

# 1994년 봄철의 LIDAR관측을 통한 황사특성 Properties of Yellow Sand with a Lidar Measurement in Spring 1994

權成顏·岩坂泰信·紫田隆·金潤信<sup>1)</sup>

日本 名古屋大學 太陽地球環境研究所

<sup>1)</sup>漢陽大學校 環境 및 産業醫學研究所

Soung-an Kwon, Yasunobu Iwasaka,  
Takashi Shibata, Yoon Shin Kim<sup>1)</sup>

*Solar Terrestrial Environment Laboratory Nagoya University Japan*

<sup>1)</sup> *Institute of Environmental and Industrial Medicine Hanyang University*

## Abstract

The purpose of this report is to describe the lidar measurement of depolarization ratios of particulate matter (Depolarization Ratio of Yellow Sand) and to discuss the transformation of aerosols due to Yellow Sand event. The scattering profile shows high level during Yellow Sand event and scattering layers are thicker as compared to other seasons in about 3~8km, and the values and mode height of scattering ratio corresponded with depolarization ratio.

A distribution of total depolarization ratio during the observation period was 44.7 percent among total cases of  $0.03 < Dt < 0.5$  with scattering ratio  $> 30$  and relative humidity  $< 30$  was satisfied (popular Yellow Sand type).

## 1. 서 론

대기오염의 연구는 확산모델이나 국지적 측면의 분석으로는 큰 제한성을 가진다. 따라서 대기오염의 연구는 최근들어서 지구환경적 측면에서 여러가지 접근방법을 모색하고 있으며, 경계층 범위의 연구를 넘어서 점차 대류권, 성층권의 연구가 활발하게 진행되고 있다. 한국 및 동북아시아지역에서는 아시아 대륙에서 불어오는 모래폭풍우를 일반적으로 '황사' 또는 'Yellow Sand', 'KOSA' 라고 부르고 있다(Arao and Ishizaka, 1986). 이러한 황사현상은 봄철에 빈번히 발생하며 지역적으로 큰 변화를 보이면서 한국과 일본, 북태평양해상으로 이동하며(Uemastu et al., 1983), 그 입자들

은 불규칙한 형상을 갖고 있다(Iwasaka et al., 1983).

황사현상의 시간적 공간적 관측은 대기오염, 雲物理, 放射移動過程의 연구에 중요한 의미를 가진다. 위성관측을 통한 원격탐사는 황사기간중 강력한 황사현상의 공간적 규모의 연구와 시간적 변화를 연구하는데는 유용하나(Iwasaka et al., 1983) 약한 황사현상(기상관측으로 황사로 기록되지 않음)의 관측은 불충분하다. 이러한 위성관측의 약점을 보완한 보다 정확한 대기관측장비라이다(LIDAR: Light Detecting And Ranging)로서 약한 황사현상을 보다 효과적으로 관측할수 있다.

라이다를 이용한 관측은 대기층의 단면적인 분석이 가능하므로 대기중의 에어로졸에 대한 보다 정확한 해석을 가능하게 하며, 특히 편광소멸도를 이용하여 대기중 에어로졸의 형상적 특성을 원격으로 알 수 있다. Hayash-

ida 등(1984)은 라이다를 이용하여 1983년 폭발한 멕시코의 El Chichon 화산으로 인하여 발생한 성층권의 화산운(Volcanic Cloud)의 중심층 바로 아래에서 상대적으로 편광소멸도가 높은 에어로졸층을 관측하였다. 이것은 El Chichon 화산의 폭발에 기인한 불규칙한 형태의 광물입자가 성층권에 유입되었음을 확인한 것이다. 그러나 여러가지 형태의 에어로졸 입자의 편광특성에 관한 지식은 아직까지 충분히 발전되어 있지 못한 상태이다.

최근 황사기간중 라이다를 이용한 몇몇 연구에서 하층 대류권의 편광소멸도가 다른기간의 관측치와 비교할 때 상대적으로 높은 것으로 나타났다 (Kobayashi et al., 1985). 이러한 에어로졸층은 대개 편광소멸도가 0.2 이상을 나타내며, 토양입자가 많은 황사 에어로졸은 라이다 관측을 통하여 하층 대류권에서 중층 대류권에 걸쳐 존재하고 있다는 것을 알 수 있으나(Iwasaka et al., 1988), 황사기간중의 산란비 및 편광소멸도, 상대습도의 분포가 어느 정도이며, 자유 대류권에서 황사현상에 의한 에어로졸의 편광특성에 명확하게 규명하고 있지 못한 실정이다.

