

황사의 발원지와 관측

오 성 남 (기상청 기상연구소 응용기상연구실장)

1. 서론

황사는 아시아 대륙의 중심지인 타클리마칸 사막에서부터 중국 북서 사막지역과 황토고원, 그리고 내몽고 고비사막과 북만주 등 매우 다양한 지역에서 주로 봄철의 강한 저기압 현상에 따라 발생하는 고체 입자의 모래 황토 먼지가 비양한 에어러솔이다. 최근에는 황사 발생과 그 강도가 증가함에 따라 중국은 물론 주위의 국가들에게도 환경, 경제 및 보건 등에 많은 문제를 야기하고 있어 이에 대한 국가간의 대처가 논의 되고 있다.

황사현상에 대한 국제적 연구는 1990년대 초부터 중국과 한국, 일본 등 피해 당사국들이 발원지의 관측과 황사이동 등에 대하여 국제적으로 협력 연구할 것을 논의 한바 있어 우리나라에서도 기상청과 환경부, 외교통상부 등 관련 부처와 대학 등 여러 연구자들에 의하여 기상관측을 근거 한 황사입자 포집과 인공위성이나 라이더(Lidar) 등과 같은 원격탐측 장비를 이용한 관측이 지금까지 꾸준히 진행되고 있다. 이와 관련하여 2001년 봄철에는 국제아시아먼지 집중관측(Aerosol Characteristic Experiments in Asia, ACE-Asia) 국제협력사업이 제주도 고산에서 수행된 바 있다. 또 지난 2004년 1월 28일에서 31일까지 제주도 서귀포에서 한중일 3국의 황사전문가 100여명이 모여 황사의 특성과 발원지 관측 그리고 그 예측과 영향에 대한 연구결과를 발표하는 국제 황사 WORKSHOP을 성황리에 개최한 바 있다.

황사의 발생 빈도가 높아지고 그 강도가 심화되어

가는 이유에는 학자들에 따라 다소 차이는 있지만 크게 세 가지로 그 이유를 들고 있다. 첫째, 황사가 발생되는 지역에 사막화가 점점 확장되고 있어 북만주 지역까지 발원지 영역이 확장되고 있다. 둘째, 지구 온난화 등에 의한 기후변화가 발생지역의 기상조건을 악화시키고 있고 또 황사를 이동시키는 편서풍이 강해지고 있다. 셋째 동북아시아 제국의 산업 발달과 경제적 성장으로 작은 황사발생에도 그 피해에 대한 환경 및 경제적 영향이 커지고 황사관측의 기술 향상으로 황사발생의 관측이 보다 상세해 지고 있기 때문이다.

우리나라의 경우 황사현상을 감시하기 위해 제공되는 자료는 기상청의 일반 기상관측자료, 위성영상 및 라이더 측정 자료가 있으며 기상청과 환경부에서 측정하고 있는 5분 평균 미세먼지 농도자료와 국내외에서 수행되고 있는 황사예보모델 결과, 그리고 기상연구소에서 측정하는 에어러솔의 수농도 및 일평균 총 부유분진과 미세먼지 농도 분석 자료 등이 있다.

따라서 당시 발표했던 황사의 발원지 정보와 관측 및 예측에 대한 연구결과들을 간단히 소개 하고자한다.

2. 발원지와 관측

(1) 발원지

황사의 발원지는 아시아 대륙의 중심지인 타클리마칸 사막에서부터 중국 서안 북동지역의 사막지역

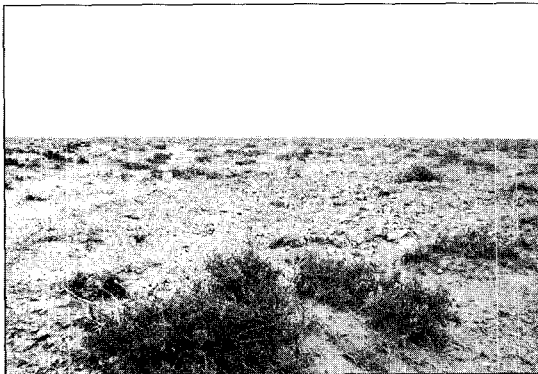
(48만km²)과 황토고원(약 30만km²), 그리고 내 몽고 고비사막과 북만주 쿤산다크 사막 등 한반도 면적의 4배 정도로서 매우 광범위하고 다양하다. 모두 해양과 멀리 떨어져 있어 강수가 적은 반면 매우 건조한 지역으로 년 강수량은 200mm 미만으로 수분이 부족하고 바람이 강해 식생의 생태계가 형성되기 어려운 지역이다.

