다파장 라만 라이다 관측을 통한 황사의 이동 고도 분포에 따른 광학적 특성 변화 규명

신성균* · 박영산** · 최병철** · 이권호*** · 신동호**** · 김영준* · 노영민*†

*광주과학기술원 환경공학부, **국립기상연구소 응용기상연구과,

경일대학교 공간정보공학과, *국립환경과학원 기후대기연구부 대기질통합예보센터

Retrieval of the Variation of Optical Characteristics of Asian Dust Plume according to their Vertical Distributions using Multi-wavelength Raman LIDAR System

Sung-Kyun Shin*, Young-San Park**, Byoung-Choi**, Kwonho Lee***,
Dongho Shin****, Young J. Kim* and Youngmin Noh*†

*School of Environmental Science & Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology (GIST),

**Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Research,

***Department of Geoinformatics Engineering, Kyungil University

****Air Quality Forecasting Center, Climate and Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research

Abstract : The continuous observations for atmospheric aerosols were conducted during 3 years (2009 to 2011) by using Gwangju Institute of Science and Technology (GIST) multi-wavelength Raman lidar at Gwangju, Korea (35.10°N, 126.53°E). The aerosol depolarization ratios calculated from lidar data were used to identify the Asian dust layer. The optical properties of Asian dust layer were different according to its vertical distribution. In order to investigate the difference between the optical properties of each individual dust layers, the transport pathway and the transport altitude of Asian dust were analyzed by Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) model. We consider that the variation of optical properties were influenced not only their transport pathway but also their transport height when it passed over anthropogenic pollution source regions in China. The lower particle depolarization ratio values of 0.12 ± 0.01 , higher lidar ratio of 67 ± 9 sr and 68 ± 9 sr at 355 nm and 532 nm, respectively, and higher Ångström exponent of 1.05 ± 0.57 which are considered as the optical properties of pollution were found. In contrast with this, the higher particle depolarization ratio values of 0.21 ± 0.09 , lower lidar ratio of 48 ± 5 sr and 46 ± 4 sr at 355 nm and 532 nm, respectively, and lower Ångström exponent of 0.57 ± 0.24 which are considered as the optical properties of dust were found. We found that the degree of mixing of anthropogenic pollutant aerosols in mixed Asian dust govern the variation of optical properties of Asian dust and it depends on their altitude when it passed over the polluted regions over China.

Key Words : Lidar, Asian dust, Optical properties, Vertical distribution, Depolarization ratio

접수일(2014년 9월 11일), 수정일(1차 : 2014년 10월 1일), 게재확정일(2014년 10월 16일).

† 교신저자: 노영민(nym@gist.ac.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

요약 : 광주과학기술원의 다파장 라만 라이다를 이용한 에어로졸 연속관측이 2009년부터 2011년까지 3년간 수행되었다. 장기 연속 관측을 통해 얻어진 라이다 신호들의 분석을 통해 편광소멸도를 산출해 내었고, 편광소멸도를 통하여 황사 층을 구분해 내었다. 구분된 황사의 층의 광학적 특징들이 관측 고도에 따라 다르다는 것을 신호의 분석으로부터 밝혀졌다. 이러한 광학적 특징의 차이를 규명하기 위하여, HYSPLIT 모델을 이용하여 각각 관측된 황사 층들의 유입 경로와 이동 중 고도를 분석하였다. 이러한 황사의 관측 고도에 따른 광학적 특성의 변화는 황사가 장거리 이동 중 통과한 오염물질 발생 지역에서 발생한 오염물질과의 혼합으로부터 기인한 것으로 사료된다. 특히 오염물질 발생 지역을 지날 때의 황사 층의 고도는 황사의 광학적 특성 변화에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 3년간 라이다 관측 시스템으로 관측한 황사 중, 중국 산업지역 및 인구밀집도가 높은 지역 등과 같은 인위적 기원의 오염물질 발생 지역을 통과할 때의 고도가 1 km 이하 일 때, 0.12 ± 0.01 의 낮은 편광소멸도, 355 nm와 532 nm 파장에서 각각 67 ± 9 sr, 68 ± 9 sr의 낮은 라이다비, 1.05 ± 0.57 의 낮은 옹스트롬 지수(Ångström expon) 보였으며, 이는 오염물질이 갖는 광학적 특성 값과 유사하다. 이와 반면 황사가 3 km 이상의 높은 고도로 오염물질 발생 지역을 통과할 경우는 0.21 ± 0.09 의 편광소멸도, 355 nm와 532 nm 파장에서 각각 48 ± 5 sr, 46 ± 4 sr의 라이다 비, 0.57 ± 0.24 의 옹스트롬 지수를 보이며 이는 순수황사의 광학적 특성과 유사하다. 이는 황사가 중국 오염물질 발생지역을 통과할 때의 고도가 혼합상태의 황사 전체의 광학적 특성에 큰 영향을 미치는 것으로 판단되며, 낮은 고도에서는 오염물질과의 혼합의 정도가 증가하여, 오염물질의 광학적 특성이 우세하게 나타나는 반면, 높은 고도에서는 오염물질과 황사의 혼합이 상대적으로 적게 일어난다고 사료된다.