따라서 본 논문의 목적은 황사기간중 라이다의 관측을 통한 에어로졸의 산란비와 편광소멸도(황사에어로졸의 편광도), 상대습도의 분포를 살펴보고, 이에 따른 에어

로졸 특성 및 편광특성을 살펴보고자 한다.

## 2. 라이다(LIDAR) 관측

라이다 시스템은 레이저光을 대기중으로 방출시켜서 대기중의 에어로졸과 부딪쳐서 되돌아 오는 산란광을 특수망원경으로 관측하는 장비로서, 특히 일본중부 나고야(名古屋)시(북위 35도, 동경 137도)에 위치하고 있는 나고야대학 태양지구 환경연구소의 라만-라이다는 네오디뮴 야그 레이저(Neodymium-YAG Laser)와 1,000mm의 망원경을 이용한 5개의 채널을 가진 다중 채널 포톤카운터(Multichannel photon counter)로서 관측할 수 있는 장비이다. 이러한 라만-라이다 시스템(Raman Lidar system)은 성층권과 대류권에서 편광소멸도(Depolarization ratio), 산란비(Scattering ratios), 상대습도(Relative humidity), 에어로졸의 입경 등을 관측할 수 있으며, 여기서 편광소멸도는 입자의 편광특성을 이용하여 계산된 값으로서 대기중에 비구형의 입자가 많을 때는 높은 값을 가지게 되며, 산란비는 레이저광의 단위면적당 산란되어 돌아오는 값을 계산하여 대기중에 존재하고 있는 에어로졸의 양을 판단할 수 있는 값이다.

라이다 관측을 통하여 얻어지는 원시데이터는 물리 수

Table 1. Main characteristics of the laser rader system.

|   |   |
|---|---|
| Transmitter                                     |   |
| Laser output                                    | > 350mJ/pulse(1064nm)<br>> 100mJ/pulse(532nm)<br>> 150mJ/pulse(355nm) |
| Repetitional pulse                              | 10Hz(Max)   |
| Laser beam divergence                           | < 1mrad   |
| Receiver  |   |
| Receiver optics                                 | Cassegrain telescope  |
| Receiver diameter                               | > 1000 mm   |
| Receiver field of view                          | 0.2~5.0 mrad  |
| Photon counting method                          |   |
| Multichannel counter                            | Range resolution 50 & 100m  |
| Detection system                                |   |
| PMT-1(404nm)                                    | H <sub>2</sub> O Raman of Nd:YAG THG                                  |
| PMT-2(375nm)                                    | O <sub>2</sub> Raman of Nd:YAG THG                                    |
| PMT-3(532nm)                                    | P-component of Nd:YAG THG   |
| PMT-4(532nm)                                    | S-component of Nd:YAG THG   |
| PMT-5(1064nm)                                   | Basic pulse of Nd:YAG   |
| Obervation target                               |   |
| Raman scattering(355nm)                         | H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub>                                      |
| Mie, Rayleigh scattering<br>(532nm)<br>(1064nm) | Scattering ratio, Polarization ratio<br>Scattering ratio              |

학적 계산을 통하여 에어로졸의 특성을 파악할 수 있는 인자(산란비, 편광소멸도, 상대습도 등)로 전환하여 사용하며, 산란비는 식(1)과 같이 정의하며, (Russell et al., 1976)

$$R(Z) = [B_m(Z) + B_p(Z)] / B_m(Z) \dots\dots\dots (1)$$

여기서  $B_m(Z)$ 와  $B_p(Z)$ 는 각각 고도  $Z$ 에서 분자, 입자 후방산란계수이다. 전체 편광소멸도(Total depolarization ratio)  $Dt$ 는 식(2)와 같이 정의하며,

$$Dt = B_+ / B_{11} = (B_{p+} + B_{m+} / B_{p11} + B_{m11}) \dots\dots\dots (2)$$

여기서  $B$ 는 후방산란계수이며, 첨자 '||'와 '+'는 전환된 레이저光의 평행과 직각의 각각의 후방산란광의 편광성분을 의미하며, 첨자 'P'와 'm'은 각각 입자와 공기분자에 기인한 성분을 의미한다.