중국과 몽골의 접경지역에 걸친 넓고 건조한 사막(바단자란, 텐겔, 울도스)과 중국의 황토고원, 내몽골 고원의 먼지현상은 강한 바람과 함께 모래가 공중으로 떠올라 강한 먼지 폭풍으로 1km 밖을 구분할 수 없게 된다. 발원지역에서는 시정거리 50m 정도로서 모래와 먼지가 너무 많아서 햇빛을 가려 어둡기 때문에 이를 '흑풍폭'이라고도 한다.

황사의 발생원인은 사막이나 황토고원 등 건조지대를 지나는 저기압의 후면에서 강한 와도형 상승기류에 의해서 황사 먼지들이 대기 중으로 비산되어 10km 이상고도의 상층 편서 기류인 강한 Jet기류를 타고 한반도와 일본, 알루산 열도 심지어는 하와이까지 이동하게 된다(Arao et al. 1986; Iwasaka et al. 1983; Joussaume 1990; Iwasaka 1988; Shaw 1980).

이들 황사의 주요 발원지는 다음과 같다.

a. 고비사막(Gobi desert)



- 면적 : 60,000km²
- 특징 : 자갈성의 건조지대, 중국 최고 건조지역 중 하나, 동서로 250km, 남북으로 100km,

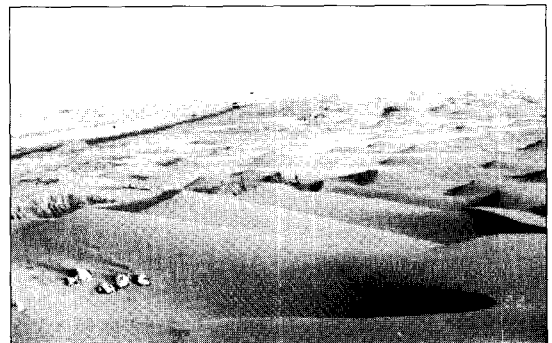
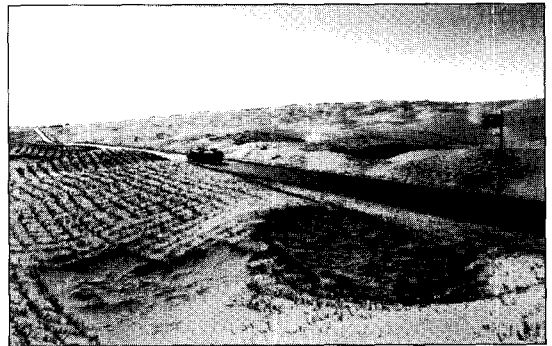
해발고도는 1,000-1,500 m

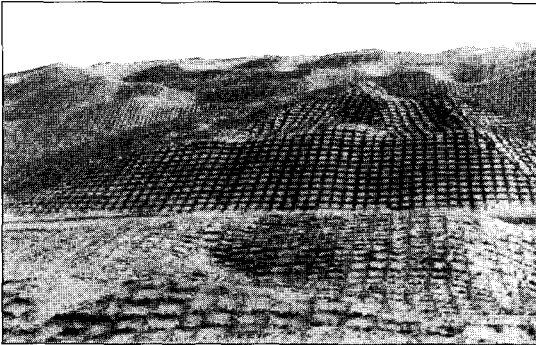
b. 내몽고 지역(Inner Mongolia Plateau)



- 면적 : 사막(110,000km²), 모래지역(80,000km²)
- 특징 : 고비사막과 황토고원에 이어 새롭게 등장한 황사발원지. 모래와 자갈이 혼합되어 있음.

