

1993년 4월 22-24일에 관측된 황사현상에 대한 종관분석

이 재 규

기 상 청
(1993년 8월 24일 접수)

Synoptic analyses of the Yellow Sand Events observed over the Korean peninsula during 22-24 April, 1993

Jae-Gyoo Lee

Korea Meteorological Administration
(Manuscript received 24 August 1993)

Abstract

The Yellow Sand Events observed over the Korean peninsula during 22-24 April, 1993 were examined using the synoptic data and GMS visible image to identify the transport path of the Yellow Sand and the main factor governing the duration of the Yellow Sand phenomenon. The 850 hPa convergence chart and the 700 hPa trajectory analyses of the air mass laden with Yellow Sand particles suggested that the Yellow Sand particles observed over Korea were probably transported from the Gobi Desert and the Loess Plateau. The duration of the Yellow Sand Events was about 35-40 hours rather shorter than normal as the high pressure system centered near the Mongolia region moved rapidly toward the Yellow Sea, which drove away the Yellow Sand particles over the Korean peninsula toward the Japan Islands, furthermore the low-level stratification of the air mass over the Korean peninsula showed the unstable atmospheric condition leading to atmospheric diffusion of the particles. The trajectory analyses and the GMS visible image indicated that the long-range transport of the air mass laden with the Yellow Sand particles of this case was more dependent on the 700 hPa air flow than on the 850 hPa air flow.

Key Words : yellow sand, synoptic data, air flow, convergence, trajectory, Gobi Desert, Loess Plateau, stratification, transport.

1. 서 론

건조기인 봄철에 황사현상이 발생하는데 1993년 봄철 동안에는 황사발생횟수가 예년보다 많은 다섯차례였으며, 황사가 나타난 기간도 약 14일 정도로 기상청의 관측이래 최장기간으로 기록되었다. 이 황사현상은 강수량이 적은 봄철에 사막

이나 황토지대에서 한랭전선을 동반한 저기압의 발생이나 통과시, 때로는 저기압이나 한랭전선과 관계없이 강한 기압경도력에 동반된 강풍이 지속적으로 나타났을 때 기류의 수렴이나 지형적인 효과에 의한 난류로 인하여 대기상층으로 올라간 다량의 미세한 토양입자가 공중에 비앙하여 하늘 전체를 덮으면서 시정이 악화되고 하늘 색깔이

황갈색으로 변하며 이 미세입자들이 지상으로 침강하는 현상이다. 종종, 이 황사입자들은 종관규모의 기류에 편승하여 보다 멀리 수송되어 하와이상공에서도 관측이 되기도 하여 황사입자들은 대기순환을 연구하는데 있어 추적자(tracer)로서 역할을 한다. Shaw(1980)는 하와이에서 광학소산계수(Optical extinction coefficient)를 측정하여 이 황사입자들이 밀집해 있는 고도와 그 두께를 계산하기도 하였다. 또한 이러한 미세입자들이 장거리 수송이 되면서 깊은 바다의 침전물로 유입됨에 따라 해양학이나 지구화학의 분야에서도 관심을 갖게 되었다. Duce *et al.*(1980)는 북태평양 해저의 침전물 안에 석영과 운모와 같은 특정의 광물성분들이 분포해 있음에 따라 이러한 물질이 편서풍에 편승하여 아시아대륙에서 유입된 것이 아닌가하여 유적선분석을 행하였는데 그 결과를 보면 매년 봄철에 중국대륙에서 발생하는 황사관련 부유물질이 북태평양쪽으로 유입됨에 따라 이 물질의 농도가 증가된 것이라고 분석하였다. Bertrand와 Baudet(1973) 그리고 Carlson과 Benjamin(1980)은 사하라사막에서 발생하는 모래바람(Dust storm or Sand storm)에 대한 연구에서 대기 중에 다량으로 공급되는 모래가루가 지구대기의 태양에너지 수지(budget)나 빙정핵 농도에 커다란 영향을 끼친다는 결과를 밝혔다.

Kai *et al.*(1988)는 Nakamura (1987)에 의하여 개발된 오염물질 추적모델(Pollutant tracer model)을 이용한 3차원 수치모의 실험을 통하여 황사의 발원지를 추정하였으며, 주요 황사층은 2개의 밀집된 층으로 나뉘어 존재함을 보였다. 최근, 일본에서는 원격탐사기술(Remote sensing technique)을 이용하여 황사현상을 연구한다. 예로서, Murayama(1988)는 정지기상위성(GMS)에서 관측된 영상자료를 이용하여 황사의 이동상황을 분석하였고, Iwasaka *et al.*(1983), Iwasaka(1987), Kai *et al.*(1988)는 Lidar관측을 이용하여 후방산란계수(back-scatter coefficient)를 측정하여 황사입자가 밀집된 고도를 밝혔다. 우리나라에서는 윤용황(1990)이 20년 간의 통계자료를 통하여 황사가 주로 발생하는 월과 출현일수 그리고 황사의 발원지 및 이 발원지로부터 우리나라에 도달하는

데 소요되는 시간, 그리고 우리나라에서의 황사지속시간에 관한 통계적인 연구를 하였다.

이번 연구는 토우현상(낙하하는 빗방울 속에 황사와 관련된 미세입자들이 부착되어 지상으로 낙하하는 현상)을 동반한 황사에 대한 사례연구로서 주요 기간은 1993년 4월 22일부터 24일 까지이다. 특히 이 사례연구에서는 종관분석자료 및 정지기상위성의 가시(VIS)영상 자료를 이용하여 종관기상학적으로 황사수송 및 황사지속시간에 관련된 주요 사항에 관하여 언급하고자 하며, 대기환경학의 큰 요인으로 작용하는 황사에 대한 기상학적인 이해를 높이고자 한다.

2. 자료

연구에 이용된 자료는 기상청에서 제공한 서울과 광주의 지상관측자료, 광주의 고층관측자료, 지상일기도, 상층일기도, 보조선도(850hPa 유선분석도(Streamline analyses)와 850hPa 수렴도(Convergence Chart)) 및 정지기상위성 영상자료이며 기간은 1993년 4월 19일부터 25일까지이다. 가시영상자료와 지상일기도는 06UTC(Universal Time Coordinated)의 자료이며 그 외의 자료는 00UTC의 자료이다. 여기서 가시영상자료와 지상일기도를 06UTC의 자료로 선택한 이유는 06UTC이면 지방시로 15시경에 해당하여 태양의 가시광선에 민감한 가시영상에서 황사영역이 잘 나타나는 시간대이기 때문이고 이 때 식별된 황사영역을 지상일기도에 나타난 황사지역과 비교하기 위해서이다.

현재, 정지기상위성 GMS-4호는 IR(적외선: 10.5-12.5μm)과 VIS(가시광선: 0.5-0.75μm)파장대를 이용하여 구름영상을 얻게 되는데 IR은 물체의 온도에 민감한 반면 VIS은 물체의 반사도(Reflectivity)에 민감하다. 황사의 경우 황사입자에 의한 후방산란(backscattering)효과로 반사도가 높아져 가시영상에서 보다 잘 나타난다. 따라서 본 연구에서는 가시영상자료를 이용하였다. 기상청의 보조선도 작성시 이용되는 격자점자료에

대하여 살펴보면, 일본기상청의 전구스펙트럼모델(Global Spectrum Model)에 의하여 산출된 12시간 예상자료를 초기 추정값으로 이용하며 여기에 자료의 질이 검증된 관측자료를 추가하여 단변수 최적내삽법(Univariate Optimum Interpolation)으로 객관분석하여 생산된 보다 질이 좋은 격자점자료이다. 보조선도 가운데 수령도는 $-(\partial u / \partial x + \partial v / \partial y)$ 를 계산한 값이다.

3 기상상태 및 분석

황사 및 도우현상이 1993년 4월 22일 경에 서울 및 일부 지역에서 관측되면서 23-24일 경에는 전국적으로 본격적인 황사현상이 관측되었다. 지상실황은 서울과 광주의 관측자료를 이용하였고, 대기의 성층상태를 알기 위해 광주의 단열선도를 이용하였다. 또한 황사를 담고 있는 기단의 움직임을 알기 위해 유적선 분석을 하였다. Fig. 1은 황사의 발원지인 사막지역과 황토지대를 나타낸다. 황토고원 및 황토퇴적지대는 푸석푸석한 silt(모래보다 고운 침적토)로 구성되어 있어 그 입자 크기가 아주 작으며, 타클라마칸사막 및 고비사막은 자갈사막으로 그 입자들이 다소 굵다고 알려져 있다(Zhao, 1986; Kai et al., 1988).



Fig. 1. Geographical locations of deserts and loess-lands in the Asian Continent

3.1. 지상관측

서울에서의 사상현상을 22일 11시 20분부터 관

측되기 시작하여 17시 55분까지 계속되었으며, 17시 06분에 뇌우현상이 관측되면서 23시 50분까지 산발적으로 뇌전현상과 함께 소낙성 강수가 발생하였다. 이에 따라 서울 상공에 있던 황사입자들은 벗방울에 부착되어 지면에 낙하하는 토우·현상이 발생하였다. 23일 10시 30분에 다시 서울에서 황사현상이 관측되기 시작하여 평균시정이 6km로 제한을 받았으며 황사현상은 24일 18시 26분까지 지속되었으며, 참고로 24일 01시 05분에서 05시 45분까지 뇌전과 함께 강수가 관측되었다.

한편, 광주에서는 23일 09시 25분부터 24일 18시 40분까지 황사현상이 관측되었으며 서울과 달리 농전 빛 강수현상은 관측되지 않았다.

32 단열선도 분석

대기의 성층구조를 분석하기 위하여 4월 22일부터 황사현상이 종료된 25일 00UTC까지의 광주의 단열선도를 Fig. 2와 Fig. 3에 각각 나타내었다. 단열선도 상에서 실선은 표준대기 감율곡선 (Standard atmosphere lapse rate)을 나타낸다.