이 식에 의하면 구형입자가 미-산란(Mie scattering)에 의하여 단일산란한다면 입사광의 편광은 후방산란광으로 전환되며, 이러한 산란현상만이 존재한다면 라이다에서 관측된 입자의 편광소멸도( $Dp = B_{p+} + B_{p11}$ )는 0이 되고, 편광소멸도( $Dp$ )가 높은 값을 가지게 되면 비구형입자가 존재하는 것을 예상할 수 있다. 따라서 미-산란에서 편광특성의 변화는 얼음결정(Ice Crystal) (McNeil and Carswell, 1975)과 토양입자와 같은 비구형입자(Non spherical particles)의 산란에 기인하게 된다.

상대습도는 일정기온에서의 포화수증기압에 대한 증기압의 비율로서 라이다에서 관측된 수증기혼합비와 기온을 이용하여 계산한다. 포화수증기압은 식(4)(5)와 같

은 Goff-Gratch의 실험결과를 이용한 국제적 이론식을 이용한다. 여기서  $e_w$ 는 물의 포화수증기압이고,  $e_i$ 는 얼음의 포화수증기압,  $T$ 는 기온( $^{\circ}K$ ),  $T_1$ 은 273.16 $^{\circ}K$ 을 의미한다.

$$\log_{10}e_w = 10.79574\{1 - (T_1/T)\} - 5.028 \times \log_{10}(T/T_1) + 1.50475 \times 10^{-4}\{1 - 10^{-8.2969(T/T_1 - 1)} + 0.42873 \times 10^{-3}\{10^{4.76955(1 - (T_1/T))} - 1\} + 0.78614 \dots\dots\dots (3)$$

$$\log_{10}e_i = -9.09685\{(T_1/T) - 1\} - 3.56654 \times \log_{10}(T_1/T + 0.87682\{1 - (T/T_1)\} + 0.78614 \dots\dots\dots (4)$$

증기압은 라만-라이다로 관측된  $H_2O$ 치(물분자의 수)와  $O_2$ 치(건조대기의 수)에서 계산한  $H_2O$ 의 혼합비를 이용한다.

3. 결 과

3. 1 황사기간중의 일일변화

그림 1은 波長 1064nm에서 관측된 산란비의 고도분포변화로서, 1994년 4월달중 관측이 가능했던 12일간의 일일변화이다. 그림 1에서 수평선은 Hama-matsu (名古屋市에서 南東쪽으로 약 100km)에서 라디오존데(Radiosonde)에 의하여 관측된 300, 310, 320, 330, 340, 350, 380, 400 $^{\circ}K$ 의 溫位의 고도분포이다. 라이다의 수직해상도는 50m이다. 라이다의 관측은 일기도와 視野를 통하여 구름이 없는 청명한 날씨일때만 실시하였다. 산란비의 분포를 살펴보면 3~8km의 범위에서 많은 량의 에어로졸이 존재하고 있음을 알 수 있으며, 이 층은 온위의 고도를 따라서 서서히 변화하고 있

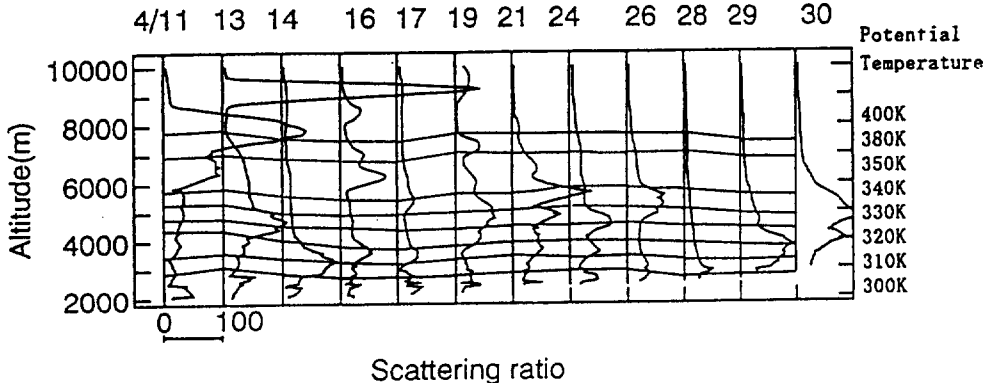


Fig. 1. The vertical profiles of scattering ratio measured at wave length=1064nm on April, 1994.