1. 서론

사막 지역에서 발생하는 황사는 대기에 존재하는 다양한 에어로졸 가운데 중요하게 다뤄져야 하는 에어로졸의 하나이다. 황사 입자는 지역이나 시간에 따라 다양한 수농도, 크기 및 연직분포 등을 갖고 존재하기 한다. 이러한 이유로 황사 입자가 기후 변화에 미치는 영향에 대한 이해도는 여전히 낮은 상태이며 관련 연구가 요구된다(Durant *et al.*, 2009, Stocker, 2013). 동북아시아 지역은 전 세계 황사 배출지역 중 가장 큰 지역의 하나이다. 중국 서부의 타클라마칸 사막(Taklamakan desert)과 중국 북서부와 몽골지역에 걸쳐 분포하는 고비 사막(Gobi desert)로부터 기인하는 황사 입자들은 한국을 포함해 중국, 일본 등이 속하는 동북아시아 지역뿐만 아니라, 태평양을 거쳐 북미 서부 지역까지 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Husar *et al.*, 2001, Liu *et al.*, 2003). 특히, 동북아시아 지역에서 발생하는 황사가 대기에 미치는 영향은 다른 지역에서 발생하는 황사보다 훨씬 복잡한 것으로 알려져 있다. 황사 발원지에서 생성된 황사입자는 장거리 이동과정에서 중국의 대도시 및 공업지역을 지나면서 인위적 기원의 오염물질들과 혼합되기 때문이다(Sun *et al.*, 2005; Yu *et al.*, 2006).

이러한 혼합상태의 황사가 대기에 미치는 영향을 규명하기 위해 Aeolian Dust Experiment on Climate Impact (ADEC) (Mikami *et al.*, 2006), Asian Pacific Regional Aerosol Characterization Experiment(ACE-Asia) (Huebert *et al.*, 2003) 등과 같은 장기간의 현장 관측을 통한 선행 연구가 진행되었다. Yu *et al.*(2006)과 Carrico *et al.*(2003)은 황사 발원지역에서의 황사의 특성과 장거리 이동을 거친 황사의 특성이 오염물질과의 혼합으로 인하여 분명한 차이가 난다는 것을 보고한 바 있으며, 최근에 발표된 Zhang *et al.*(2010)의 연구에 따르면 혼합 상태의 황사 입자의 특성은 황사와 오염물질 간의 혼합 정도에 크게 의존한다는 것을 밝혀냈다. 이러한 선행 연구 결과들은 사막지역과 같은 발원지역으로부터 발생한 황사가 장거리 이동 중에 공업 지역 등을 지날 때 다른 오염물질과 혼합하며, 다른 오염물질과 혼합상태로 존재하는 황사의 특성은 황사 발원지에서의 보인 광학적 특성과 분명히 다르다는 것을 의미한다. 하지만 황사가 장거리 이동 중 오염물질 발생 지역을 통과할 때의 고도를 고려한 혼합 상태의 황사의 광학적 특성의 변화에 대한 연구는 충분히 이루어지지 않았다.

라이다(Light Detection And Ranging, LIDAR)는 대기에 에어로졸의 연직 분포 및 광학적 특성의 실시간 관측이

가능한 최첨단 능동형 원격 탐사 장비이다. 본 연구에서는 라이다 시스템으로부터 3년간(2009년 ~ 2011년) 획득한 데이터들을 이용하여, 황사 입자의 고도 분포와 광학적 특성들을 분석하였다. 황사 층의 구분을 위하여 라이다 관측으로 얻을 수 있는 편광소멸도(Depolarization ratio)를 사용하였다(Cairo *et al.*, 1999; Murayama *et al.*, 1999). 구분된 황사 층의 고도의 정보와 Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory(HYSPLIT) 모델(Draxler and Rolph, 2003)을 통해 황사의 이동 경로 및 이동 중 고도를 분석하였다.