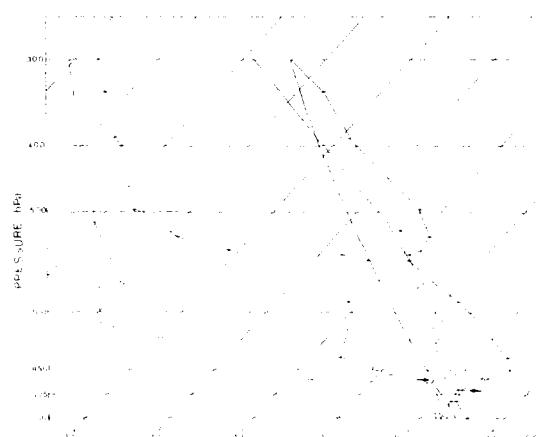


Fig. 2. Temperature (solid lines) and dew-point soundings (dashed lines) on a Skew T-log P sounding diagram for 00 UTC 22 April 1993 (marked by the dot) and 00 UTC 23 April 1993 (marked by $_$) at KwangJu, respectively. The sounding curve without dots stands for Standard atmosphere lapse rate. Horizontal arrows refer to the base of the main inversion.

22일 00UTC의 광주의 단열선도를 보면 730hPa 이상의 고도에서 대단히 건조함을 알 수 있는데 이는 황사와 관련된 대류의 건조한 기단이 유입되고 있음을 보여주고 있으며, 지상부터 887hPa 사이에서는 기온과 이슬점온도와의 차이가 0.5-2 °C로 습하여 하층운이 있음을 보여 주는데 이 하층운에 의하여 광주에서는 황사를 관측하지 못할 가능성이 있음을 알 수 있다. 지표 부근의 습윤한 층과 730hPa 부근의 건조공기 사이의 수직순환을 억제하는 전선역전층이 880-863hPa 고도층에 위치하고 있다.

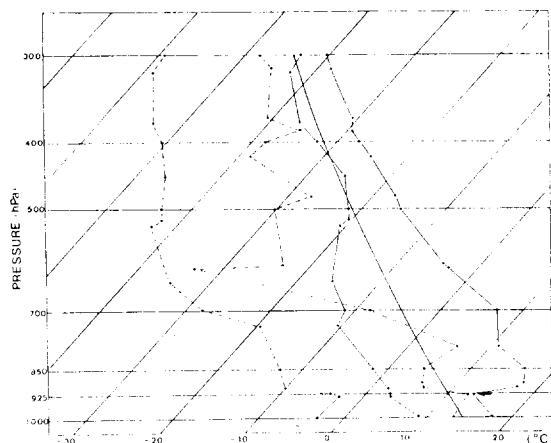


Fig. 3. As in Fig. 2, except for 00 UTC 24 April 1993 (marked by the dots) and UTC 25 April 1993 (marked by —).

23일 00UTC에는 동해 면바다에 중심을 둔 저기압에서 뻗어나온 기압골이 우리나라에 영향을 미침에 따라 이 시각의 단열선도에서도 대기하층(942-875hPa)이 습윤하고, 전선역전층은 908-875hPa 고도층에 나타나고 있으며, 875-850hPa의 고도층은 침강에 의한 역전층이 존재하고 있고 건조층은 주로 815-700hPa 사이의 층으로 제한되어 있다. 그런데 대기하층에서의 역전층의 존재는 그 윗층의 건조한 기단에 동반된 황사관련 입자들과 그 아래층에 위치한 기단(상대적으로 불안정함)과의 상호순환을 억제하고 차단하는 덤개역할을 하여 850hPa 고도보다 위에 있는 황사입자들의 확산(diffusion)이 억제되었음을 보여준다. 또한 570hPa 부근으로 두께가 얇은 역전층이 존

재하고 있다.

24일 00UTC의 단열선도를 분석하면 침강역전이 925-890hPa의 고도층에 위치하고 있으며 건조층은 주로 500과 700hPa사이에 위치하고 있다. 그런데 이 역전층의 두께는 23일 00UTC의 역전층의 두께와 비교하여 보면 다소 줄어들었음을 알 수 있다. 여기서 이 침강역전은 이동성고기압 하에서 공기가 침강하여 이루어진 것이 아니라 활강전선(Kata front)형의 한랭전선상에서 한기쪽의 침강으로 역전층이 이루어진 것이다. 지상일기도를 참조하면 24일 00UTC에서 12UTC에 걸쳐 화북에 위치한 고기압이 남하함에 따라 한랭전선이 우리나라를 지나 남동진하여 일본열도쪽으로 이동한 사실에서 알 수 있다.

황사현상이 종료된 25일 00UTC의 단열선도에서는 24시간 전과 비교하여 보면 지상부터 925hPa 고도 사이에서는 약 10°C, 900-700hPa 고도층에서는 약 15°C 내외의 기온하강이 나타났는데 이는 몽고지방에 중심을 둔 고기압이 빠르게 남동진하여 동중국해상까지 진출함에 따라 대기의 기온이 하강한 것으로 우리나라 상공에 위치한 기단의 성질이 전날과는 다른 기단임을 알 수 있으며, 이 기단의 영향을 받고 있는 광주의 경우 지상에서 737hPa 사이의 대기층은 기온감율이 커서(조건부불안정 상태) 대기가 불안정한 상태에서 대기확산이 활발하여 황사관련 부유물질이 빨리 확산될 조건이었음을 보여준다. 뒷 절의 지상일기도 및 보조선도분석에서 언급하겠지만 황사지속 시간에는 황사입자를 담고 있는 기단의 이동과 관련된 종관기류의 영향이 일차적으로 중요하며, 부차적으로 대기의 성층상태(안정도)도 관련이 있음을 보여준다.

3.3 가시(VIS)위성영상과 지상일기도 및 보조선도 분석

태양광선이 황사입자에 의해 직접 반사되는 에너지와 산란되어 반사되는 에너지로 인하여 알베도(Albedo)가 다소 증가되어 가시영상에서는 황사영역이 다소 뿐연 모습으로 나타난다. Murayama (1988)의 연구에 의하면 초기의 발달하는 황사의

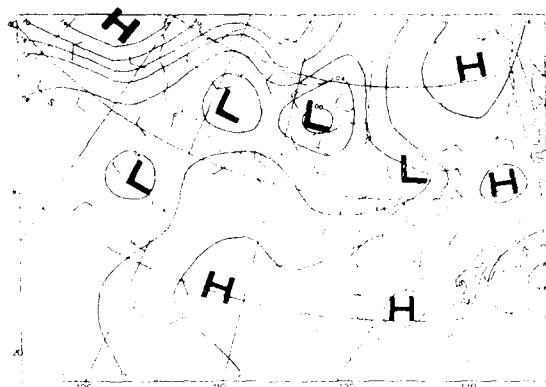


Fig. 4a. Surface chart for 06 UTC 19 April 1993. The S stands for the location where yellow sand is observed.

경우에는 비교적 분명한 경계를 갖고 줄모양의 혼적을 갖는 뿐만 모습으로 하층운이 퍼져있는

것처럼 보이고 황사가 약화된 경우에는 보다 흐리고 뿌옇게 나타나며 보다 얇어질 경우 가시영상에서도 잘 나타나지 않는 경우가 많고, 해양 상공에 있는 황사는 육지상공에 있는 황사보다 잘 식별된다고 하였다.

Fig. 4a는 타클라마칸사막 부근에서 처음으로 황사현상이 관측되었던 1993년 4월 19일 06UTC의 지상일기이다. 황사가 관측된 곳 부근에는 10kts 내외의 바람이 관측되고 있으며 북서쪽으로 등압선이 조밀하게 밀집되어 있다. 타클라마칸사막 부근은 19일 06UTC의 가시영상(Fig. 4b)의 범위에서 벗어나 확인할 수 없었고 황사현상이 없을 때의 중국내륙의 모습을 보여준다. 19일 00UTC의 850hPa 유선도(Fig. 5)를 보면 처음 황사현상이 나타난 40°N , 88°E 부근으로 수렴현

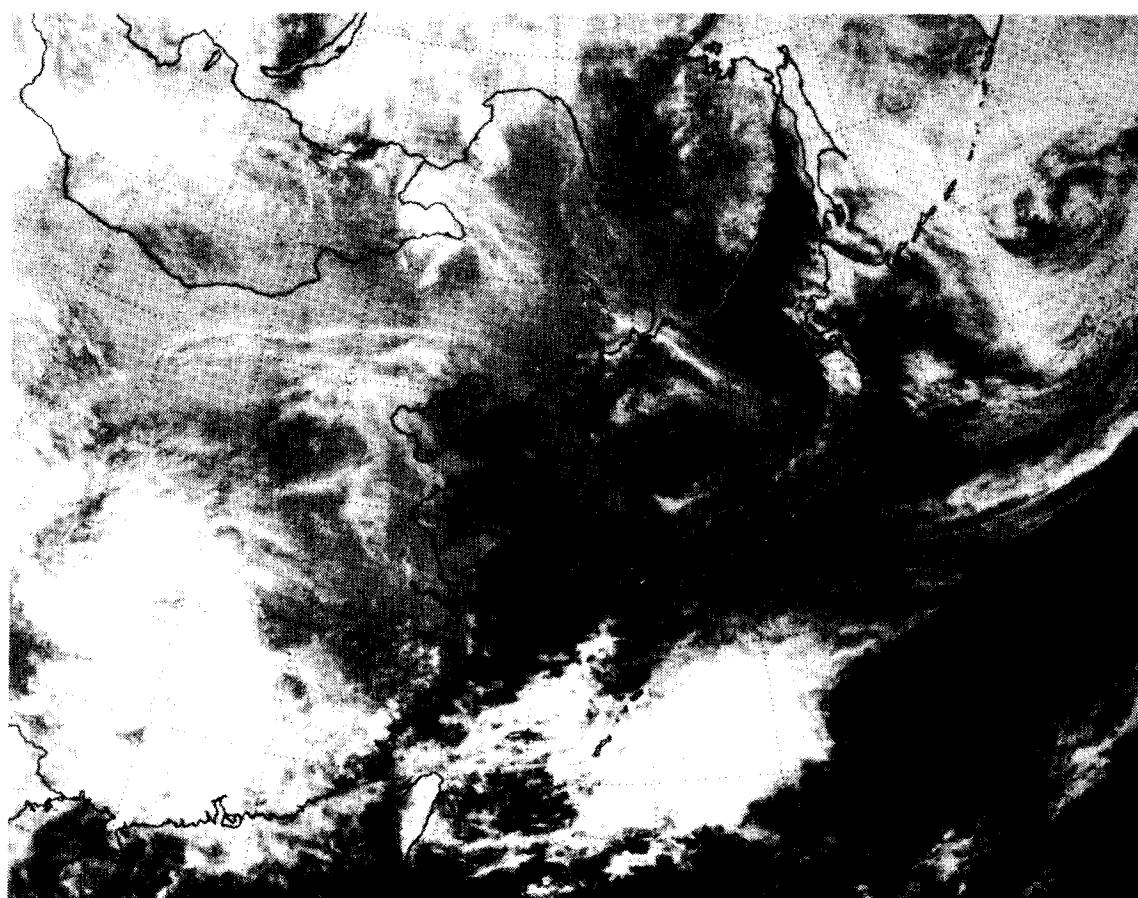


Fig. 4b. GMS Visible image for 06 UTC 19 April 1993.