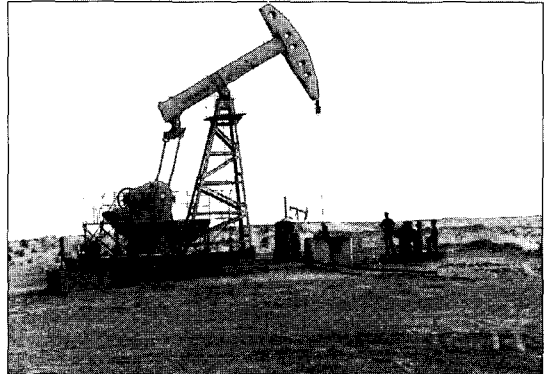
c. 타클라마칸 사막(Taklimakan desert)





- 특징 : 계속 사막화 진행중, 우리나라에서 가깝기 때문에 1일 이내에 도달할 수 있음

e. Gurbantunggut 사막

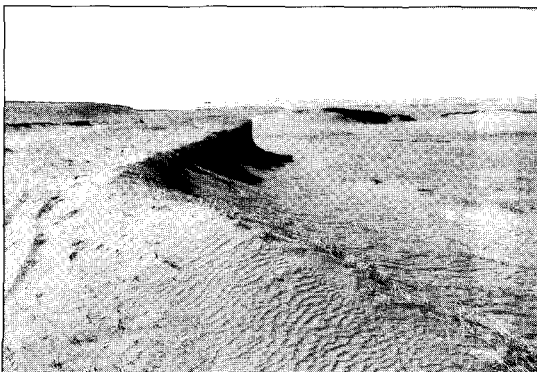


- 면적 : 330,000km²
- 특징 : 중국 최대의 사막(중국 총 면적의 52%), 동서로 약 1000km, 남북으로 400km, 그러나 우리나라와 거리가 멀어(약 5,000km) 거의 영향이 없음. 중국 정부의 황사발생 억제방법으로 조림을 하고 있음.



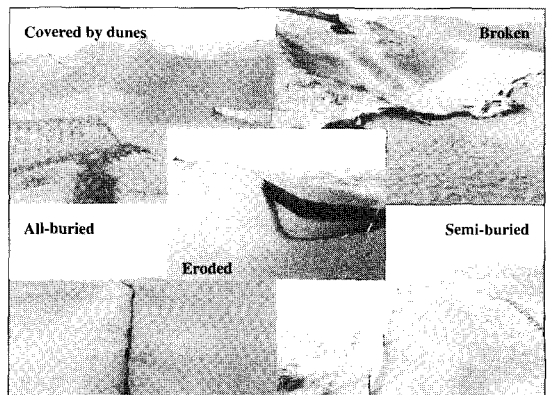
- 특징 : 타클라마칸 사막지역에 포함되어 있음.

d. 훈산다크(Hunsandakue)



- 면적 : 23,800km²

f. Tarin 사막



- 특징 : 타클리마칸 사막의 중심지

g. 황토고원(Loess Plateau)



- 면적: 300,000km²
- 특징 : 황토로 되어있음, 해발고도는 600~1,500 m, 중국의 목축업으로 개간되어 방치된 지역이 대부분임.

(2) 황사 농도와 침적량 측정

세계기상기구(WMO)가 정한 기상관측 방법에는 황사를 별도의 기상현상이 아닌 먼지현상의 하나로 간주하여 정량적인 관측기준이 없이 현상의 유무만을 식별하도록 규정하고 있다(기상청, 2000; 윤용황, 1990). 그러나 동북아시아 지역의 황사는 그 강도가 매우 약한 현상에서 심한 상태까지 이르러 기상청에서는 3단계의 강도로 구분하고 있다. 즉 하늘의 상태가 다소 혼탁할 경우 황사의 강도를 0, 하늘이 혼탁하고 황색먼지가 물체 표면에 약간 쌓이는 경우를 1, 그리고 하늘이 황갈색으로 되어 빛을 심각히 차단하며 황색먼지가 두텁게 쌓이는 경우를 2로 구분한다. 현대에 들어 황사에 대한 일반의 관심도가 점차 높아감에 따라 황사 강도에 대한 정량적이고 객관적인 정보를 요구 하고 있어 기상연구소에서는 황사가 빈번히 발생하는 봄철을 집중관측기간으로 정하여 황사 입자의 침적량을 측정하고 있다. 즉 판모양 건식 침적 측

정기기(건식 침적판)와 통모양 건식 침적 측정기기(Sigma-2)를 기상청 노장에 설치하여 2003년 2월부터 측정을 시작하였으며 5월까지 연속적으로 관측을 실시한다. 황사 입자의 농도 측정을 위해서는 TSP와 PM10 Sampler를 이용하여 2003년 3월 14일부터 4월 30일까지 관측을 실시하였다. 관측기간 중 황사는 3월 27일과 4월 12~13일에 강도 0의 황사가 나타난 바 있다(기상청, 2003).