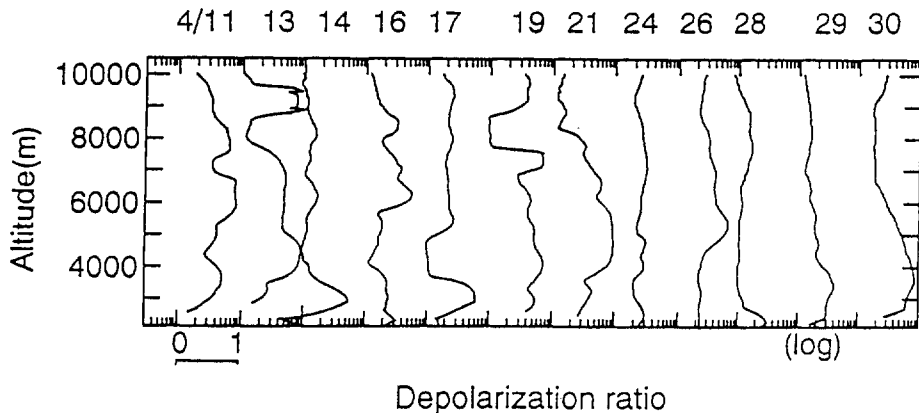


Fig. 2. The vertical profiles of depolarization ratio measured at wave length=532nm on April, 1994.

음을 알 수 있다. 그림 2는 같은 기간중의 편광소멸도의 변화를 나타내고 있다.

그림 1과 2의 산란비와 편광소멸도를 비교할 때, 4월 중의 에어로졸층은 대개 고도 약 3.5km와 5km, 7km 부근을 중심으로 비구형의 에어로졸층이 존재하고 있음을 알 수 있으며, 고도에 따라 연속적으로 관측되는 에어로졸층과 일시적으로 관측되는 에어로졸층에 따라 산란비와 편광소멸도가 차이를 보이고 있다. 그 예가 19일부터 24일까지의 경우로 고도 5km를 중심으로 두께 약 3km정도의 두터운 에어로졸층이 계속적으로 존재하고 있으나, 19일의 관측된 고도 7km 얇은 에어로졸층은 그 이후에 관측되지 않았으며, 특히 고도 7km에서 관측된 에어로졸층은 고도 5km의 에어로졸층에 비하여 훨씬 비구형의 입자가 많이 존재하고 있음을 알 수 있다. 이러한 관측결과는 각기 다른 지역에서 발생한 황사에 에어로졸층이 각기 다른 고도로 이동하고 있거나, 같은 지역에서 발생한 황사가 장거리 이동중 기상변화에 의하여 별개의 황사에 에어로졸층으로 분리되었을 가능성을 가진다.

한편 13일의 경우는 고도 약 10km 부근에서 높은 산란비(SR>50)와 높은 편광소멸도(Dt>0.1)를 가지는 얇은 에어로졸층이 존재하고 있음을 알 수 있는데, 이 층은 황사에 에어로졸이라기 보다는 빙정운(Ice crystal cloud)에 기인한다고 볼 수 있다. 이러한 권운(cirrus cloud)과 같은 빙정운(Ice crystal cloud)은 편광소멸도가 0.5이상 높은 값을 가지며(Pal and Carswell, 1976), 두께가 500m 이하(kobayashi et al., 1985)로서 자주 관측되고 있으며, Russell(1976)의 경우에서도 10km 부근에서 큰 변화를 보이는 피크가 관측되

고 있으며, 대개 권계면하층에 존재하는 구름층으로 판단하고 있다.