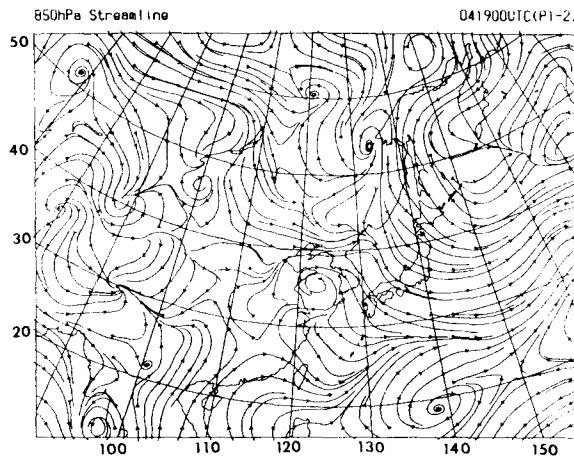


Fig. 5. 850hPa streamline analysis for 00 UTC 19 April 1993.

상이 잘 나타나 있고, 850hPa 수렴도(Fig. 6)에서 대웅하여 나타나 있어 이 지역에서는 하층기류의 수렴으로 사막의 건조한 미세입자들이 불려 올라가기 시작하였음을 알 수 있다.

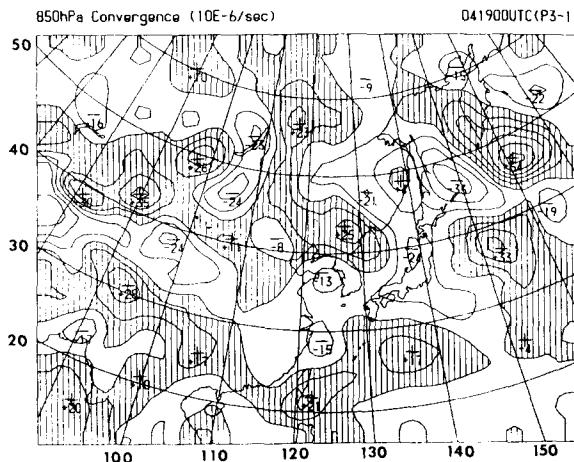


Fig. 6. 850hPa convergence chart for 00 UTC 19 April 1993. Hatching den positive (convergence) areas. Units are $10^{-6}/\text{s}$.

20일 06UTC의 지상일기도(Fig. 7a)를 보면 황사현상이 관측되는 지역은 기압골 후면에 해당하며 그 뒤로 고기압이 장출하면서 북서풍계열의 바람이 20-25kts로 강하게 불고 있다. 같은 시각의 가시영상(Fig. 7b)을 보면 황토 고원지대와 고비사막 부근으로 적운 및 상층운의 구름열이 위치하며, 그 구름열 부근에 황사현상으로 뿐연 회색의 영역이 식별된다. 20일 00UTC의 850hPa 수

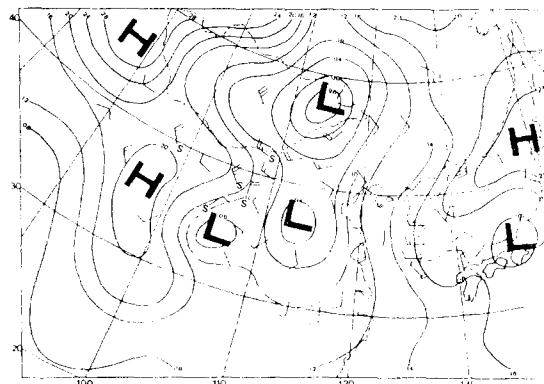


Fig. 7a. As in Fig. 4a, except for 06 UTC 20 April 1993.

렴도(Fig. 8)를 보면 황사현상이 관측되는 기압골 후면과 수렴영역이 잘 일치하고 있다. 따라서 이 황사영역에서는 대기하층에서의 수렴에 따른 상승기류의 영향으로 미세입자들이 대기의 상공으로 지속적으로 상승하고 있음을 알 수 있다. $50^{\circ} \text{N}, 110^{\circ} \text{E}$ 부근에는 저기압계와 관련하여 최대 수렴역이 위치하고 있다.

21일 06UTC의 지상일기도(Fig. 9a)를 보면 기압골 부근과 그 후면에 해당하는 고기압 전면에서 황사현상이 관측되고 있으며 고비사막과 황토고원지대 부근에서는 황사가 약화되어 지상에서는 관측되지 않고 있다. 그 시각의 가시영상(Fig. 9b)에서는 120°E 부근을 중심으로 36°N 에서 50°N 부근으로 기압골에 대웅하는 구름대가 위치하고 있으며, 그 후면인 고비사막, 황토고원, 황토퇴적지대 및 화중내륙지역에 걸쳐 흐리고 뿐연 황사영역이 산재해 있다. 21일 00UTC의 850hPa 수렴장(Fig. 10)에서는 황토고원지대의 서쪽으로 수렴역이 위치하며, 황사가 관측되는 지역의 대부분이 발산역에 위치하고 있으며, 하층기류의 수렴 지역($42^{\circ} \text{N}, 122^{\circ} \text{E}$ 부근)이 기압골의 위치와 대웅하여 나타나 있다. 12시간 후인 21일 12UTC의 수렴도(그림 생략)에서는 다시 고비사막과 황토고원지대 부근으로 강한 수렴역이 광범위하게 발달하고 있어 이 부근의 미세입자들이 대기중으로 상승하기에 좋은 조건을 갖추고 있다.

22일 06UTC의 지상일기도(Fig. 11a)를 보면 고비사막에서 시작하여 황토고원지대를 지나 화중

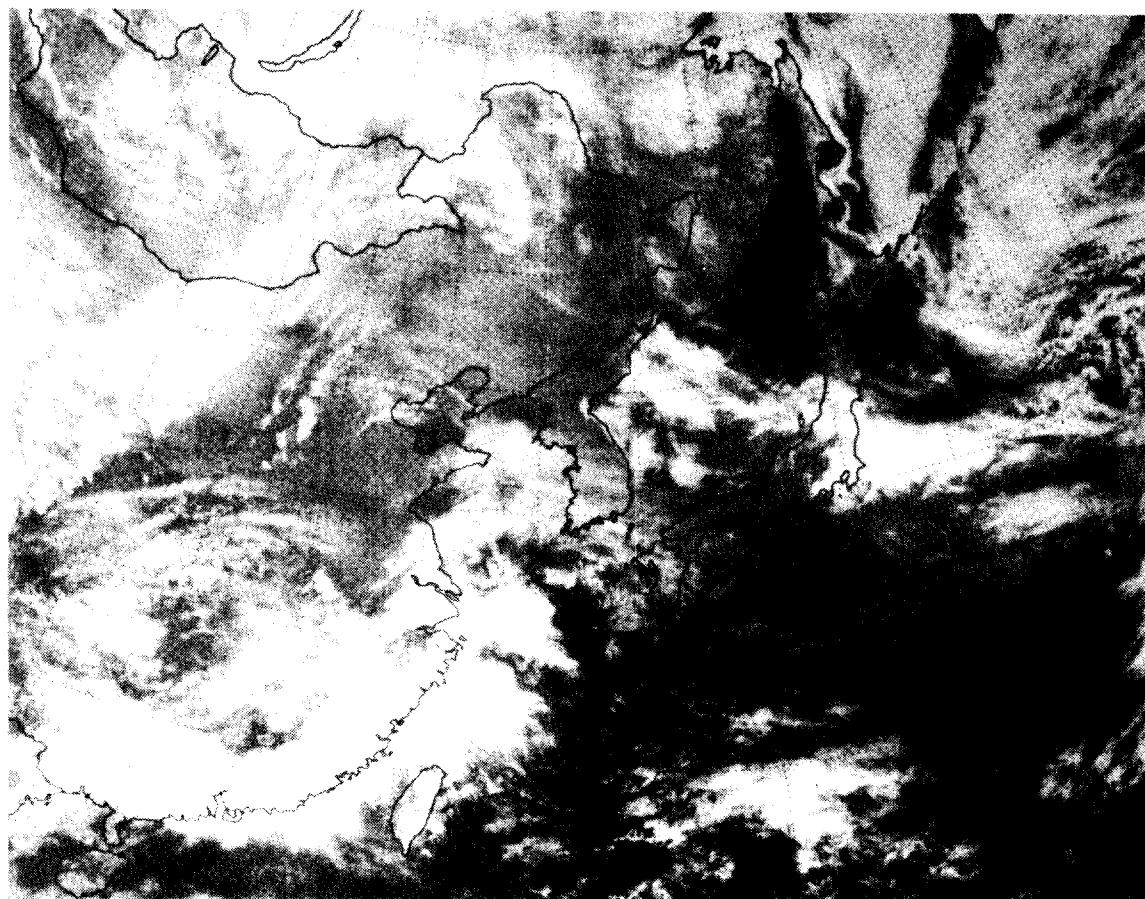


Fig. 7b. As in Fig. 4b, except for 06 UTC 20 April 1993.

