)의 사진인데 황사 band의 경계는 전일보다 흐려져서 뚜렷하지 않고, 점차 옆게 흩어지는 경향을 보인다. 황사구름은 상층의 남서 기류에 따라 위도 1~2도 북동진하여 남한의 전역을 덮고 있다.

5.2 4월 27일 구름사진

26일에는 발해만과 서해상이 맑은 날씨를 보여 구름사진에서 황사구름이 잘 분석 되었다. 그러나 한반도에 황사가 내습했던 27일에는 점차 흐려지는 하늘상태 때문에 황사구름을 위성사진에서 구별할

수 없게 되었다. 그림 7은 26일 10시(01 GMT)의 GMS-4 위성사진이다. 만주지방을 지나는 전선성 저기압 후면에서 황사구름 band가 뚜렷한 경계를 갖고 나타나고 있다. 4시간 후인 14시에는 황사구름 사행의 폭이 깊어지면서 120km 남동진 하였다(그림 8). 이때 상층풍은(10,000 feet) 북서풍이 40~50 kts로 비교적 강하게 불었으며 26일 오후부터는 남남서 계열로 풍향이 바뀌었다.

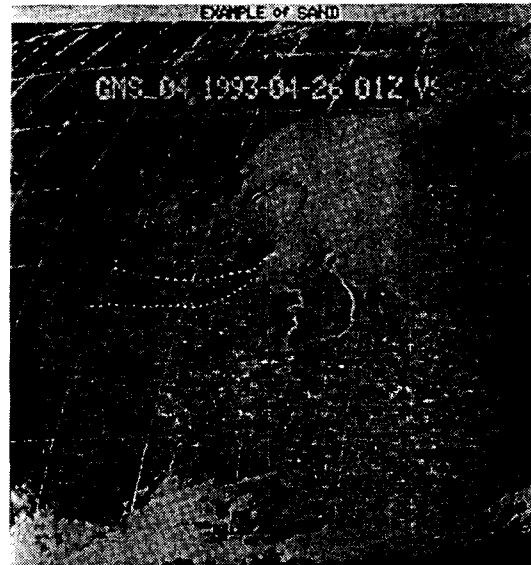


Fig. 7. VIS image of GMS-4(0100 GMT, 26 April 1993).



Fig. 8. VIS image of GMS-4(0500 GMT, 26 April 1993).

그림 9a는 27일 아침 8시 NOAA 가시광선 영역의 위성 구름사진이다. GMS보다 훨씬 근접된 사진이며 26일보다 황사구름의 경계가 불확실하고 넓게 흩어졌다. 한반도 내륙보다 부산 앞바다에서 황사구름은 잘 나타나고 있으며 26일 0100 GMT와 비교하면 22시간동안 16kts의 속도로 남동진 하였다. 27일 구름사진을 재분석 하면(그림 9b) 황사구름의 면적은 약 $0.25 \times 10^4 \text{km}^2$ 이다. 한반도에 유입한 폭은 위도거리 200km 정도이다.

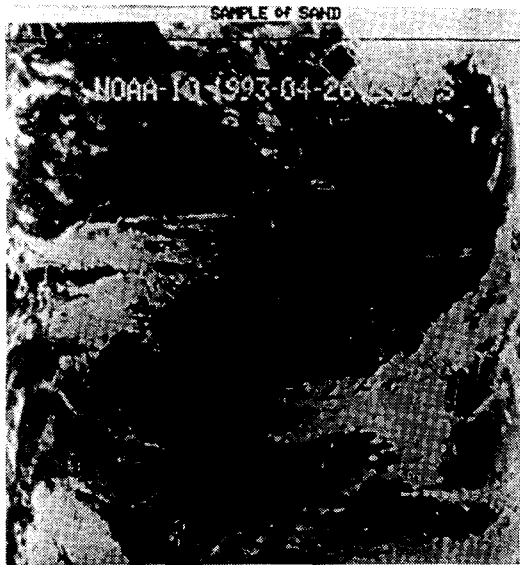


Fig. 9a. VIS image of NOAA(2300 GMT, 26 April 1993).