특히, HYSPLIT 모델 결과를 통해 얻어진 이동 경로와 이동 중 고도를 통해, 중국 오염지역을 거쳐서 한반도로 유입된 황사를 밝혀 내었으며, 중국 오염지역 통과 시 고도를 기준으로 한 혼합 상태의 황사의 광학적 특성의 분류를 하였고, 이를 통해서 황사가 오염물질 발생 지역을 통과할 때의 고도가 혼합상태의 황사 전체 광학적 특성의 변화에 어떠한 영향을 미치는지 알아보려 한다.

2. 연구방법

1) 다파장 라만 라이다(Multi-wavelength Raman lidar)

본 연구에서 사용된 다파장 라만 라이다(Multi-wavelength Raman Lidar)는 광주과학기술원(35.10°N, 126.53°E)에서 개발 운용 중이며 대기 에어로졸의 연직 분포와 광학적 특성 등을 산출할 수 있다. 광주과학기술원의 다파장 라만 라이다는 355, 532, 1064 nm의 세 파장에서 에어로졸 후방산란 계수(Aerosol Backscatter coefficient, β_r), 355, 532 nm의 두 파장에서의 에어로졸 소산 계수(Aerosol Extinction coefficient, α_e) 및 532 nm의 파장에서의 편광소멸도를 산출할 수 있다. 본 연구에서 황사의 광학적 특성을 알아보기 위한 라이다 비(Lidar ratio, S)는 에어로졸의 성분을 나타내는 지표로서 β_r 와 α_e 의 비(α_e / β_r)로 얻어지며, 광흡수성이 높은 에어로졸일수록 비교적 높은 값을 나타내고, 황사와 같은 광흡수성이 낮은 에어로졸에서는 상대적으로 낮은 값을 보인다. 에어로졸의 크기와 굴절률(refractive index)에 관련된 지표인 옴스트롬 지수(Ångström exponent, A)는 355 nm와 532 nm 파장 각각에서의 β_r 로부터 얻어지며, 입자의

크기가 큰 에어로졸일수록 작은 값을 보인다. 광주과학기술원의 라만 라이다 시스템 구성과 라이다 신호 분석 방법에 대해서 Noh *et al.*(2007, 2008)에 자세히 설명된 바 있다.

특히, 본 연구에서 황사 입자의 구분을 위해 사용된 에어로졸 편광소멸도(Aerosol depolarization ratio, δ_a)는 532 nm 파장에 설치된 편광채널로부터 산출할 수 있다. 에어로졸 편광소멸도를 구하기 위해서는, 우선적으로 체적 편광소멸도(Volume depolarization ratio, δ)를 계산하여야 한다. 이는 본 다파장 라만 라이다 시스템에서 방출된 532 nm 파장의 레이저 빔과 후방산란되어 들어오는 신호들의 편광 성분 비를 통하여 구할 수 있고, 다음 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\delta = \frac{P_{\perp}}{P_{\parallel} + P_{\perp}} \quad (1)$$

식 (1)에서의 $P_{\parallel}$ 와 $P_{\perp}$ 는 각각 대기 에어로졸에 의해 후방산란 되어 들어오는 빛의 수평 편광 성분과 수직 편광 성분을 나타낸다. 라이다 시스템으로부터 대기로 조사되는 레이저 빔은 수직과 수평 편광 성분을 모두 갖는 빛을 방출하지만 대기 중에서 황사나 빙정구름과 같은 비구형 입자를 만나게 되면 방사된 빛의 수평 편광 성분은 수직 성분으로 바뀌게 된다. 이 때, 두 신호의 비를 δ 라고 하고, 이는 대기 에어로졸 중 비구형 입자들을 밝혀내는데 유용하다. 하지만 δ 는 대기 중 에어로졸 뿐만 아니라 공기 분자에 의한 편광의 변화(Molecular depolarization ratio, δ_m)를 포함하고 있는 값이고, 대기 에어로졸의 입자의 수 농도가 감소하면, 그 값 역시 감소하는 경향이 있다(Cairo *et al.*, 1999). 따라서 본 연구에서는 황사와 같은 비구형 입자와 구형 에어로졸 입자의 정확한 구분을 위해 δ_a 를 산출하려 한다. δ_a 는 후방산란 비(Backscattering ratio, R)와 δ 및 δ_m 을 이용하여, 산출될 수 있고, 다음의 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$\delta_a = \frac{\delta(z)R(z) - \delta_m}{R(z) - 1} \quad (2)$$