지방을 거쳐 서울 및 제주도까지 황사가 관측된 것을 알 수 있으며, 고비사막부근과 황토고원지대

는 21일경에 황사현상이 약화되었던 지역인데 이 날 다시 황사가 발생하였음을 알 수 있다. 21일에 중국내륙에 위치하였던 고기압은 약화된 채 북동

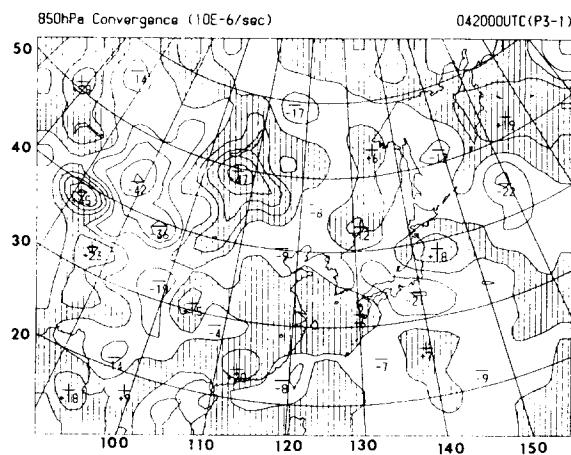


Fig. 8. An in Fig. 6, except for 00 UTC 20 April 1993.

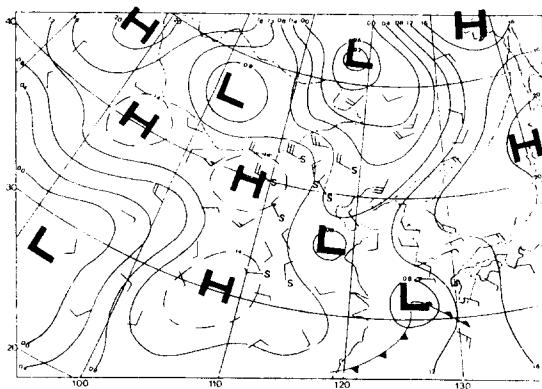


Fig. 9a. As in Fig. 4a, except for 06 UTC 21 April 1993.

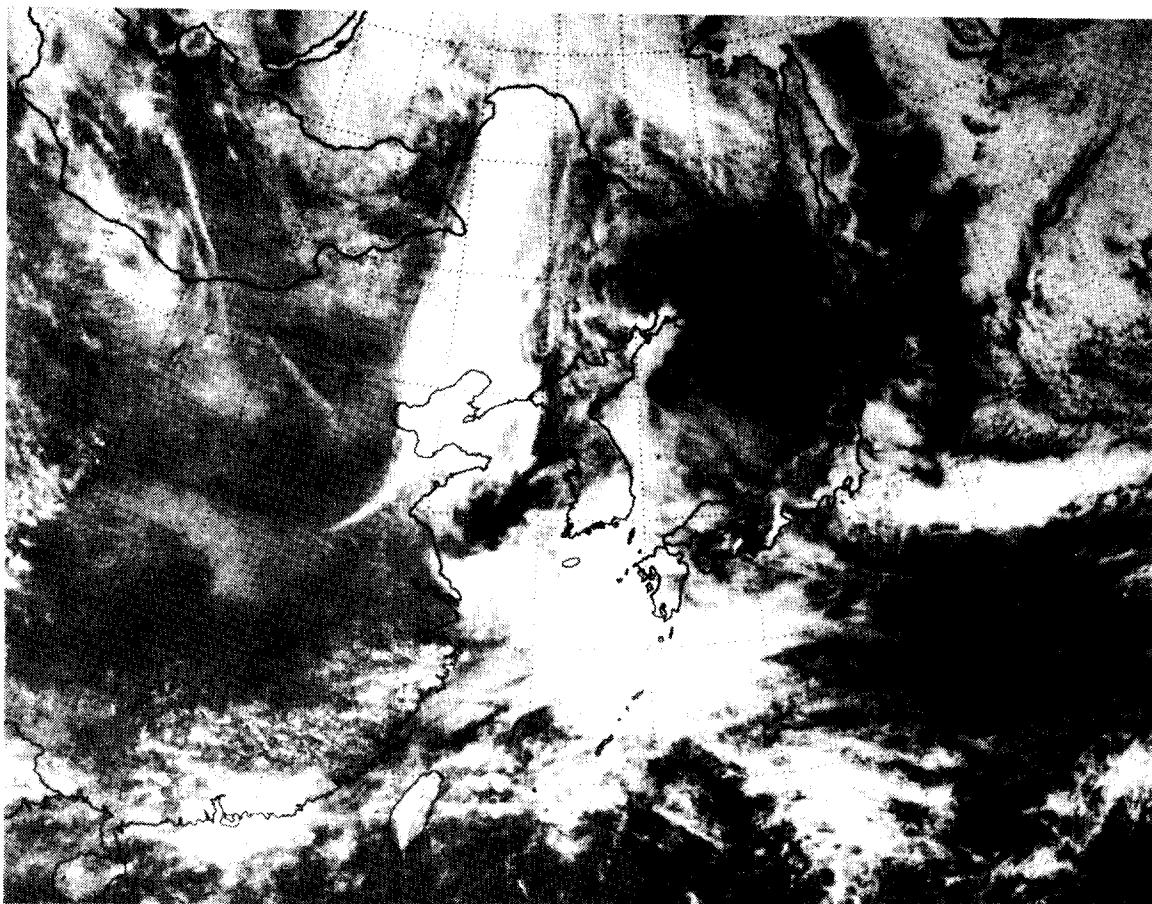


Fig. 9b. As in Fig. 4b, except for 06 UTC 21 April 1993.

쪽으로 이동하고 그 자리에 광범위한 기압골이 위치한 것을 알 수 있다. 같은 시각의 가시영상

(Fig. 11b)에서는 서해북부 해상, 북한 및 중부지방에는 광범위한 구름역이 자리잡고 있고, 고비사막, 황토고원, 황토퇴적지대 및 화중지방에 걸쳐

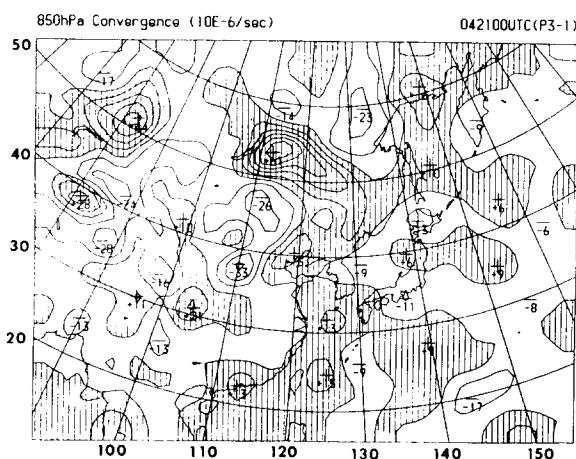


Fig. 10. As in Fig. 6, except for 00 UTC 21 April 1993.

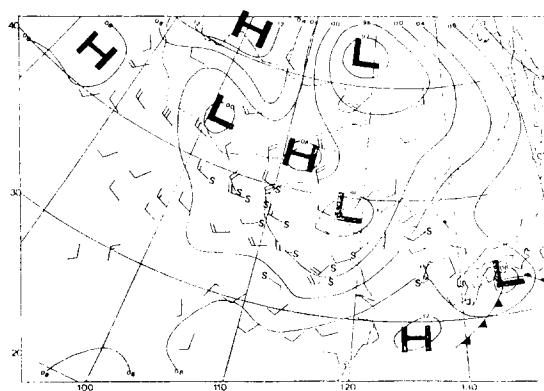


Fig. 11a. As in Fig. 4a, except for 06 UTC 22 April 1993.

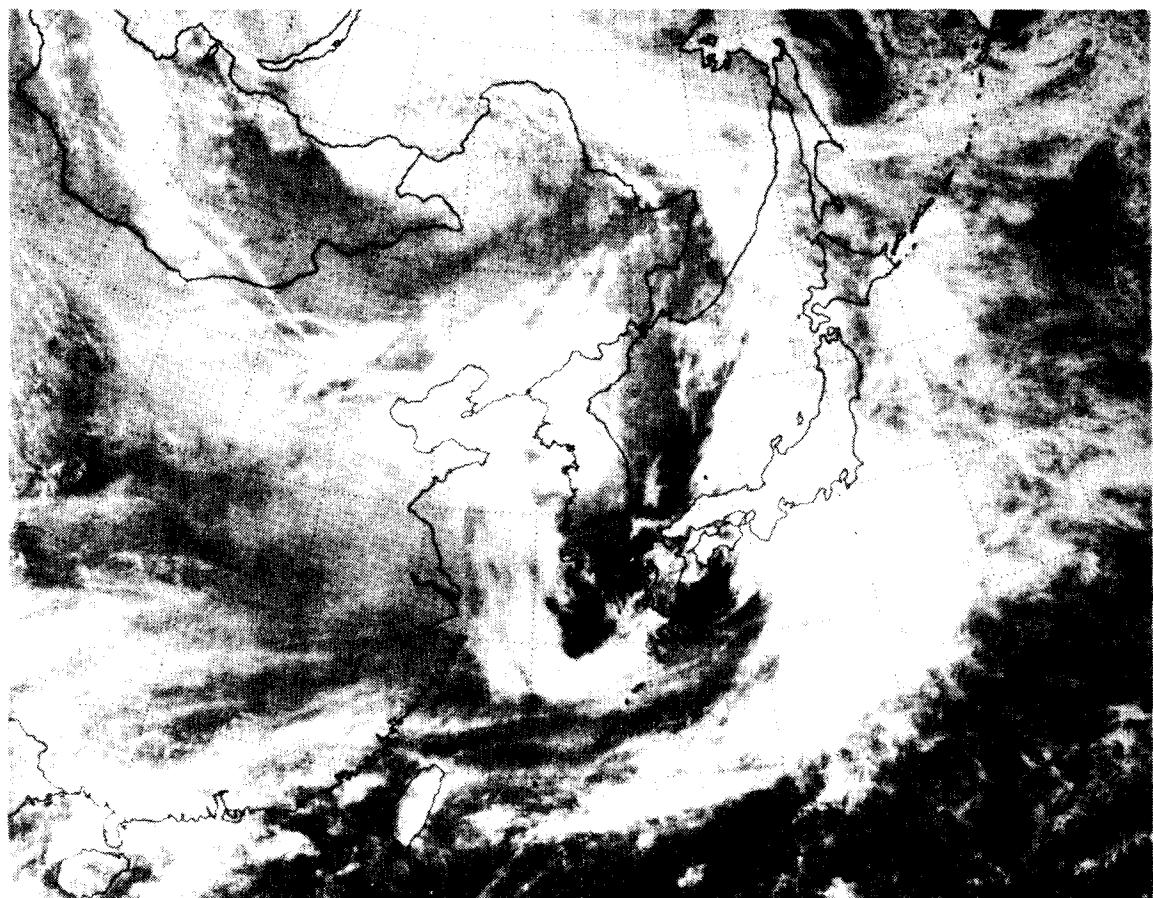


Fig. 11b. As in Fig. 4b, except for 06 UTC 22 April 1993.