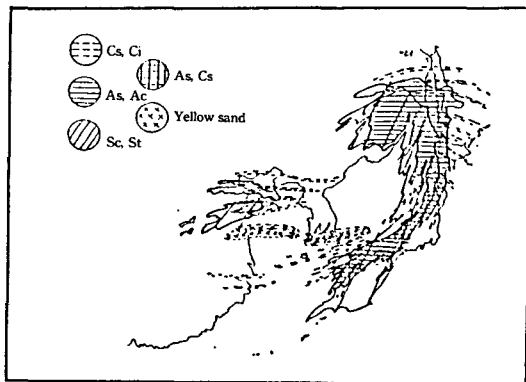


Fig. 9b. Detailed analysis of satellite image.

6. 조종사 보고 (PIREP)

상공에는 적절한 시정도표가 없어서 시정을 측정하기는 근본적으로 곤란하다. 그러나 항공기상에서

는 조종사의 오랜 경험과 과학적인 계기측정 방법으로 공중에서 시정을 관측할 수 있다. 항공기상에서는 관습적으로 feet와 mile을 사용한다. 공중에서 조종사에 의한 시정관측은 함께 비행하는 항공기가 있을 경우 매우 정확한 시정관측이 가능하다. 함께 비행하는 비행기와 의 거리는 레이더로 쉽게 알 수 있어서 시정도표가 결정되고 정확한 시정을 측정할 수 있다. 공군의 비행임무에서 단독 비행은 드물며 특히 청주의 공군기지에서는 최신에 전투기의 첨단 장비와 오랜 경험의 조종사를 보유하고 있어서 조종사의 기상보고는 그 신뢰성이 매우 높다. 황사 기간중 10명의 조종사에게 자세한 공중의 계기 시정관측을 요청하여 비행중에 보고를 받았고, 착륙후에도 면담을 통하여 다음의 PIREP을 얻었다.

- (가) haze와 황사는 색깔로 구분할 수 있으며 haze는 푸연 우유빛을 띠고 황사는 황토색 및 흙갈색을 띤다.
- (나) 황사는 구름과 비슷하게 덩어리로 나타난다.
- (다) haze는 균질하게 분포하며 그 경계가 뚜렷하여 가상 수평선을 가진다.
- (라) 황사는 불균질하게 분포하며 그 경계가 뚜렷하지 않아 가상 수평선이 없어서 비행착각(vertigo)을 일으킨다.
- (마) 장출하는 고기압의 패턴에 따라 황사현상은 매우 다르게 나타난다. 맑은 날은 경계가 뚜렷하고 보통 황사 band를 발견할 수 있으며 흐린 날은 경계가 불분명하고 haze와 섞인다.
- (바) 황사 현상시 주·야간 시정의 변화가 있다.

황사 현상시 주·야간 시정변화의 이유로는 주간에는 태양에 의한 산란효과가 커서 시정이 나쁘게 보이며 야간에는 지상의 불빛과 활주로의 불빛 때문에 멀리까지 보여서 시정이 좋게 보인다. 또한 주야간 시정의 변화에 대한 더 큰 원인은 대기 상태의 변화 때문이다. 야간중에는 약한 육풍과 지면 냉각에 의한 대기 안정으로 생물권 고도가 하강하여 황사 입자를 지면에 침전시키는 대기 상태가 된다. 반면, 낮에는 해풍과 함께 강한 편서풍이 있고 대류도 활발하여 상공의 시정은 다시 악화된다.