식 (2)에서 δ_m 은 공기 분자에 의한 편광소멸도로, 광주과학기술원 다파장 라만 라이다 시스템에서는 0.0044의 값이 사용된다(Behrendt and Nakamura, 2002). 여기서 $R(z)$ 는 고도 z km에서 후방산란 비($(\beta_r + \beta_m) / \beta_m$)이고 β_m 은 공기 분자에 의한 후방산란계수를 나타낸다.

2) 황사 유입 경로 및 고도 분석

δ 를 이용하여 구분된 한반도로 유입된 황사의 고도 정보는 HYSPLIT의 모델의 입력자료로 활용되었다. 황사 층의 역궤적분석의 시작점은 다파장 라만 라이다 시스템의 위치(35.10°N, 126.53°E)로 입력하였으며, 황사 층이 광주과학기술원 다파장 라만 라이다 시스템으로 관측된 시간으로부터 3일(72시간) 이전까지의 이동 경로와 이동 중 고도를 추적하였다.

3. 결 과

본 연구에서는 2009년부터 2011년까지 3년동안 광주과학기술원의 다파장 라만 라이다를 이용하여 수행된 연속 관측 중 황사가 관측된 날들의 라이다 데이터들을 분석하였다. 분석에 사용된 라이다 데이터 중 라만 산란 신호는 산란 강도가 탄성 신호에 비해 10^3 배 정도 약하여 주간 관측 시에는 태양광과 같은 주변 잡음 신호로 인하여 관측에 어려움이 있어, 라만 신호의 관측은 야간에만 수행되었다.

Fig 1.에 2011년 3월 23일 세계표준시 기준 10시 53분부터 13시까지 얻어진 대기 에어로졸의 후방산란 신호를 나타내었다. 관측 시 레이저 빔과 수신 망원경의 시야각(Field of view)의 차이로 발생하는 중첩고도의 영향으로 관측 일의 최저 관측 고도는 1 km 였다. 관측 당일 구름은 관측되지 않았으며, 약 1 km 와 2 km 사이와 약 3.8

km 에서 5.5 km 사이에 에어로졸 층이 연속관측 되었음을 확인할 수 있다. 하지만 이는 에어로졸의 고도 분포와 같은 일부 정보만 제공할 뿐 다른 의미 있는 정보를 나타내진 않는다. 이날 관측된 에어로졸의 규명을 위해 좀 더 다양한 분석이 필요하다.

Fig 2.에 같은 날 얻어진 연속 관측 데이터를 평균하여 분석한 에어로졸의 δ , δ 및 β 의 연직분포를 나타내었으며(좌), 355 nm와 532 nm 파장에서의 β 로부터 계산된 A 와 355 nm 와 532 nm 파장에서의 S의 고도별 분포를 나타내었다(우).

본 연구에서는 0.2 이상의 높은 δa 값을 갖는 순수 황사 입자 뿐만 아니라 오염 물질과 혼합되어 있는 황사의 구분하고자, 선행 연구로부터 얻어진 오염된 황사(Polluted dust)의 δa 값인 0.08을 문턱값(Threshold value)으로 사용하여(Chen *et al.*, 2009; Tesche *et al.*, 2011) 황사를 구분하였다. 2011년 3월 23일에 관측된 1 km 와 2 km 사이에서 보이는 0.08 이상의 δa 값과 3.8 km 와 5.5 km 사이에서 분석된 0.18 이상의 높은 δa 값은 각각의 에어로졸 층이 황사로 이루어져 있음을 알 수 있다. 하지만 같은 날 얻어진 라이다 관측 데이터로부터 분석된 황사의 광학적 특성은 고도에 따라 다를 수 있다. 1 km 와 2 km 사이로 한반도로 유입된 황사 층에서의 S는 355 nm에서 60 sr 에서 79 sr, 532 nm에서 53 sr 에서 78 sr의 높은 값을 반면, 3.8 km 와 5.5 km 사이에서 관측된 황사 층의 S는 355 nm와 532 nm에서 각각 49 sr 에서 54 sr 및 40 sr 에서 60 sr 의 훨씬낮은 값을 보였다. 마찬가지로, A 도

Figure 1. Contour plot of backscattered signal of dust layer observed on 23 March 2011.