다소 짙은 회색의 황사영역이 광범위하게 위치하고 있으며, 중부지방은 발달된 구름이 덮여 황사

영역을 식별하기가 어려운데 이 때 서울의 지상 관측에서는 황사가 보고되었다. 22일 00UTC의

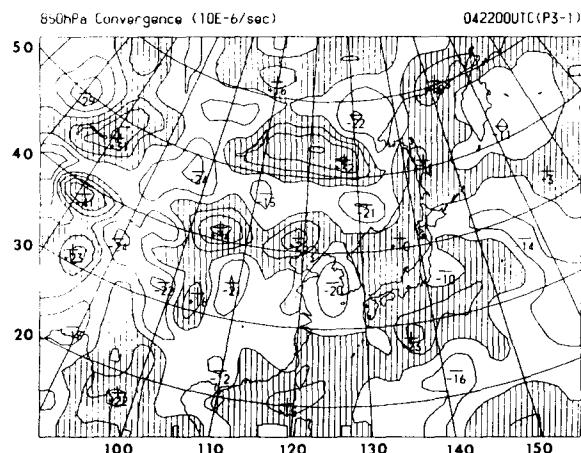


Fig. 12. As in Fig. 6, except for 00 UTC 22 April 1993.

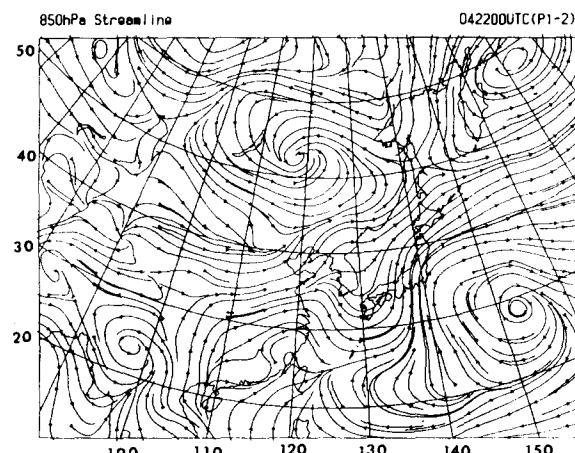


Fig. 13. As in Fig. 5, except for 00 UTC 22 April 1993.

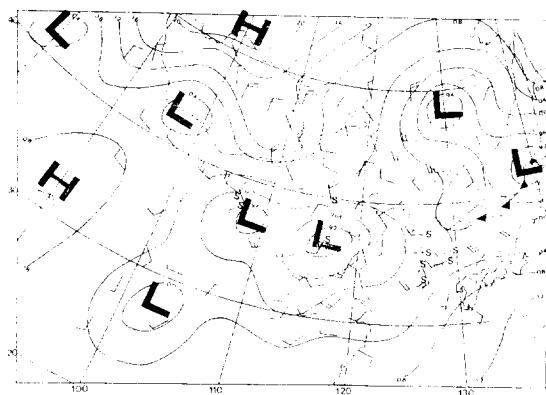


Fig. 14. As in Fig. 4a, except for 06 UTC 23 April 1993.

수렴도(Fig. 12)에서는 12시간 전과 유사하게 고비사막과 황토고원지대 부근으로 광범위한 수렴역이 위치하여 이 곳의 미세입자들이 지속적으로

대기상공으로 불려 올라가고 있음을 알 수 있으며 이러한 추정은 가시영상에서 이 지역 부근으로 다소 짙은 회색의 황사영역이 뚜렷하게 나타나 위의 추정을 확인해 준다. 22일 00UTC의 유선도(Fig. 13)에서는 고비사막과 황토고원지대에서 서북서 내지는 서풍이, 화중지역에서는 남서기류가 주류를 이루며, 서해상에서는 흐름의 방향이 나누어져 서울 부근에서는 서풍이, 서해남부지역으로는 북서풍이 지배적인데 이러한 유선의 패턴은 가시영상에 나타난 황사영역의 분포형태와 비슷하다.

23일 06UTC의 지상일기도(Fig. 14a)에서는 황토고원지대와 황하강 하류유역에 저기압계가 위치하고 그 곳에 황사현상이 관측되고 있고, 우리나라에서는 본격적인 황사가 관측되고 있다. 같은 시각의 가시영상(Fig. 14b)에서는 40°N 을 기준

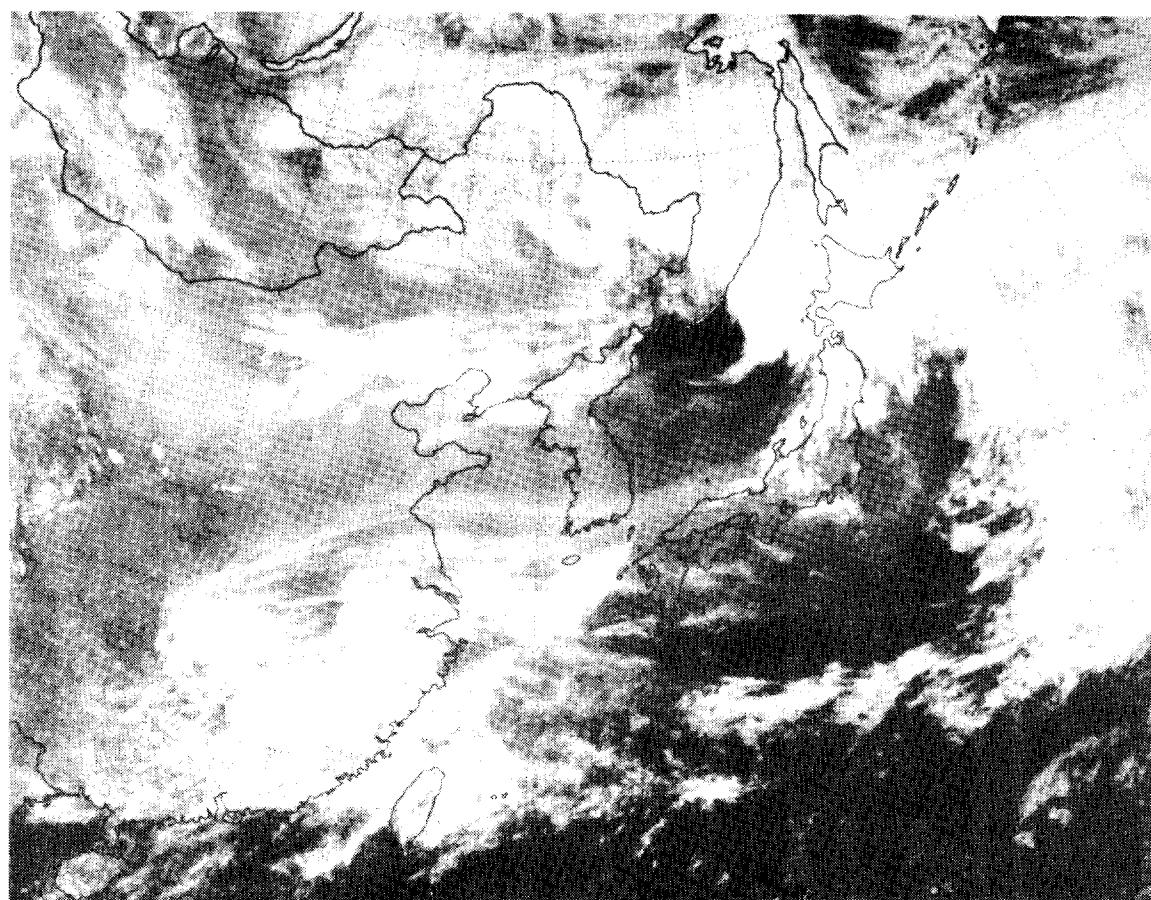


Fig. 14b. As in Fig. 4b, except for 06 UTC 23 April 1993.

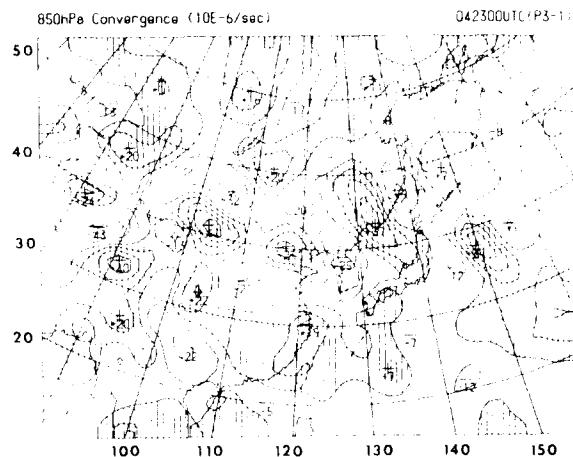


Fig. 15. As in Fig. 6, except for 00 UTC 23 April 1993.

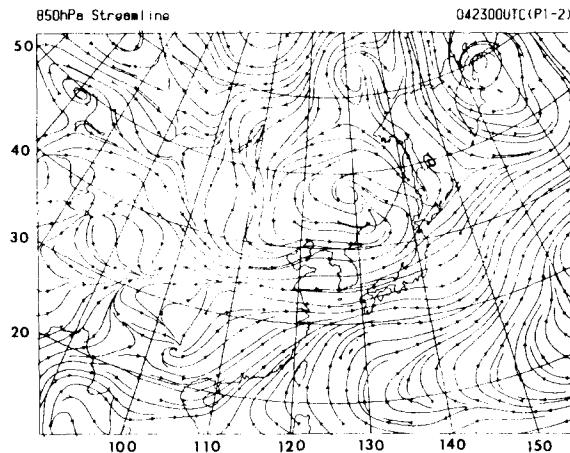


Fig. 16. As in Fig. 5, except for 00 UTC 23 April 1993.