표 2는 4월 23일 11시와 15시, 4월 24일 10시의 조종사 보고이다. 청주에서 황사가 관측되기 시작한 23일 11시에는 2,000~8,000 feet 상에 3~4mile의 황사가 보고되었다. 15시에는 지상(SFC; surface)에서 3,000 feet까지는 4~5mile이고, 그 이상의 고도인 3,000~10,000 feet에서는 2~3mile로 강한 황사가 나타났다. 10,000~15,000 feet에서는 5mile의 시정을 보였고, 그 이상에서는 시정이 매우 좋았다. 참고로 23일 15시에 구름의 높이와 상층풍을 관측

하기 위해 띄운 PIBAL은 8,000 feet에서 공이 없어져서 수직 시정은 약 1.5mile 임이 밝혀졌다.

Table 2. PIREP on dust cloud and visibility during 23~24 April 1993.

Time	Site	Altitude (feet)	Visibility (mile)
23 April 0200 GMT	Kim-hae	2,000~14,000	3~4
	Kwang-ju	2,000~11,000	3~4
		11,000~16,000	6
	Su-won	SFC~12,000	3~4
	Chong-ju	2,000~ 8,000	3~4
		2,000~13,000	3
23 April 0600 GMT	Won-ju	1,000~15,000	2~3
	Tae-gu	SFC~ 3,000	4~5
		3,000~10,000	2~3
		10,000~12,000	5
	Chong-ju	SFC~ 3,000	4~5
		3,000~10,000	2~3
		10,000~15,000	5
24 April 0100 GMT	Seoul	SFC~ 2,000	3
		2,000~10,000	4~5
	Sang-dong	SFC~ 8,000	6
24 April 0100 GMT		8,000~17,000	4~5
	Tae-gu	4,000~14,000	4~5

4월 23일의 황사는 남부지방에서 강하게 관측되었고, 그 수직분포는 주로 0.6~3km에서 시정이 5km 이고 생물권 고도인 지표면 부근과 상층 3~4.5km 에는 시정이 6~8km로서 황사가 약한 것으로 보고 된다. 24일에 서해안은 고도 3km 이하에서 시정이 6~7km로서 전일보다 좋아졌고, 동부와 남부지방은 5.5km까지 황사층의 고도가 높아졌으며 시정은 6~7km로서 황사가 약해졌음을 보인다. 황사의 주 층은 한반도에 유입되기 시작한 초기보다 시간이 지나면서 고도가 점차 높아졌고, 시정은 좋아졌다. 각 지역의 조종사 보고를 정리하면 그림 10과 같다.

표 3은 4월 27일의 PIREP이다. 4월 27일에는 이동성 고기압의 영향권에서 맑은 날씨를 보였으나 짙은 황사 현상으로 일부 비행이 취소 될 정도였다. 청주상공 1,500~5,000 feet에서는 10시에 6mile의 약한 황사 현상을 보이다가 12시에는 3,000~17,000 feet의 상공에서 2~3mile의 짙은 황사가 있었다. 12시 경에는 중부지방에서 최고로 강한 황사 시간대였으며 15시 이후로는 10,000 feet 상공의 중층운이 overcast되면서 황사의 PIREP 관측이 불가능해졌다.

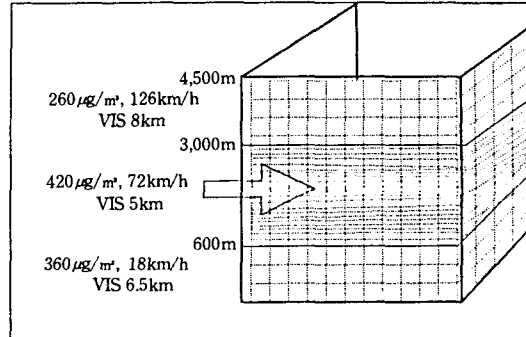


Fig. 10. A schematic diagram showing upper wind, concentration of TSP and visibility reported by PIREP.

Table 3. PIREP on dust cloud and visibility during 27 April 1993.