### 3. 2 상대습도와 산란비의 빈도분포

황사는 대개 중국의 건조한 사막지역에서 발생하여 이동하므로 에어로졸의 량을 예상할 수 있는 산란비와 상대습도는 높은 관련성을 가질 것으로 예상되며, 그 관련성을 살펴보기 위하여 1994년 4월부터 9월까지 라이다에 의하여 관측된 산란비와 상대습도(고도 2~10km의 범위, 수직해상도는 50m)를 월별로 구분하여 빈도분석하였다.

그림 3과 4는 상대습도와 산란비의 월별 빈도분포로서

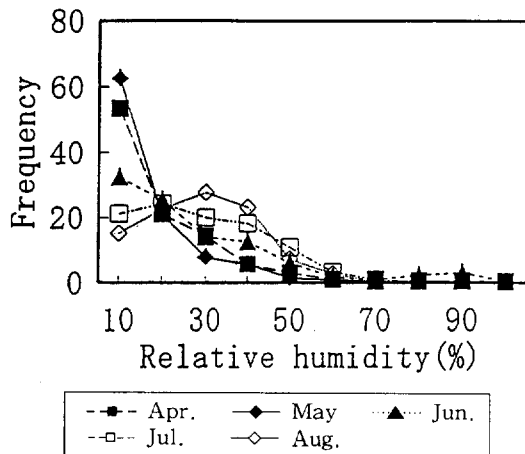


Fig. 3. Distribution of relative humidity in the Troposphere measured by a LIDAR from April to August, 1994.

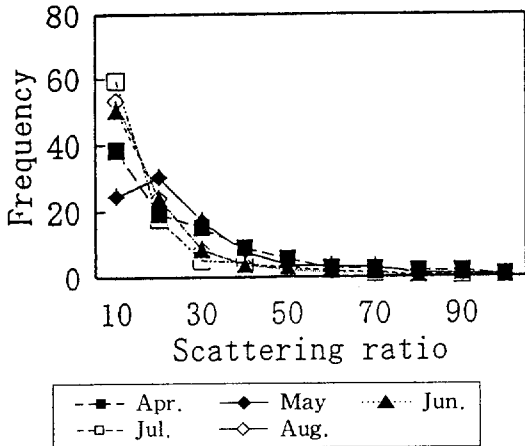


Fig. 4. Distribution of scattering ratio in the Troposphere measured by a LIDAR from April to August, 1994.

곡선 1은 4월, 곡선 2는 5월, 곡선 3은 6월, 곡선 4는 7월, 곡선 5는 8월의 분포를 나타낸다. 상대습도의 분포를 보면 주요한 황사기간인 4월과 5월의 습도가 현저히 낮은 것을 알 수 있으며, 봄철에 비하여 여름철인 6월~8월의 습도와 비교해 볼 때 약 30% 부근에서 상대습도의 변화가 일어나고 있음을 알 수 있다. 그림 2의 산란비 분포를 보면 봄철인 4월과 5월은 여름철에 비하

여 산란비 30% 이상의 많은 에어로졸층이 존재하며, 특히 4월은 5월에 비하여 40% 이상의 다량의 에어로졸층이 분포하고 있음을 알 수 있다. 이러한 분포특성을 통하여 4월의 황사기간중에는 건조하고 많은 량의 황사가, 5월에는 건조하고 약한 황사가 이동하고 있음을 예상할 수 있다.

3. 3 황사의 광학적 특성 및 습도분포

라만 라이다로 관측되는 대기층의 관측인자는 산란비(에어로졸의 량), 편광소멸도(에어로졸의 非球形性), 에어로졸의 입경, 상대습도, 수증기 혼합비, 온도 등이 있으나, 황사에어로졸의 특성, 특히 수용성물질을 포함하고 있는 황사에어로졸의 변질가능성을 살펴보기 위하여 1994년 4월의 고도 2~10km의 범위에서 산란비와 상대습도에 따른 전편광소멸도(Dt)를 빈도분석하였다. 여기서 산란비와 상대습도의 구분은 3. 2에서 나타난 월별 빈도분포를 참고로 하여 황사시기와 비황사시기를 비교하여 급격한 변화가 나타나는 상대습도는 30%, 산란비는 30%와 50%를 분기점으로 하여 대기상태를 분류하였다. 이에 따른 황사기간중의 에어로졸의 유형은 일반 에어로졸(산란비<30, 상대습도<30), 일반 황사에어로졸(산란비>30, 상대습도<30), 변질가능한 황사에어로졸(30<산란비<50, 상대습도>30), 구름(산란비>50, 상대습도>30)으로 구분하였다.