Figure 2. (Left) The vertical profiles of backscattering coefficient (Black), volume depolarization ratio (red), and aerosol depolarization ratio (blue) at 532 nm and (Right) 355/532 backscatter coefficient related Ångström exponent (black), the lidar ratio at 355 nm (purple) and 532 nm (green) on 23 March 2011.

Figure 3. The result from 72 hour backward trajectories displaying the Asian dust plume observed by GIST Multi-wavelength Raman Lidar on 23 March 2011 at dust layer of altitude 1.5 km (red) and 4.6 km (blue). The aerosol source regions were denoted as yellow colored box (desert regions) and gray colored box (polluted regions in China).

고도에 따라 분명한 차이를 보였다. 높은 고도에서의 Å 값은 0.5에서 0.9 정도의 값은 보인 반면, 낮은 고도에서의 Å 값은 1.0 이상의 비교적 높은 값을 보였다.

이러한 고도에 따른 황사의 광학적 특성의 차이를 밝

히기 위하여 분석된 HYSPLIT 모델의 분석 결과를 Fig 3.에 나타내었다. 2011년 3월 23일 1 km와 2 km 사이에서 관측된 황사 층과, 3.8 km와 5.5 km 사이에서 관측된 황사 층 모두 사막 발원지로부터 기인하여 중국 공업지역

Figure 4. Scatter diagram of aerosol depolarization ratio versus (top) Ångström exponent (355/532 nm backscatter related), (middle) lidar ratio at 355 nm, and (bottom) lidar ratio at 532 nm with respect to its altitude when it passed over polluted regions of China.

을 통과하여 한반도로 유입되었음을 확인할 수 있다. 하지만, 중국 공업지역을 통과할 때의 고도는 각각의 황사 층마다 차이가 있음을 알 수 있다. 낮은 고도로 유입된 황사 층의 경우 중국 공업 지역을 통과할 때, 2 km 이하의 낮은 고도로 통과한 반면, 높은 고도로 유입된 황사 층의 경우는 중국 오염물질 발생 지역을 통과할 때 5 km 이상의 높은 고도로 통과하였다.

Fig. 4에 2009년부터 2011년, 3년간 관측된 황사층들의 광학적 특성들을 중국 오염지역을 지날 때의 고도에 따라 분류하였고, 그 값들을 Table 1에 정리하였다.

한반도로 유입된 황사 에어로졸 중 중국 오염지역을 통과할 때의 고도가 3 km 이하인 경우의 평균 δ_a 값은 0.12 ~ 0.14로 나타났으며, 이 중 가장 낮은 값은 1 km 이하의 고도로 통과하였을 때로, 0.12의 평균 값을 보였다. 또한 S 평균값 또한 355 nm와 532 nm에서 각각 67 ± 9 sr, 68 ± 9 sr로 1 km 이하의 고도로 통과하였을 때 가장 높은 값을 보였다.

이와 달리, 중국 오염물질 발생 지역을 지날 때 3 km 이상의 고도로 지나 한반도로 유입된 황사 층들의 평균 δ_a 값은 0.21 ± 0.09 로 다른 낮은 고도로 이동한 경우와 분명한 값의 차이를 보였으며, 평균 S 값은 355 nm와 532 nm에서 각각 48 ± 5 sr 및 46 ± 4 sr 값을 보였으며, A 값 역시 0.57 ± 0.24 의 값을 보여 다른 낮은 고도로 통과하여 유입된 황사 층과는 확연한 차이를 보임을 알 수 있다.

이는 사막지역으로부터 기인한 황사입자들이 장거리 이동 시에 다른 오염물질들과 혼합하며, 황사 본래의 광학적 특성에 영향을 미친다는 것을 나타낸다. 특히, 이러한 변화의 특성은 황사입자들이 오염물질 발생 지역을 통과할 때의 고도와 밀접한 관계가 있는 것으로 사료된다. 황사 입자들이 중국의 오염물질 발생지역을 통과할 때 낮은 고도로 통과한다면, 오염물질과 혼합할 수 있는 가능성 및 혼합의 정도가 증가한다는 것으로 판단할 수 있으며, 이와 다르게 높은 고도에서는 오염물질과의 혼합이 크게 일어나지 않아, 비교적 황사 순수의 광학적 특성에 큰 영향을 받지 않았다고 판단된다.