Time	Site	Altitude (feet)	Visibility (mile)
27 April 0100 GMT	Chong-ju	1,500~ 5,000	6
	Su-won	SFC~ 1,500	4~5
		1,500~15,000	3
		15,000~20,000	6
	Tae-gu	SFC~ 5,000	4~5
		5,000~10,000	2~3
27 April 0300 GMT		10,000~15,000	3~4
	Kwang-ju	5,000~10,000	2
		10,000~15,000	6
	Chong-ju	SFC~ 3,000	4
27 April 0300 GMT	Kim-hae	3,000~17,000	2~3
	Su-won	3,000~17,000	3~4
		1,500~15,000	3~4

27일의 황사는 중북부 지방에서 점차 남부지방으로 남동진하였다. 5,000 feet 이하에서는 4~5mile 이었고 5,000~15,000 feet까지는 2~3mile, 15,000~20,000 feet에서는 5mile이었다. 23일~24일의 황사층과 비교하면 대체로 황사의 주층은 3,000~5,000 feet 더 올라갔고, 황사 범위는 적었으나 비교적 더 강한 황사 현상을 보였다.

7. 황사기간중 시정과 대기부유분진량 (TSP 농도)

시정과 대기부유분진량(TSP)의 관계를 알기 위하여 황사기간동안 환경처에서 관측한 서울의 TSP 농도와 15시 시정을 조사하였다. 그림 11은 1988~1993년 황사기간 동안의 TSP 농도와 시정(0600 GMT)의 관계로서 서로 역비례로 나타났고, 점선으로 표시하였다. 시정이 5km이면 황사농도는 750µg

/m³이고 8km이면 555µg/m³이다. 표 4는 그림 11에서 구한 각 시정거리와 TSP 농도를 정리하였다.

Table 4. The relationship between visibility and concentration of TSP.

Visibility(km)	3	5	7	9	11
TSP(µg/m³)	830	750	610	500	350

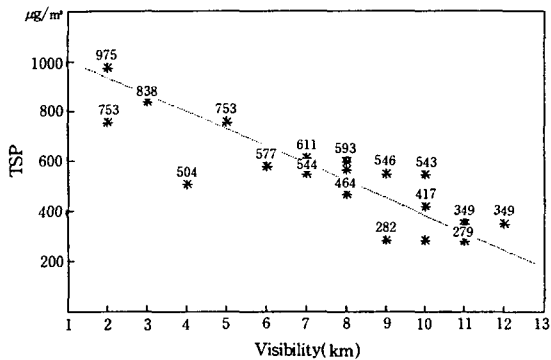


Fig. 11. The relationship between visibility and concentrations of TSP during the yellow sand phenomena occurred in 1988~1993.

1993년 황사기간동안 서울지역의 환경처에서 관측한 대기부유분진량중 일 최고값에 대한 평균값을 분석하였다. 1993년 황사기간중 부유먼지의 평균농도는 537.8µg/m³이었고, 23일과 24일은 282~771µg/m³, 27일에는 103~554µg/m³이었다(그림 12).

신은상 김희강(1992)에 의하면 1988~1991년 황사 기간중 부유먼지의 평균 농도는 578µg/m³이었고, 이 값은 황사가 목측되지 않은 평상시의 평균

농도 194µg/m³ 보다 약 3배 많은 값이다.

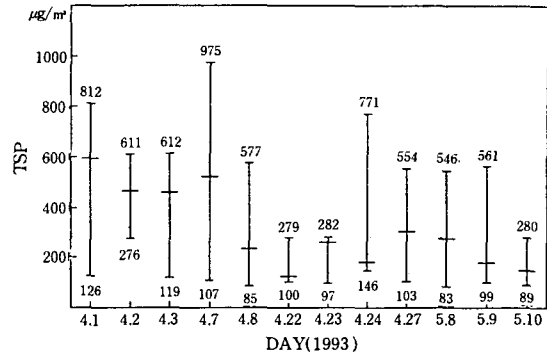


Fig. 12. The concentration of TSP in the period of yellow sand(April~ May 1993).