으로 110° 에서 130° E 부근으로 구름대가 동서로 위치해 있고, 황토 고원, 황토퇴적지대, 발해만 및 중부지방에 황사영역이 확인이 되며, 36° N 부근의 서해상과 남부지방에서는 황사관련 부유물질들과 깊은 구름층이 같이 결합되어 보다 밝게 나타난다. 23일 00UTC의 850hPa 수렴도(Fig. 15)를 보면 황사가 관측된 우리나라 전역은 발산역에 위치하고 있어 황사입자들이 하강할 조건을 갖추고 있다. 850hPa 유선도(Fig. 16)에서는 뚜렷하게 화중지방에서 우리나라에 걸쳐 서편기류가 지배적임을 알 수 있으며 12시간 뒤인 23일 12 UTC의 850hPa 유선도(그림 생략)에서도 화중지방에서 우리나라에 걸쳐 뚜렷하게 남서기류가 유

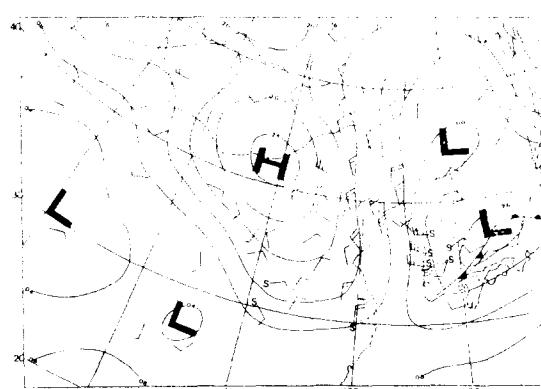


Fig. 17a. As in Fig. 4a, except for 06 UTC 24 April 1993.

지되었다.

24일 06UTC의 지상일기도(Fig. 17a)에서는 몽고 부근에 중심을 둔 고기압이 화중해안쪽으로 장출하고 있고, 이 고기압의 남쪽 가장자리를 따라 황사현상이 관측되고 있으며, 우리나라는 저기압계의 가장자리에서 황사현상이 관측되고 있다. 이 시각의 가시영상(Fig. 17b)에서는 황사영역이 중국내륙에서 우리나라에 걸쳐 곡선을 그리며 위치하고 있어 가시영상과 잘 일치하고 있음을 보여 준다. 24일 00UTC의 850hPa 유선도(Fig. 18)에서는 화중지역과 우리나라의 중부지방에는 뚜렷하게 북서기류가 지배적임을 알 수 있다.

25일 06UTC의 지상일기도(Fig. 19a)를 보면 하루 전에 몽고 부근에 중심을 둔 고기압이 이 시각에는 동중국해상까지 빠른 속도로 남동진하였으며, 우리나라의 지상바람을 보면 서내지 북서방향에 10-25kts 정도로 다소 강하게 바람이 불고 단열선도분석에서 언급한 것처럼 기온감율이 보다 커서 대기가 불안정하여 대기의 난류와 확산이 활성화될 수 있다. 같은 시각의 가시영상(Fig. 19b)에서는 황사영역이 보다 남쪽으로 내려가 주로 35° N 이남의 화중지방에 그리고 일본열도 남쪽 해상에 위치하고 있다. 25일 00UTC의 850hPa의 유선도(Fig. 20)를 보면 뚜렷한 북서기류가 서해상과 우리나라 전역을 지배하고 있음을 알 수 있어 우리나라에 머물렀던 황사입자들이 이 북편기류를 타고 빠르게 남하하였음을 알 수

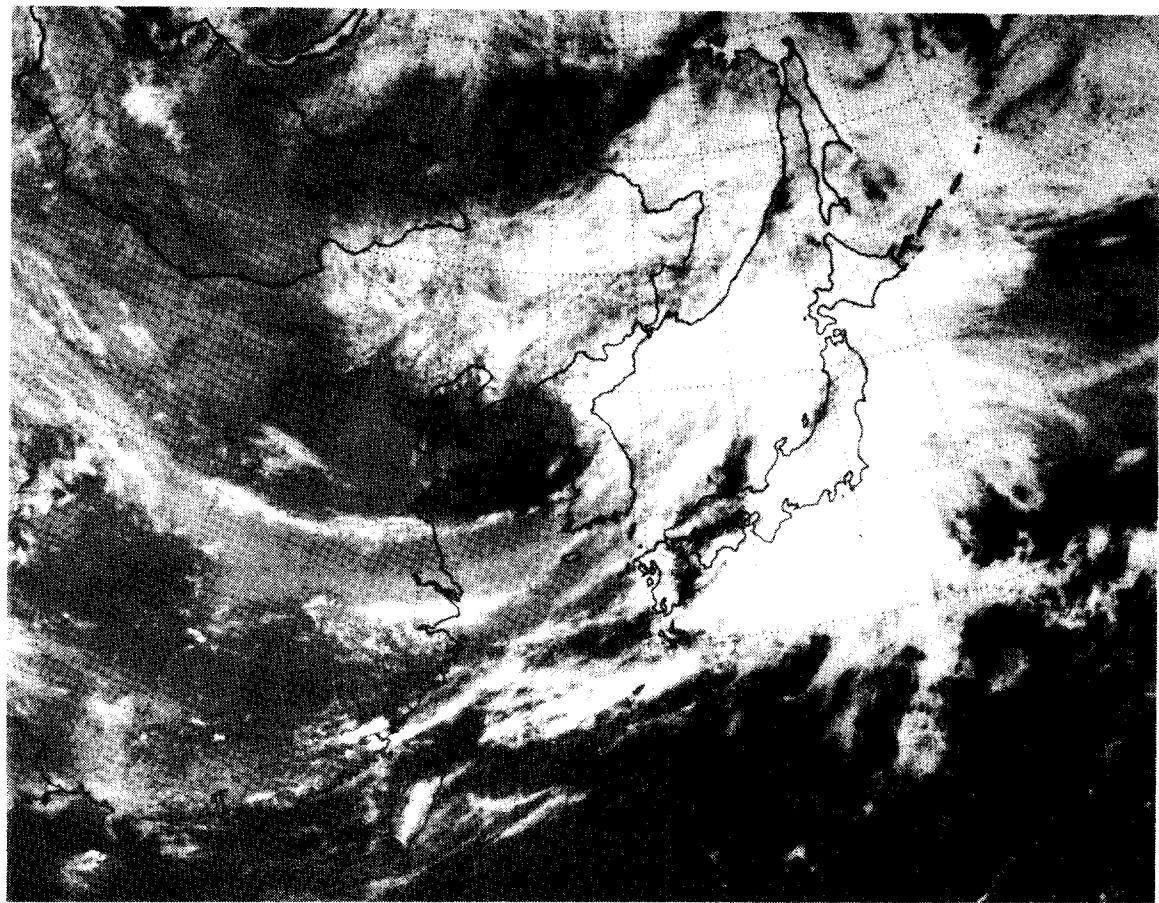


Fig. 17b. As in Fig. 4b, except for 06 UTC 24 April 1993.

있는데 이는 가시영상에서도 잘 나타난다. 4월 20일부터 25일까지 가시영상에 나타난 황사영역의 이동 및 확장을 Fig. 21에 나타내었으며 불확실한

경계는 점선으로 표시하였다. 이 그림에서도 알 수 있듯이 20일부터 24일 사이에는 황사영역의 선단부분은 편서풍에 동반되어 지속적으로 서쪽으

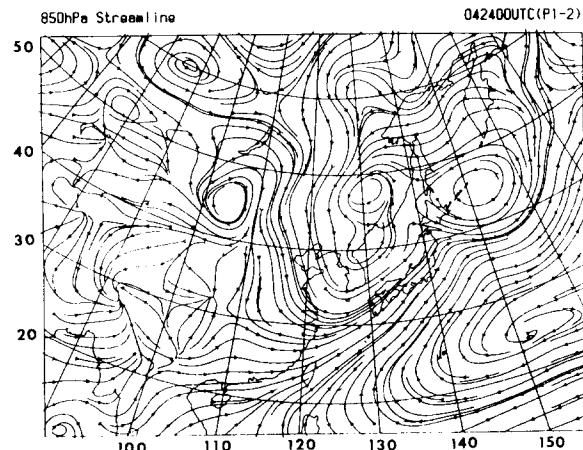


Fig. 18. As in Fig. 5, except for 00 UTC 24 April 1993.

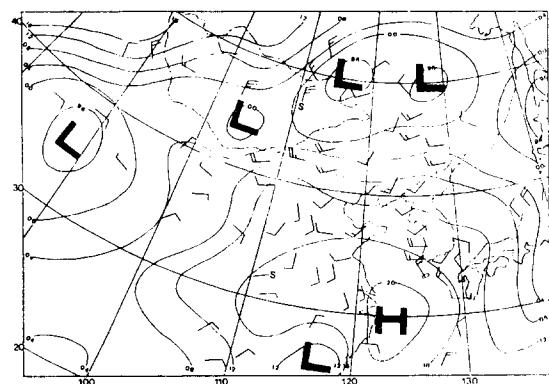


Fig. 19a. As in Fig. 4, except for 06 UTC 25 April 1993.