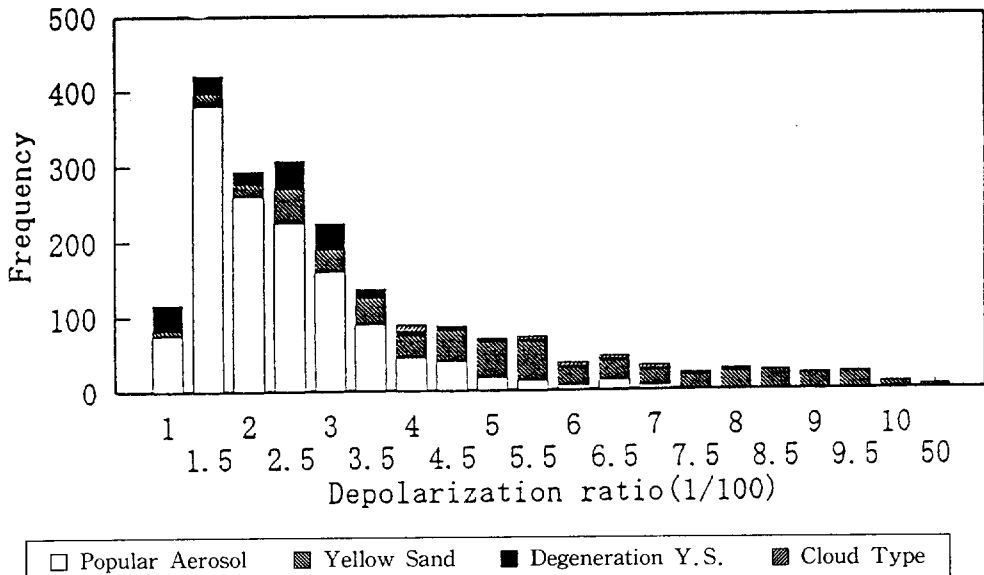


Fig. 5. The Frequency of total depolarization ratio in the Troposphere measured by a LIDAR at April, 1994.

일반적으로 라이다 관측에 의한 대류권 에어로졸의 전편광소멸도는 대부분 약 0.025 정도로 평가되고 있으며, 이 값은 대류권에서 분자편광소멸도 추정치의 2.5%에 대응하는 값이다(Kobayashi and Hayashida, Iwasaka 1987). 이것은 편광소멸도가 0.025 이하일 때는 황사 등과 같은 혼탁요인의 영향을 받지 않는 청정한 구형에어로졸이 존재하는 상태임 의미한다. 따라서 황사기간중에는 어느정도 비구형성 에어로졸이 존재하고 있는가를 비교하기 위하여 에어로졸 유형에 따른 편광소멸도의 빈도분포를 실시하였다. 그 결과를 살펴보면 0.01~0.015 범위의 전편광소멸도는 전체의 26.5%를 차지하고 있으며, 0~0.025 범위의 전편광소멸도는 전체의 55.5%를 차지하고 있다(그림 5). 그러므로 황사기간중에는 대류권 에어로졸중 약 50%정도가 황사에 의하여 영향을 받은 비구형 에어로졸임을 알 수 있다.

또한 비구형 에어로졸층으로 예상되는 전편광소멸도가  $0.03 < Dt < 0.5$ 의 범위에서는, 일반 황사에어로졸(산란비 $>30$ , 상대습도 $<30$ )의 경우는 전체의 44.7%를 차지하였고, 변질가능한 황사에어로졸( $50 > \text{산란비} > 30$ , 상대습도 $>30$ )의 경우는 전체의 9.58%를 차지하였다. 이러한 결과는 4월중 일본 중부상공에는 많은 량의 건조한 황사에어로졸이 존재하고 있으며, 일부에서는 수용성 물질을 포함하고 있어서 습도의 변화에 따라 변질이 일어날 수 있는 황사에어로졸의 존재를 예상할 수 있다.