8. 황사량 계산

표 5는 1993년 4월 23~24일 황사량 계산을 위한 조종사 관측에 의한 각 고도별 시정과 평균 풍속, 황사의 지속시간, 황사의 유입폭, 대기부유먼지량, 구름사진에서의 황사 분포 등에 관한 자료이다.

4월 23~24일의 황사기간 동안 청주 공군 조종사 보고에 의하면 지상에서 0.6km 고도까지는 시정이 6.5km이다. 그림 11의 시정과 TSP 농도에서 시정이 6.5km이면 TSP 농도는 645µg/m³이었다. 비행사시에도 평균 TSP 농도가 194µg/m³이었으므로 순수한 황사에 의한 TSP 농도는 451µg/m³으로 계산할 수 있다. 4월 23~24일 청주지역에서 황사 지속시간은 29시간이었으며 지상일기도에서 황사가 관측된 한반도의 위도거리 300km이었다.

Table 5. Estimation of total atmospheric loadings with the data of yellow sand in 23~24 April 1993.

Altitude (km)	Visibility (PIREP, km)	TSP- VIS (µg/m³)	Mean wind speed(km/h)	Duration (hour)	Width (km)	TSP conc. (µg/m³)	GMS- 4 (VIS)
0~0.6	6.5	645(451)	18	29	300	282~771 (88~577)	0.4 * 10⁴km²
0.6~3	5.0	750(556)	72				
3~4.5	8.0	555(361)	126				

이 기간동안 환경처에서 실제 관측된 TSP 농도는 282~771µg/m³이고, 비행사시의 TSP 농도를 고려한다면 순수한 황사에 의한 부유분진량은 88~577µg/m³임을 알 수 있다. 구름사진에서 분석된 황사의 분포 면적은 0.4×10⁴km² 이상이다. 또한 고도 0.6~3km가 주 황사의 흐름 고도였으며 4.5km 이상에서는 황사가 관측되지 않았다. 표 5의 자료를 이용하여 1993년 4월 23~24일 한반도의 남한에 유입된 총 황사량을 계산하였다(표 6).

Table 6. Estimation of total atmospheric loadings for the case of 23~24 April 1993 with satellite image, PIREP, and concentrations of TSP.

GMS-4 VIS			0.2~1 * 10⁴ ton
PIREP	SFC~0.6km	0.04 * 10⁶ ton	15 * 10⁶ ton
	0.6~3km	0.84 * 10⁶ ton	
	3~4.5km	0.6 * 10⁶ ton	

구름사진에서 한반도와 그 주변의 황사구름 분포 면적은 $0.4 \times 10^6 \text{km}^2$ 이었고, 이 기간중 환경처에서 실제 관측 한 TSP 농도는 282~771(88~577) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으므로 황사가 고도 4.5km까지 균질하게 분포한다고 가정하면 총 황사량은 $0.2 \sim 1 \times 10^6 \text{ton}$ 이다. 그러나 이 계산값은 황사 먼지량이 고도에 따라 그 밀도 분포가 다르다는 사실이 PIREP에 의해 확인되었고, 황사가 비교적 약한 지역은 구름사진에서 분석되지 않았으므로 이러한 요인을 고려하여야 한

다. 한편, PIREP에 의해서 각 고도에 따른 황사의 분포(공중시정)를 알 수 있었고, 조사된 공중 시정(표 3)과 TSP량의 관계(그림 11과 12)에서 평균적인 고도별 TSP량을 계산하고, 상층풍과 유입폭을 고려 한다면 4월 23~24일 한반도에 내습한 황사의 총량은 $1.5 \times 10^6 \text{ton}$ 임이 계산된다. 4월 23~24일에 한반도의 남한지역에 떠있던 총 황사량은 최소한 $1.5 \times 10^6 \text{ton}$ 이상이다.

Table 7. Estimation of total atmospheric loadings with the data of yellow sand in 27 April 1993.