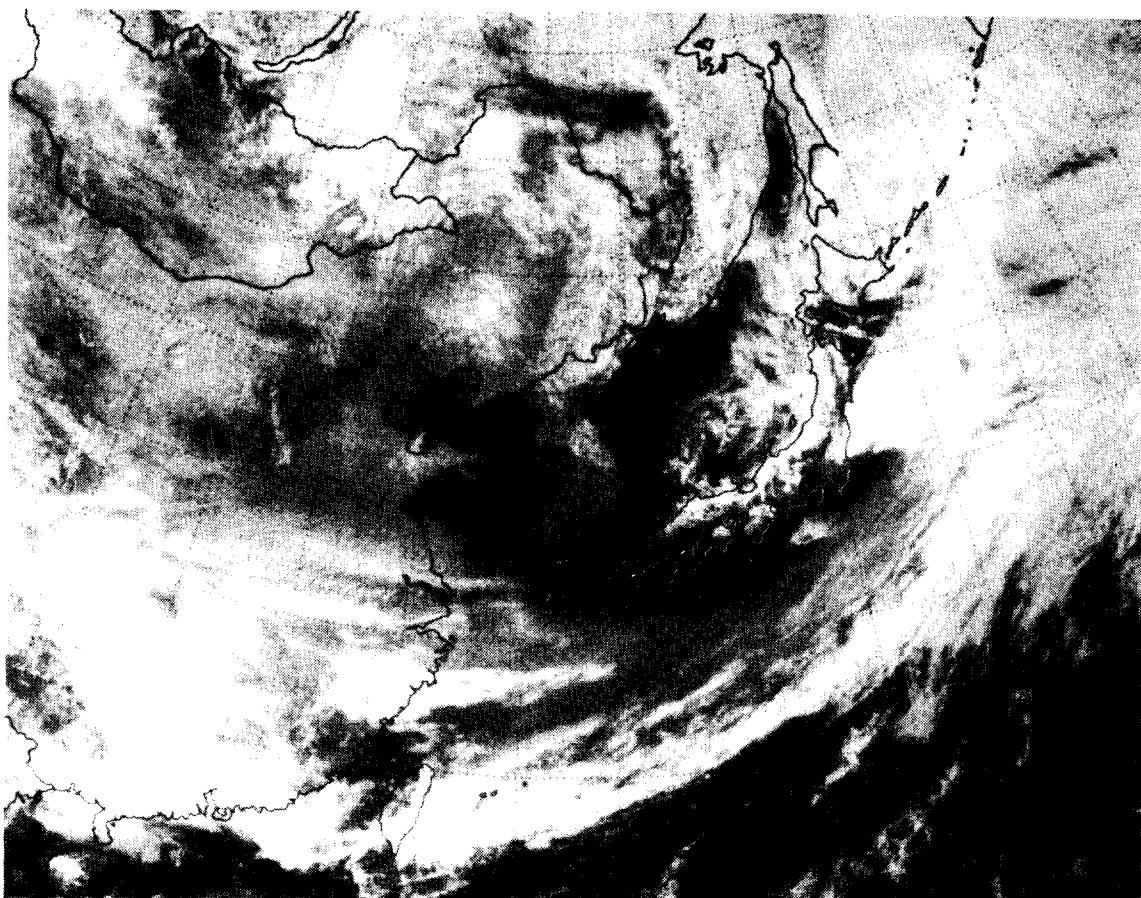


Fig. 19b. As in Fig. 4b, except for 06 UTC 25 April 1993.

로 확장하고 있음을 보여주며 25일 경에는 황사 영역의 경계가 보다 남쪽으로 치여 내려가 있음

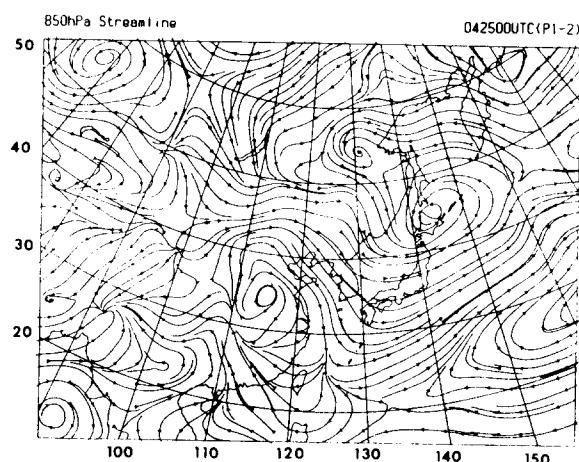


Fig. 20. As in Fig. 5, except for 00 UTC 25 April 1993.

을 알 수 있다. 이 사례의 경우 황사가 관측되는 지역은 상당히 광범위하지만 이 황사입자를 담고 있는 기단이 우리나라로 지속적으로 유입되기 위해서 서 내지 남서기류가 유지되어야 하나 몽고 지방에 중심을 둔 고기압의 빠른 남동진에 따라 우리나라의 기류흐름이 서 내지 남서기류에서 북서기류로 바뀜에 따라 황사를 담고 있는 기단이 유입되지 못하여 황사지속시간이 짧은 것으로 나타났다. 정리하면 저기압계가 황사발원지인 고비 사막과 황토고원지대를 지나면서 하층수렴으로 인한 상승기류로 황사입자들이 대기 중으로 상승하면서 편서풍에 편승하여 일차적으로 우리나라의 일부지역으로 흘러 들어왔으며, 또한 고비사막 남단에 위치하였던 고기압이 약화된 채 북서쪽으로 이동하고 그 자리에 기압골이 강화됨에 따라 하층수렴이 조직화되고 발달되어 고비사막과 황

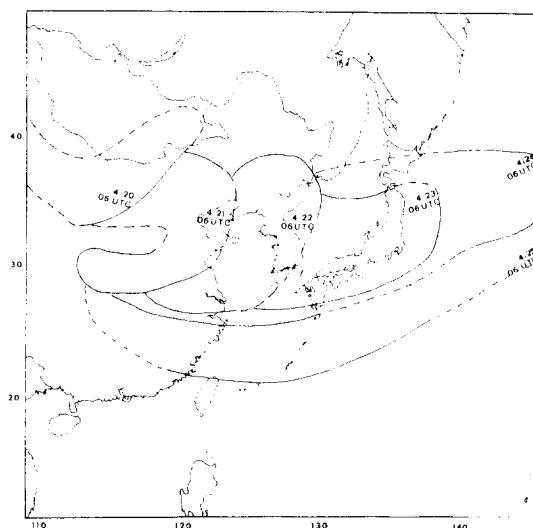


Fig. 21. The movement of Yellow Sand area analyzed from GMS visible image for 06 UTC 20 April through of UTC 24 April 1993.

토고원지대의 황사입자들이 다시 대기 중으로 불려 올라가면서 편서풍에 동반되어 이차적으로 23일 경에 우리나라로 유입되어 짐에 따라 중부 및 남부지방에서 본격적인 황사현상이 관측되었고, 저기압 중심이 통과하는 경로에 가까운 중부지방에서는 뇌우를 동반한 소낙성강수도 함께 관측되었다. 황사현상이 종료될 때에는 몽고 부근에 중심을 둔 고기압이 빠르게 남동진하면서 우리나라 쪽으로 세력을 확장함에 따라 기류흐름이 서내지 남서기류에서 북서기류로 바뀌면서 우리나라 상공에 위치하였던 황사기단이 30°N 부근까지 남하하여 우리나라의 황사현상은 급격히 약화되었으며, 더구나 이 고기압에 동반된 기단의 기온감율이 커서 대기성층이 불안정하여 대기의 확산이 활발함에 따라 황사현상이 빨리 해소된 것으로 사료된다. 참고로 Kai *et al.*(1988)이 조사한 사례의 경우, 황사발원지 부근을 통과한 기압골 후면에서 하층수렴에 의하여 상승된 황사입자들이 편서풍을 타고 서해상을 지나 우리나라와 일본으로 유입된 후 안정한 이동성 고기압의 영향으로 확산이 억제되어 황사입자들이 서서히 낙하되면서 지속적인 황사현상을 보여 이동성고기압

이 황사현상을 유지하는데 기여했음을 알 수 있다. 그런데 이번 사례의 황사는 고기압의 영향으로 오히려 황사현상이 약화되었다. 따라서 황사지속시간은 황사가 관측되는 범위의 광범위한 정도와 함께 황사와 관련된 기압골의 뒤를 따라 유입되는 고기압의 위치, 발달정도, 이동속도, 그리고 고기압의 확장에 따른 기류의 방향과 풍속, 또한 그 고기압이 동반하고 있는 기단의 안정도에 의존됨을 알 수 있다.

3.4. 유적선(Trajectory) 분석

황사입자를 담고 있는 기단의 이동을 조사하기 위하여 Saucier(1955)의 방법에 의한 유적선분석을 하였다. 이 방법은 등압면 상에서의 2차원 유적선분석으로 대기의 수직운동이 반영되지 않는 수평운동만을 추적하는 것이지만 기단의 이동이 종관규모의 기류에 의존하므로 이 2차원 유적선분석으로 큰 규모의 기단이동을 분석할 수 있을 것으로 판단된다. Iwasaka *et al.*(1983)는 나고야에서 실시한 Lidar 관측을 통하여 황사입자가 밀집된 고도층의 높이를 확인한 후 그 온위면(isentropic surface)을 기준으로 역으로 유적선분석을 하여 황사의 발원지를 추정하였다. 참고로, 유적선분석시 바람방향의 불연속지대(shift lines), 닫힌 순환(closed circulation)영역 그리고 발산지역에서는 다소 오차가 클 가능성이 있음을 밝힌다.

Iwasaka *et al.*(1983)와 Kai *et al.*(1988)의 Lidar관측을 종합하여 보면 황사입자의 밀도가 높은 주요 고도는 주로 2km와 4km 내외이며 이에 대략적으로 대응하는 표준등압면 고도는 850 및 700hPa 등압면이다. Tanaka *et al.*(1989)는 황사현상과 관련된 사례연구에서 850과 700hPa 등압면 상에서 유적선분석을 하였다. 이번 사례의 연구에서도 850과 700hPa 등압면 상에서 유적선분석을 하였다. 그런데 850hPa과 700hPa 고도에서의 유적선분석 결과를 가시영상과 지상관측에 나타난 황사의 이동과 비교하여 보면 850hPa보다 700hPa고도의 기류흐름이 황사영역의 장거리이동을 잘 반영하였고 또한 앞에서 언급한 단열선도

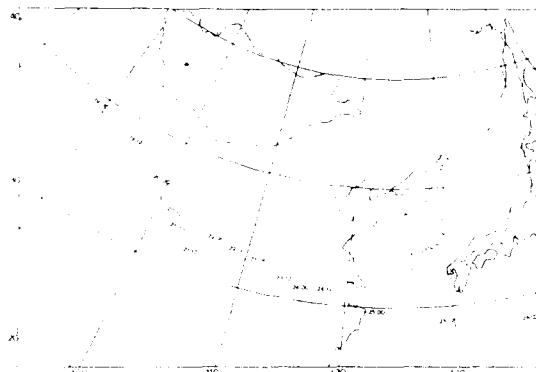


Fig. 22. Isobaric air trajectory from a location near Takla Makan Desert at the 700 hPa level for the air mass laden with Yellow Sand particles. Refer to text for details.