(3) 황사관측과 사례

기상연구소는 태양일사관측을 분석하는 AERONET(Aerosol Robotic Network) 관측망을 통하여 한반도에 위치하고 있는 선포터미터 자료를 이용하여 황사시 대기중 에어러솔이 어떠한 광학적 특성을 분석한바 있다(기상청, 2003).

2002년 11월에 발생한 황사 역시 봄철 황사와 마찬가지로 중국 내륙의 몽골지방에서 발생한 저기압이 건조한 지표면의 흙먼지를 끌어 올려 함께 이동하면서 우리나라에까지 영향을 미친 것으로 판단할 수 있다. 지상에 영향을 미치지 않고 상층으로 통과하는 집단의 에어러솔이 라이다 관측으로 자주 확인이 되고 있다.

2003년 봄철 기상연구소와 서울대학교, 경희대학교 등이 제주도 고산과 안면도 그리고 수원지역에서 각각 라이다(LIDAR)로 황사의 집중 관측을 실시한 바 있다. 2003년에는 예년과 달리 봄철에 중국의 사막지역에 많은 강설과 기온이 낮아 발원지역 지표가 눈으로 되어있어 황사가 거의 나타나지 않았다. 그러나 봄철 하반기에 아주 약한 황사현상이 나타났다. 따라서 국내의 특별 협력관측에서 제주도 고산에서 대기경계층 상부 약 1.6km 부근에서 2월 27일 밤에서 28일 새벽사이에 매우 얇은 황사 에어러솔 층이 발견되었다. 특히 이 경우 4km 이상의 고도에서 구름층과 동시에 존재하여 지상에서는 확인이 가능하지 않았다.

3. 광학적 특성

일반적으로 황사 시에는 대기의 에어러솔 광학두께(Aerosol Optical Depth, AOD)의 값이 0.3 이상으로 높고 Angstrom 파장지수는 0.6 이하로 작게 나타남으로써 황사가 나타 났을때는 평소보다 큰 입자의 에어러솔이 부유하고 있음을 알 수 있다. 황사의 입자 크기는 반경 2~3 μm 사이에서 수 농도가 가장 높게 나타나고 있다. Angstrom 파장 지수는 에어러솔 입자의 크기와 굴절지수에 따른 Mie 산란 법칙에 의해 결정되는 변수로서 파장에 따른 에어러솔 광학적 두께의 민감도를 나타낸다. 일반적으로 Angstrom 파장 지수는 작은 입자의 에어러솔일수록 큰 입자의 에어러솔에 비하여 큰 값으로 나타난다. 이러한 값들이 의미하는 것은 한반도에 황사가 발생했을 경우에 에어러솔의 대기 중 농도는 높아지고 큰 입자가 발생함을 의미한다. 또한 황사 에어러솔은 태양빛을 흡수하기보다는 산란시켜 황사가 나타났을 때 복사에너지 차단효과를 나타내어 기온을 하강시키는 효과도 있다.

미국의 Eck 등(1999)의 결과에 의하면 황사 시에는 미세(fine)모드에서는 평상시와 에어러솔의 농도와 거의 차이를 보이지 않아서 일반적으로 성진(coarse)모드의 농도가 fine 모드의 농도보다 20~30배가량 크게 나타난다. 이는 황사 시에는 중국의 사막지역에서 발생한 많은 먼지입자들이 편서풍을 타고 한반도로 유입되어지는 과정에서 인위적인 오염물질들도 많이 이동할 수 있음을 의미한다. 대부분의 크기는 1~3 μm 라는 것을 알 수 있다. 그러나 입자의 반경이 3 μm 보다 큰 입자들은 많이 이동해 오지 않는다는 것을 파악하게 한다.

4. 황사에측과 이동경로 추적

황사의 이동에 대한 연구로서는 역궤적(Backward Trajectory) 분석을 통한 발원지 추정과 LIDAR 및 선포터미터(Sunphotometer) 등의 측정을 통한 광학적 특성 분석 등이 소개되어 있다. 국내에서 기상관측

에 따른 황사이동과 현상에 대한 연구와 화학적 분석이 다소 진행되어 왔으나 라이더와 같은 집중적인 목적의 황사 관측은 90년대 초반부터 시작되었다. 지금까지 황사 이동의 측정 사례에 대한 종합적인 분석을 통해 황사의 이동 경로 및 고도를 추적하여 왔을 뿐 일반화하는 연구는 다소 부족한 실정이다.