Altitude (km)	Visibility (PIREP, km)	TSP- VIS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mean wind speed(km/h)	Duration (hour)	Width (km)	TSP conc. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NOAA (VIS)
SFC~1.5	7	610(416)	32	10	200	103~554 (0~360)	$0.2 * 10^6 \text{km}^2$
1.5~4.5	4	790(596)	56				
4.5~6	8	555(361)	48				

표 7은 1993년 4월 27일의 황사량 계산을 위한 자료이다. 구름사진에서 황사의 분포면적은 $0.2 \times 10^6 \text{km}^2$ 이고, 27일 측정된 대기부유분진량은 103~554 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 황사층의 고도가 6km까지라고 한다면 유입한 황사량은 $0.5 \times 10^6 \text{ton}$ 이다. 정확한 계산을 위해 PIREP 관측에 의한 고도별 대기부유분진량의 분포를 고려하고 구름사진과 상층풍, 일기도 자료를 이용하여 계산하면 $0.3 \times 10^6 \text{ton}$ 이다(표 8).

Table 8. Estimation of total atmospheric loadings for the case of 27 April 1993 with satellite image, PIREP, and concentrations of TSP.

NOAA VIS	1 layer		$0.5 * 10^6 \text{ton}$
PIREP	SFC~1.7km	$0.05 * 10^6 \text{ton}$	$0.3 * 10^6 \text{ton}$
	1.7~5km	$0.19 * 10^6 \text{ton}$	
	5~6.7km	$0.06 * 10^6 \text{ton}$	

구름사진에서 황사 분포 면적을 계산하고, 황사가 관측된 고도까지 대기부유분진 농도가 균질하게 분포한다고 가정해서 계산한 구름사진 이용법과 PIREP에 의한 고도별 황사 농도 분포를 고려하여 계산한 PIREP 이용법에서 계산된 황사량은 서로 차이가 있었다. 4월 23~24일의 황사량 계산에서는 구름사진을 이용하여 개략적으로 계산한 황사량이 PIREP을 이용하여 좀 더 과학적이고, 자세하게 계산한 양보다 적게 추정되었다. 반면, 27일의 경우에는 구름사진에 의한 황사량이 PIREP을 이용하여 계산한 양보다 더 많이 계산되었다. 이것은 27일에

는 황사의 고도 분포가 6km까지 비교적 높게 나타났는데 구름사진 이용법에서는 황사 먼지 농도가 이 고도까지 일정하다고 가정 하였으므로 PIREP에 의해서 각 고도에 따른 실제의 대기부유분진 농도를 고려한 경우보다 많은 양으로 계산되었다.

Arao와 Ishizaka(1986)는 일본 상공에 유입하는 황사 총량이 $4.1 \sim 5.3 \times 10^6 \text{ton}/\text{year}$ 으로 계산했다(표 9). 본 연구에서는 23~24일에 $1.5 \times 10^6 \text{ton}$, 27일에 $0.3 \times 10^6 \text{ton}$ 이 유입된 것으로 계산되었다. 1993년 4월 23~24일에 한반도의 남쪽(33~36N)에 유입한 황사량은 최소한 $1.5 \times 10^6 \text{ton}$ 이상이며, 1993년에 한반도의 황사 발생은 6회 이상이었으므로 $9 \times 10^6 \text{ton}$ 이상이 황해와 그 동쪽에 침전된 것으로 추정된다.

Table 9. Total atmospheric loadings of yellow sand dust estimated by recent investigations.