분석에서 주요 건조층이 850hPa고도보다 더 높은 고도에서 확인이 되어 이 연구에서는 700hPa 분석을 위주로 언급하기로 한다.

19일 타클라마칸사막 근처에서 황사현상이 처음으로 보고되었는데 이 황사를 담고 있는 기단의 유적선을 Fig. 22에 실었으며, 그림에 있는 숫자는 날짜와 시간(UTC)를 나타낸다. 이 분석에서 보면 황사를 담고 있는 기단은 티벳고원의 가장 자리를 따라 중국내륙에서 32° N까지 남동방향으로 이동한 후 동남동진하면서 동중국해를 거쳐 일본열도 남쪽 해양을 지나가는 경로이어서 19일 경에 처음으로 발생한 황사를 담고 있는 기단은 우리나라쪽으로 직접 유입되지 못하였음을 알 수 있다.

23, 24일에는 우리나라 전역에서 본격적인 황사 현상이 관측되었는데 23일과 24일에 중부 및 남부지방에 황사현상을 보였던 기단이 어디서 유입되었는가를 알기 위해 Fig. 23과 Fig. 24에 각각 역방향(backward) 유적선분석을 실었다.

23일에 중부지방에 황사를 보였던 기단의 이동 경로를 보면, 고비사막 부근을 거쳐 황토고원을 가로질러 황토퇴적지대를 지나 서해상을 거쳐 중부지방으로 유입되는 경로를 따랐으며, 24일에 중부지방에 황사를 보였던 기단의 이동은 23일과 같은 경로를 따랐으나 화중지방에서는 북위 35° 까지 보다 남하한 후 서해상을 지나 중부지방으

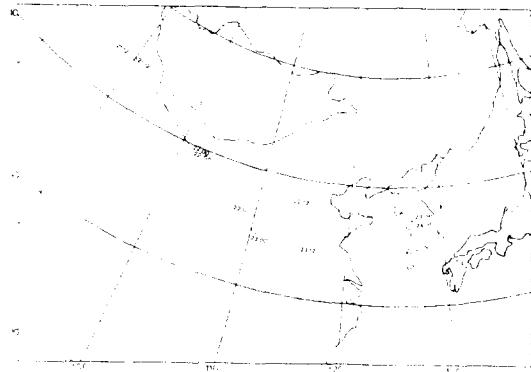


Fig. 23. Back isobaric air trajectories from Seoul at the 700 hPa level. Refer to text for details.

로 유입되었다. 즉 양일간에 걸쳐 우리나라에 관측된 황사는 주로 고비사막과 황토고원지대를 발원지로 하여 유입된 것으로 추정되었다. 23일에 남부지방에 황사를 보였던 기단의 이동경로를 Fig. 24에서 살펴보면 타클라마칸사막의 북쪽에서 황토고원지대의 가장자리를 지나 화중내륙을 거쳐 서해상을 지나 남부지방으로 유입되었음을 알 수 있으며 타클라마칸사막에 있는 미세입자들이 어느 정도 대기상공으로 유입되었는지는 다소 불확실하다. 24일에 남부지방에 황사를 보였던 기단의 경우에는 고비사막 부근에서 황토고원지대를 가로질러 화중내륙에서는 32° N까지 남하한 후 서해를 거쳐 남부지방으로 유입되었음을 보여준다.

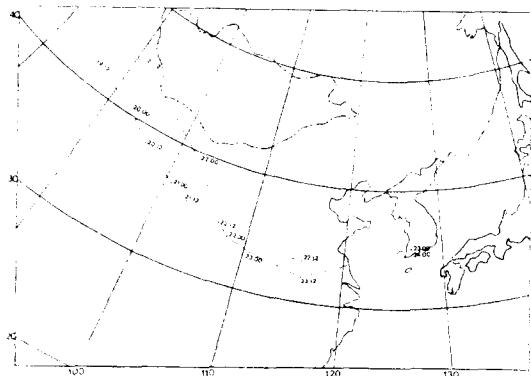


Fig. 24. As in Fig. 23, except from Kwangju.

정리하면, 우리나라에 23일과 24일 경에 유입된 기단은 21일과 22일 양일간에 걸쳐 고비사막부근과 황토고원지대를 통과하여 온 것으로 통과할 당시에는 이 건조지대로 발달된 하층수렴역이 존재하여 고비사막 부근과 황토고원지대가 발원지인 것으로 추정되어 진다. 이와 유사한 사례연구에서 Ishizaka *et al.*(1981)는 일본 나고야에서 표본채집된 황사입자들에 대한 X-ray분석을 한 결과 고비사막에 근원을 둔 광물입자뿐만 아니라 중국북부지대의 토양입자에 근원을 둔 성분도 분석이 되었음을 밝혀 황사의 발원지가 고비사막과 중국북부지대임을 시사하였다.

4. 종합 및 결론

1) 이번 사례의 경우 황사발원지는 주로 고비사막과 황토고원지대인 것으로 추정되며, 이 발원지 부근으로 하층수렴이 지속적으로 나타나 황사관련 입자들이 대기 중으로 상승하기에 좋은 조건을 보였다.

2) 발원지에서 하층수렴으로 인한 상승기류로 미세입자들이 대기 중으로 상승하면서 편서풍(주로 700hPa 고도이상의 기류)에 편승하여 22일경에 우리나라의 일부 지역으로 흘러들어 왔으며, 다시 고비사막 남쪽으로 기압골이 강화되고 고비사막과 황토고원지대에 지속적인 하층수렴이 형성되어 이 발원지의 미세입자들이 대기 중으로 불려 올라가 편서풍을 따라 화중지방을 지나 23일 경에 우리나라로 유입되어 중부 및 남부지방에서 본격적인 황사가 관측되었으며 24일까지 지속되었다.

3) 우리나라에서의 황사지속시간은 약 35-40시간으로 다소 짧았는데 이는 몽고 부근에 중심을 둔 고기압이 빠르게 남동진하면서 우리나라쪽으로 세력을 확장함에 따라 기류흐름이 북서기류로 바뀌어 황사를 담고 있는 기단을 우리나라 남쪽으로 밀어 보내었고 또, 이 고기압에 동반된 기단의 대기성층이 불안정하여 대기의 확산이 활발해짐에 따라 황사현상이 빨리 해소되었기 때문이다.

4) 황사지속시간은 황사가 관측되는 범위의 수

평균모와 함께 황사와 연관된 기압골의 뒤를 따라 유입되는 고기압의 위치, 발달정도, 이동속도 그리고 고기압의 확장에 따른 기류의 방향과 풍속에 의존하며, 또한 이 고기압이 동반하고 있는 기단의 안정도와 관련이 있었다.

이번 사례의 경우 가시영상자료를 이용하여 큰 규모의 황사영역의 위치와 이동상태를 확인할 수 있지만 발원지가 어디인지 또 어떻게 이동하여 확산되었는가를 보다 구체적으로 확인하고 보완하기 위해서는 우리나라 상공으로 유입되는 황사관련 부유물질들을 표본채집하고, 이 표본들을 성분분석하여 확인되는 황사발원지와 유적선분석을 통하여 추정되는 황사발원지와의 상호비교가 있어야 겠다. 나아가서 우리나라에서도 Lidar관측이 이루어져 황사입자가 밀집해 있는 고도를 보다 정확히 조사하는 것도 황사수송의 기구(mechanism)를 이해하는데 큰 도움이 될 것이다.

참고문헌

- 윤용황, 1990, 한반도에 수송되는 황사의 특징에 관한 연구. 한국기상학회지, 26(2), 111-120.
- Bertrand, J. and J. Baudet, 1973, Seasonal variations and frequency distributions of ice nuclei concentrations at abidjan, West Africa. J. Appl. Met., 12, 1191-1195.
- Carlson, T.N. and S.G. Benjamin, 1980, Radiative heating rates for Saharan dust, J. Atmos. Sci., 37, 193-213.
- Duce, R.A., C.K. Unni, B.J. Ray, J.M. Prospero and J.T. Merrill, 1980, Long-range atmospheric transport of soil dust from Asia to the tropical north Pacific; temporal variability. Science, 209, 1522-1524.
- Iwasaka, Y., H. Minoura and K. Nagaya, 1983, The transport and spacial scale of Asian dust-storm 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.
- Ishizaka, Y., A. Ono and S. Kadokawa, 1981, Size distribution and mineral composition of Yellow Sand in the air over Japan and its main origins. *Tenki*, 28, 651-665.
- Kai, K., Y. Okada, O. Uchino, I. Tabata, H. Nakamura, T. Takasugi and Y. Nikaidou, 1988, Lidar observation and numerical simulation of a Kosa (Asian dust) over Tsukuba, Japan during the Spring of 1986. *J. Meteor. Soc. Japan*, 66, 457-472.
- Murayama, N., 1988, Dust cloud "Kosa" from the east Asian dust storms in 1982-1988 as observed by the GMS Satellite. *Meteorological Satellite Cen-*
ter Tech. note No.20 97 pp.
- Nakamura, H., 1987, Pollutant tracer model based on the global spectral model. NWPD/JMA Technical Memorandum, 8.
- Saucier, W.J., 1955, Principles of Meteorological analysis. Dover Publications, Inc New York, 438 pp.
- Shaw, G.E., 1980, Transport of Asian desert aerosol to the Hawaiian island. *J. Appl. Met.*, 19, 1254-1259.
- Tanaka, M., M. Shiobara, T. Nakajima, M. Yamano and K. Arao, 1989, Aerosol optical characteristics in the Yellow Sand events observed in May, 1982 at Nagasaki-Part I observations. *J. Meteor. Soc. Japan*, 67, 267-278.
- Zhao, S., 1986, Physical geography of China. Science Press, and John Wiley and Sons, 209pp.