황사 유적선 예상도는 황사의 배출조건, 예측 기상장을 사용하여 유적선을 분석한다. 종관 관측 부호는 GTS 전신망을 통하여 기상청에 실시간으로 입전되므로, 3시간마다 황사 발원지의 먼지 발생 상황을 자동으로 검색할 수 있다. 황사 배출 조건을 만족하면, 22개 지역의 중심점과 25개 관측소로부터 유적선이 출발되며, 295K, 300K, 그리고 305K 등은위면에서 유적선이 계산된다. 유적선은 1일 2회(00, 12UTC)로 부터, 72시간 후 예상되는 유적선의 위치와 방향을 확인하여 황사를 예보한다. 6시간마다 점을 찍어 기류의 속도를 표시하므로 유적선의 길이로 황사의 이동 속도를 예상할 수 있다. 이 유적선을 근거로 기류의 유입을 고려할 때에는 유적선이 위치한 바로 그 위치가 공기가 통과하는 것이 아니라, 유적선의 좌우로 약 500km 이내의 방향에서 유입되는 것으로 해석할 수 있으며, 유적선의 개수에 따라 황사의 강도를 추정할 수도 있다. 황사 유적선은 최대 47개까지 그려질 수 있으며, 유적선의 개수에 따라 황사 현상의 강도를 추정할 수도 있다. 또한, 종관 관측 부호가 표시되므로, 해당 시각의 먼지 현상 분포도 알 수 있다(2000년 이후 2003년 3월 19일). 황사는 태평양을 경유하여 미국 지역까지 이동한 것으로 알려져 한중일 뿐만 아니라 미국에서도 많은 연구가 진행되었다. 대기의 기상장을 평가 예측하는 중규모 기상예측 모델인 MM5를 이용한 기상장과 3차원 오일러리안 대기 오염 모델을 이용하여 황사 이동을 모의하여 예측하고 있다. 그러나 한 사례적 결과에 의하면 관측치보다 다소 낮게 나타났다. 이러한 차이는 Westphal et al.(1987)과 Gillette(1981)의 결과에 기초로 한 입체 마찰 속도를 이용한 발생 지역의 규명이 정확하지 못한 것에 기인한 것으로 생각된다.

기상연구소에서는 황사 발생 매커니즘을 1996년부터 2002년의 7년 동안의 배출지역의 WMO 종관 자료의 통계분석을 통하여 개선하고 2002년 봄철의 황사 사례에 적용하여 모델의 모의성능의 검정을 통하여 황사의 정량적 예보 가능성을 연구하고 있다.

2002년 3월 21~22일 한반도에서는 극심한 모래 폭풍(dust storm) 현상이 관측되었는데 이 기간동안 한반도 전역의 대기오염 관측지에서 관측된 PM₁₀의 농도가 1,000 $\mu\text{g m}^{-3}$ 이상이었으며 이는 비 황사시에 관측된 값의 10배 이상이다. 이러한 극심한 황사 현상은 국내 항공기 운항 정지 및 초등학교의 휴교 등을 야기 시켰다.

최근에 한반도에서 관측된 황사 현상은 중국 북동부의 사막화와 황사 발생지의 강수 부족(Bai and Zhang, 2001; Park, 2002)으로 인해 불모지가 늘어난 것 등으로 인해 더욱 강해지고 있다.

5. 황사 현상때의 일기도

황사일기도는 황사 발원지와 한반도, 일본을 포함한 동북아시아 지역의 지상 종관패턴과 황사정보를

제공한다. 황사현상을 나타내는 일기현상 코드가 3시간 간격으로 일 8회(00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21 UTC) 제공되므로, 황사가 발원한 지역과 황사현상이 나타난 지역, 그리고 기압패턴에 따른 황사의 이동경로 등을 상세히 알 수 있다(그림 1).