Author	Total mass ($* 10^6 \text{ton}$)	Remark
Iwasaka et al., 1983	1.63/1 case	April 1979, Japan
Arao and Ishizaka, 1986	4.1~5.3/year	Japan
Present study	1.5/1 case	23~24 April 1993, Korea
	0.3/1 case	27 April 1993, Korea

9. 1994년 황사의 관측

황사의 발원지로 잘 알려진 중국의 북동부 건조지대와 고비사막 근처에서는 1994년 4~5월의 봄

철 기간 동안 7회의 강한 먼지폭풍 또는 황사가 1~3일간 지상일기도에서 관측되었다. 그러나 한반도의 기상관측소에서는 한 차례의 황사현상도 나타나지 않았다고 기록되었다. 보통 황사의 관측은 목측에 의존하기 때문에 “인식 할만한” 황사에 의한 시정 감소가 초래될 때만이 황사현상으로 관측하고 있다. 여기서 목측에 의한 시정 관측은 “인식 할만한”이라는 다분히 주관적인 면을 내재하고 있다.

이미 1993년 황사 발생에 대한 사례분석을 통하여 주 황사의 이동 고도는 2,000~15,000 feet임을 밝혔다. 1994년에는 지상(SFC)에서는 황사현상으로 관측 할만한 비교적 뚜렷한 황사가 한반도에 유입하지 않았다고 기상청기록에 보고 되었다. 그러나 상층의 항공기 조사 결과, 한반도 상공에서는 세차례의 황사가 유입되었음이 비행기에 부착된 radar 등 정밀계기를 이용 황사의 시정이 측정되었다(표 10). 중국대륙에서 황사가 관측된 이후 2~3일 후인 4월 8, 13일과 5월 20일에 서해상과 한반도 상공에서 황사가 관측되었다. 4월 8일에는 황사의 주 이동고도가 10,000~18,000 feet로서 다소 높은 편이었고, 황사 먼지 구름내의 시정은 3mile이었다. 반면, 4월 13일에는 6,000~15,000 feet 상에서 먼지 구름대가 존재했고 공중시정은 4mile이었다. 이날 충북 청원군에서는 TSP 농도가 평소보다 배가 많은 247 µg/m³까지 올라갔다. 결국 한반도에서 황사현상이 기상관측소에 의해 관측되지 않았다고 하더라도 상층의 황사 주 흐름대에서는 황사의 유입이 있고, 상층의 황사는 지상에서 기록된 황사보다 훨씬 많이 나타난다.

Table 10. PIREP on dust clouds and visibility in April~May 1994.

Time	Site	Altitude (feet)	Visibility (mile)
8 April 0100 GMT	Su-won	SFC~10,000	7
		10,000~18,000	3
	Chong-ju	SFG~8,000	7
		8,000~15,000 over	3~4 7
13 April 0600 GMT	Kwang-ju	SFC~1,500	7
		1,500~10,000	5~6
	Chong-ju	SFC~6,000 6,000~15,000	6 4
20 May 0100 GMT	Jung-won	SFC~10,000 10,000~17,000	7 4~5

10. 결 론

1993년 4월 23~24일의 황사에 관한 사례분석과 공군 조종사기상보고, 황사기간 중 대기부유분진량(TSP) 농도 분석, 구름사진 분석, 미공군 trajectory 분석 결과 다음의 결론을 얻을 수 있다.

1) 4월 23~24일 한반도에 유입된 황사는 그 원지가 고비사막 남동부와 황하 상류 건조지역이다. 강수없이 발달한 저기압 후면에서 돌풍과 함께 발생하여 남동진 하다가 남서기류를 타고 한반도에 유입 되었으며 한반도까지 이동하는데 48~60시간이 걸렸다.

2) 조종사기상보고(PIREP)에 의하면 황사는 haze와 비교하여 색깔이 황토색 및 흙갈색이며 불균질하게 분포하고, 상공에서 그 경계가 뚜렷하지 않아서 가상 수평선이 없으므로 비행착각(vertigo)을 일으킨다. 또한 황사기간에는 주 야간 시정의 변화가 크게 나타난다. 4월 23~24일의 황사 기간 동안 상공 2,000~10,000 feet 고도에서 황사가 강했고, 시정은 2~3mile이었다. 15,000 feet 이상에서는 황사가 관측되지 않았다. 27일에는 황사의 주층이 3,000~5,000 feet 더 높게 분포하여 5,000~15,000 feet에서 2~3mile로 나타났고, 20,000 feet까지 황사층이 분포했다.