#### 4. 결 론

1994년 4월의 황사기간중의 일본名古屋의 라이다 관측을 통하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 황사에어로졸층은 대개 고도 약 3.5km와 5km, 7km부근에서 중심으로 이동하고 있으며, 각각 다른 지역에서 발생한 황사층이 다른 고도로 이동하고 있거나, 같은 지역에서 발생한 황사가 장거리 이동중 변화하면서 별개의 황사층으로 분리되었을 가능성을 가진다.
2. 봄철 황사는 산란비 40% 이상, 편광소멸도 0.02 이상의 에어로졸층이 분포하고 있으며, 특히 4월의 황사기간중에는 건조하고 많은 량의 황사가, 5월에는 건조하고 약한 황사가 이동하고 있음을 알 수 있다.
3. 봄철 대류권 에어로졸의 약 50%정도가 황사에 의하여 영향을 받은 비구형 에어로졸임을 알 수 있다.
4. 4월중 일본 중부상공에는 전체의 44.7%가 일반

황사에어로졸로 분류된 건조한 황사에어로졸이 존재하고 있으며, 일부에서는 변질가능한 에어로졸의 존재를 예상할 수 있다.

본 결과를 통하여 봄철 황사현상은 하층, 중층의 대류권 뿐 만 아니라 전체 대류권에서 영향을 받고 있는 것으로 나타나고 있으며, 따라서 라이다와 같은 원격탐사장비를 이용한 대류권관측 및 지상, 항공기 샘플링, 流跡線해석 등의 방법을 통한 황사에어로졸의 이동경로 및 변질과정에 대하여 구체적인 연구가 필요하며, 또한 라이다 관측을 통한 황사통과일과 기상대의 황사관측일과 비교해 볼 때, 대류권 하층에서 이동하고 있는 황사에어로졸층은 지상 및 위성을 통한 관측으로는 어려움이 많은 것으로 사료되므로 우리나라에서도 보다 정확히 대기층을 관측할 수 있는 관측장비의 개발 및 보급이 시급하다고 사료된다.

#### 참 고 문 헌

- Arao, K. and Y. Ishizaka(1986) Volume and mass of Yellow Sand in the air over Japan as estimated from atmospheric turbidity, J. Meteorological Society of Japan, 64(1), 79-94.
- Hayashida, S.A. Kobayashi, and Y. Iwasaka (1984) Lidar measurements of stratospheric aerosol content and depolarization ratio after the eruption of volcano El Chichon: measurements at Nagoya, Japan, Geof. Int., 23,277-288.
- Iwasaka, Y., H. Minoura and K. Nagaya(1983) The transport and spatial scale of Asian dust-storm clouds: A case study of 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 of weak KOSA events on the geochemical cycle of soil particles, Tellus, 40B, 494-503.
- Kobayashi, A., S. Hayashida, S. Okada and Y. Iwasaka(1985) Measurements of the depolarization properties of KOSA(Asian dust-storm) particles by a laser radar in spring 1983, J. Met. Soc. Japan, 63,

- 144-149.
- Kobayashi, A., S. Hayashida, Y. Iwasaka, M. Yamato and A. Ono(1987) Consideration of depolarization ratio measurements by lidar in relation to chemical composition of aerosol particles, *J. Met. Soc. Japan*, 65(2), 303-307, 1987.
- McNeil, W.R. and A.I. Carswell(1975) Lidar depolarization studies of the troposphere, *Appl. Opt.*, 14, 2158-2168.
- Pal, S.R. and Carswell, A.I.(1976) Multiple scattering on atmospheric clouds: Lidar observations, *Appl. Opt.*, 15, 1990-1995.
- Russell, P.B., W. Viezee, R.D. Hake, Jr. and R.T. Collis(1976) Lidar observations of the stratospheric aerosol: California, October 1972 to March 1974, *Quart. J. R. Met. Soc.*, 102, 675-695.
- Uematsu, M., R.A. Duce, J.M. Prospero, L. Chen, J.T. Merrill and R.L. McDonald(1983) Transport of mineral aerosol from Asia over the north Pacific ocean, *J. Geophysical Research.*, 88, 5343-5352.