6. 위성영상

위성영상을 통한 황사분석은 기상청에서 매시간 제공하고 있는 GMS 정지기상위성영상과 00, 06, 12, 18UTC에 제공하는 미국의 극궤도 기상위성을 이용한다. 기상청은 GMS와 NOAA 위성은 11 μm 와 12 μm 대기창 적외파장역에서 나타나는 에어러솔에 의한 복사 감쇄를 이용하여 황사탐지 영상을 제공하고 있다. 황사와 같은 에어러솔이 대기중에 부유하는 경우는 대기 중의 에어러솔에 의한 복사의 감쇄가 12 μm 파장대 보다 11 μm 파장대에서 더 크므로, 두 채널간의 휘도온도의 차이가 생긴다. 일반적으로는 적외차 온도값(TBB 11 μm ~TBB 12 μm)이 양의 값을 갖지만, 화산재나 황사가 대기중에 있는 경우에는 음의 값을 갖는 특성이 있다(TBB 11 μm ~TBB 12 μm < 0). 이러한 특성

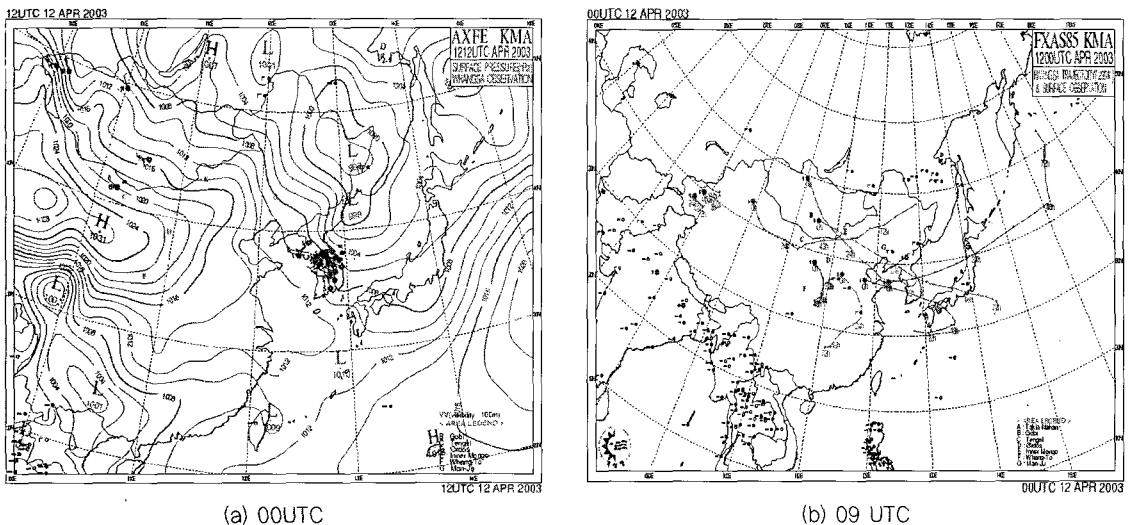


그림 1. 2003년 4월 12일 황사가 발생하였을 때의 일기도

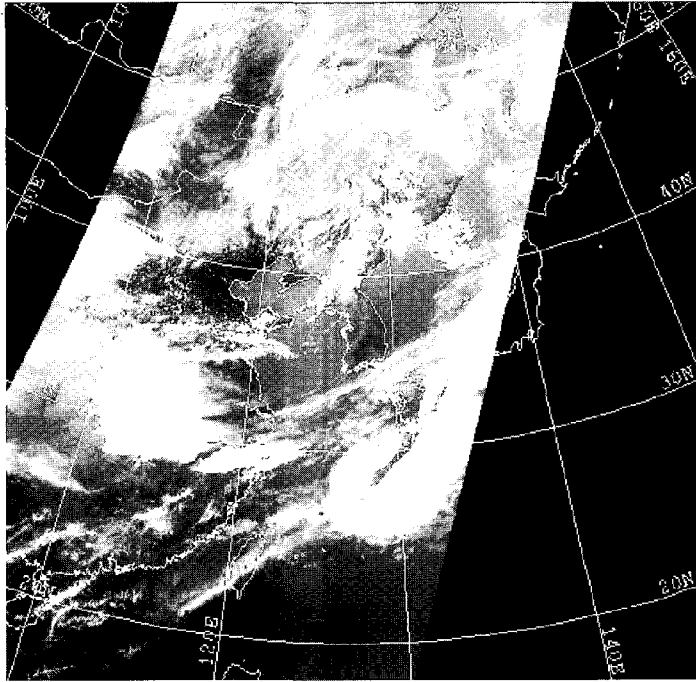


그림 2. 2003년 4월 12일 황사가 발생하였을때의 NOAA 기상위성 영상

을 이용하여 적외차 온도값이 $-0.9 \sim -0.7$ 일 때 영역을 하늘색으로 표출하여 약한 황사역으로, $-2.0 \sim -0.9$ 는 노랑색으로 표출하여 강한 황사역으로 구분한다. 황사 시그널의 강도는 음의 값이 클수록 강하다.