3) 4월 23~24일의 기상위성사진(GMS-4 VIS)에서 하층운과 비슷한 형태로 뚜렷한 경계를 갖고 황사가 분석 되었다. 시간이 경과하면서 그 경계는 흐려지고, 옅어지면서 내륙보다 해상에서 잘 나타났다. 구름사진에서 황사의 분포 면적은 0.4×10⁶km² 이상이다. 구름사진과 TSP 농도의 분석, 지상일기도, PIREP의 결과 23~24일에 한반도에 유입된 총 부유 황사량은 1.5×10⁶ton으로 계산된다.

4) 황사구름이 26일 발해만에 나타나기 시작하여 한반도 남쪽에 유입한 27일에는 NOAA의 가시영역 구름사진에서 분석되었다. 27일에 유입한 황사량은 0.3×10⁶ton 이었다.

5) 1994년에 한국의 기상관측소에서는 황사가 관측되지 않았지만 상층에서 항공기 관측 결과 한반도에는 세차례의 황사 유입이 있었음이 측정되었다. 즉 지상에서는 황사로서 인식 할만하지 못하더라도 상층의 주 흐름대에서는 황사의 유입이 빈번하게 있을 수 있다.

본 연구에서는 한반도에 유입하는 황사량을 정확하게 계산하기 위해 구름사진 분석과 조종사의 관측보고를 이용하여 황사의 수평적인 분포면적과 수직적인 밀도분포(표 6과 8)를 계산하였다. 이러한 시도는 좀더 많은 사례에 대해 수행되어야 하겠고 위성사진 분석과 PIREP관측, 더 나아가서 항공기

를 이용한 직접 측정 및 Lidar 관측 등 객관적이며 과학적인 연구가 계속 되어야겠다.

감 사

본 연구(K-CCAR-RP-943)는 과학기술처의 특
정연구개발사업 연구과제 (자원71436-98)로 수행
되었으며 과기처의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 신은상·김희강(1992) 서울시에서의 대기 부유 먼지
에 대한 황사의 영향. 한국대기보전학회지 8,
52~57.
- 정용승(1990) 대기 오염의 장거리 이동 사례 및 황
사 발원지 추적. 대기오염의 장거리 이동과
산성비 강하에 대한 연구(II). 국립환경연구
원, 195~253.
- 허성현(1983) Trajectories를 이용한 강수 및 구름
예보. 공군 기상연구 9, 97~128.
- Arao K. and Ishizaka Y.(1986) Volume and mass
of yellow sand dust in the air over Japan as
estimated from atmospheric turbidity. *J.
Meteor. Soc. Japan* 64, 79~93.
- Chung Y. S.(1986) Air pollution detection by satel-
lites. The transport and deposition of air pol-
lutants over ocean. *Atmos. Envir.* 20, 619
~630.
- Chung Y. S.(1992) On the observations of yellow
sand (dust storms) in Korea. *Atmos.
Envir.* 26A, 2743~2749.
- Iwasaka Y., Minoura H. and Nagaya K. (1983)
The transport and spacial scale of Asian
dust-strom event of April 1979. *Tellus*, 35B,
189~196.
- Iwasaka Y.,(1987) Chemical-physical processes of
"Kosa" particle surface during long-range
transport. *Tenki*, 34, 179~182.
- Kobayashi A., Hayashida S., Okada K. and
Iwasaka Y.(1985) Measurements of the po-
larization properties of Kosa (Asian dust-
strom) particles by a laser radar in spring
1983. *J. Meteor. Soc. Japan*, 63, 144~149.
- Murayama N.(1988) Dust cloud "KOSA" from the
east Asian dust storms in 1982~1988 as ob-
served by the GMS Satellite. *Meteor. Satel-
lite Center Tech. Note No.20*, 97.