Table 2에 세계 각지에서 라이더 관측 데이터로 얻어진 에어로졸의 광학적 특성을 정리하였다. 본 연구에서 관측된 황사의 광학적 특성 값 중 낮은 δ_a 와 높은 A 및 S 값을 보인 경우는 황사 층이 오염물질 발생 지역을 통과

Table 1. Optical properties of Asian dust layer according to their height when it passed over polluted region in China

Transport height	Aerosol depolarization ratio	Lidar ratio [sr]		Ångström exponent
		355 nm	532 nm	
Below 1 km	0.12 ± 0.01	67 ± 9	68 ± 9	1.05 ± 0.57
1 km ~ 2 km	0.14 ± 0.01	66 ± 10	64 ± 11	1.08 ± 0.64
2 km ~ 3 km	0.13 ± 0.04	59 ± 5	66 ± 9	1.20 ± 0.58
Above 3 km	0.21 ± 0.09	48 ± 5	46 ± 4	0.57 ± 0.24

Table 2. Optical properties of aerosol particles observed by lidar in worldwide locations

Particles	Aerosol depolarization ratio	Lidar ratio [sr]		Ångström exponent	Description
		355 nm	532 nm		
Asian dust	0.20 ± 0.04	56 ± 10	51 ± 6	0.98 ± 0.27	Sakai <i>et al.</i> , 2002
Non-dust	0.09 ± 0.004	58 ± 9	60 ± 10	1.41 ± 0.67	
Smoke	0.08 ± 0.01	46 ± 7	65 ± 8	0.93 ± 0.26	
Asian dust	$0.20 \sim 0.30$	-	-	-	Over Japan(Liu <i>et al.</i> , 2002; Murayama <i>et al.</i> , 2002)
	$0.15 \sim 0.2$	-	-	-	Beijing (Shimizu <i>et al.</i> , 200)
Air mass originated from polluted northern India			60 – 90		Mueller <i>et al.</i> , 2003
Pollution plumes from European continent			30 – 65		Ansmann <i>et al.</i> , 2002
Asian dust passed over polluted region of China (below 3km)	0.13 ± 0.01	64 ± 8	66 ± 9	1.11 ± 0.59	This study
Asian dust passed over polluted region of China (above 3km)	0.21 ± 0.09	48 ± 5	46 ± 4	0.57 ± 0.24	This study

할 때 낮은 고도로 유입된 경우에 나타났으며, 이러한 광학적 특성 값은 세계 다른 지역에서 얻어진 오염물질의 광학적 특성 값과 비슷한 결과를 나타냈음을 알 수 있다. 이는 혼합 상태의 황사에서 오염물질이 더욱 더 우세하게 작용하여 나타난 결과로 사료되며, 반대로 높은 고도에서 높은 δ_p 와 낮은 A 및 S 값은 오염물질의 영향을 거의 받지 않아 황사의 광학적 특성이 유지될 수 있었다고 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 광주과학기술원의 다파장 라만 라이더 시스템을 이용하여 2009년부터 2011년, 3년 동안 광주에서 실시한 대기 관측으로 얻어진 라이더 데이터의 분석을 통하여 δ_p 를 산출하고 황사 층을 구분하였으며, 고도 분포에 대한 정보를 획득 하였다. 구분 된 황사의 층에 대한 정보는 HYSPLIT 모델의 입력 자료로 활용되어, 라이더 관측 지점에서 관측된 황사의 유입경로를 추적하는데 사용되었다. 고도 별 황사의 광학적 특성 분석 결과, 같은 날 발생한 황사의 경우라도, 고도에 따라서 황사의 광학적 특성이 다르다는 것으로 나타났다. 또한, 본 연구를 통해 황사의 광학적 특성의 변화는 황사와 오염물질의 혼합 정도에 따라 달라질 수 있고, 이는 황사가 오염물질 발생지역을 통과할 때의 고도에 의존하는 것

으로 나타났다. 황사가 오염물질 발생 지역을 낮은 고도로 통과하여 유입된 경우, 혼합의 정도가 크게 증가한 것으로 사료되며, 실제로 오염물질이 갖는 광학적 특성과 유사한 값(낮은 δ_p 와 높은 A 및 S)을 갖는 오염된 황사의 특성을 보였고, 이와 반대로 높은 고도로 통과하였을 때는 오염물질의 영향을 거의 받지 않아 순수황사가 갖는 광학적 특성 값(높은 δ_p 와 낮은 A 및 S)과 비슷한 값들이 분석되었다.