NOAA 위성자료는 신뢰도가 높아서 관측되는 경우는 거의 황사층일 가능성이 높으며, NOAA 위성에서 관측되지 않더라도 GMS 위성에서 관측되고 황색의 pixel이 일정 면적 뭉쳐있으면 황사층일 가능성이 매우 크다. GMS 매시간 황사탐지 영상에서 황사 가능 영역이 순간적으로 변하는 경우를 제외하고 황색 영역이 띠 모양(band type)으로 체계적으로 다가올 때 주의하여야 한다.

기상청에서는 2003년 4월부터 GMS 적외차 영상에 GTS 전문의 시정과 풍향, 풍속이 중첩된 영상을 3시간 간격으로 제공하고 있다(그림 2). 황사 및 에어로솔의 분포 뿐 만 아니라 발원지와 한반도 사이의 시정과 바람 정보를 한 눈에 확인할 수 있어 위성영상을 통한 황사분석에 유용하게 이용된다.

7. 결론

우리나라를 포함한 동북아 지역에 미치는 황사의 발생은 빈도가 증가하고 강도도 점차 높아가고 있다는 연구결과가 나와 있다. 황사가 자주 발생하는 타클리마칸 사막은 먼 거리이므로 우리나라에 영향이 적고 따라서 한반도에 미치는 대부분 황사의 발원지는 고비사막과 황토고원이나 북만주 훈산다크 사막으로서 황사의 예측에는 보다 정확한 발원지의 정보가 매우 중요하다. 한·중·일의 국제협력으로 황사발원지에 관측기기를 설치하고, 중국과 몽골의 발원지 정보제공, 일본의 황사이동 관측, 한국의 기상장 모의에 의한 황사 예측 등이 현재 수행하고 있는 내용이다. 황사는 자연적 발생이니 만큼 영향을 받는 나라에서 민감히 대응할 것은 아니다. 그러나 발원지 국가에서 사막지역의 자연환경을 개선하고 이를 위해서 피해 당사국의 협력이 필요하다.

참고문헌

- 기상청, 2000: 기상청 지상 기상관측법, 147 pp.
- 기상청, 2002 : 기상지진기술개발사업, 지역대기환경 예측기술개발(I), 15-40.
- 기상청, 2003 : 기상지진기술개발사업, 지역대기환경 예측기술개발(II), 181PP.
- 윤용황, 1990 : 한반도에 수송되는 황사의 특징에 관한 연구, 한국기상학회지, 26(2), 111-120.
- Arao, K. and Y. Ishizaka, 1986: Volume and mass of yellow sand dust in the air over Japan as estimated from atmospheric turbidity, *J. Atmos. Sci.*, 31, 674-701.
- Eck, T. F., B. N. Holben, J. S. Reid, O. Dubovik and A. Smirnov, 1999: Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosol, *J. Geophys. Res.*, 104, 31333-31349.
- Iwasaka, Y., H. Minpouura and K. Nagata, 1983: The transport and spatial scale of Asian dust-storm clouds: a case study of the dust-storm event of April 1979, *Tellus*, 35b, 189-196.
- Iwasaka, Y., M. Yamato, R. Imasu and A. Ono, 1988: Transport of Asian dust(KOSA) particles: importance weak KOSA events on the geochemical cycle of soil particles, *Tellus*, 40B, 494-503.
- Joussaume, S., 1990: Three-dimensional simulations of the atmospheric cycle of desert dust particles using a general circulation model, *J. Geophys. Res.*, 95, 1909-1941.
- Shaw, G. E., 1980: Transport of Asian desert aerosol to the Hawaiian island, *J. Appl. Meteor.*, 19, 1254-1259.
- Westphal, D. L., O. B. Toon, and T. N. Carlson, 1987 : A two-dimensional Investigation of the dynamics and microphysics of Saharan dust storms, *J. Geophys. Res.*, 92, 3027-3049.