그 동안, 황사 입자가 장거리 이동 간에 오염물질과 혼합하여 그의 특성이 바뀔 수 있다는 사실은 이미 잘 알려져 왔다. 하지만, 중국 사막지역으로부터 발생한 황사 입자들의 광학적 특성 변화는 황사의 이동 경로뿐만 아니라, 이동 중 고도에 따라 바뀔 수 있다는 것을 본 연구를 통하여 밝혀내었다. 본 연구에서 수행된 라이더 장기 관측을 통해 얻어진 황사의 이동 고도에 대한 정보는 향후 황사의 특성 변화 및 다른 오염물질과의 혼합 매커니즘을 규명하는데 중요한 자료로도 활용될 수 있을 것으로 기대되며, 인공위성 관측 중 황사와 오염된 황사의 구분에서 겪는 어려움들을 해결 및 보완 해 줄 수 있는 좋은 검증 자료로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 기상청 재원의 국립기상연구소 주요 사업

“응용기상 기술개발 연구” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Ansmann, A., F. Wagner, D. Müller, D. Althausen, A. Herber, W. von Hoyningen-Huene, and U. Wandinger, 2002. European pollution outbreaks during ACE 2: Optical particle properties inferred from multiwavelength lidar and star-Sun photometry, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 107(D15): AAC 8-1-AAC 8-14.
- Behrendt, A., and T. Nakamura, 2002. Calculation of the calibration constant of polarization lidar and its dependency on atmospheric temperature, *Optics express*, 10(16): 805-817.
- Cairo, F., G. Di Donfrancesco, A. Adriani, L. Pulvirenti, and F. Fierli, 1999. Comparison of various linear depolarization parameters measured by lidar, *Applied Optics*, 38(21): 4425-4432.
- Carrico, C.M., P. Kus, M.J. Rood, P.K. Quinn, and T.S. Bates, 2003. Mixtures of pollution, dust, sea salt, and volcanic aerosol during ACE-Asia: Radiative properties as a function of relative humidity, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 108(D23), doi: 10.1029/2003JD003405.
- Chen, W.-N., Y.-W. Chen, C.C. Chou, S.-Y. Chang, P.-H. Lin, and J.-P. Chen, 2009. Columnar optical properties of tropospheric aerosol by combined lidar and sunphotometer measurements at Taipei, Taiwan, *Atmospheric Environment*, 43(17): 2700-2708.
- Draxler, R.R., and G. Rolph, 2003. *HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) model access via NOAA ARL READY website* (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>).
- NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, edited, Md.
- Durant, A.J., S.P. Harrison, I.M. Watson, and Y. Balkanski, 2009. Sensitivity of direct radiative forcing by mineral dust to particle characteristics, *Progress in Physical Geography*, 33(1): 80-102.
- Huebert, B.J., T. Bates, P.B. Russell, G. Shi, Y.J. Kim, K. Kawamura, G. Carmichael, and T. Nakajima, 2003. An overview of ACE-Asia: Strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*(1984-2012), 108(D23), doi: 10.1029/2003JD003550.
- Husar, R.B., D. Tratt, B.A. Schichtel, S. Falke, F. Li, D. Jaffe, S. Gasso, T. Gill, N.S. Laulainen, and F. Lu, 2001. Asian dust events of April 1998, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 106(D16): 18317-18330.
- Liu, M., D.L. Westphal, S. Wang, A. Shimizu, N. Sugimoto, J. Zhou, and Y. Chen, 2003. A high-resolution numerical study of the Asian dust storms of April 2001, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 108(D23), doi: 10.1029/2002JD003178.
- Liu, Z., N. Sugimoto, and T. Murayama, 2002. Extinction-to-backscatter ratio of Asian dust observed with high-spectral-resolution lidar and Raman lidar, *Applied Optics*, 41(15): 2760-2767.
- Mikami, M., G. Shi, I. Uno, S. Yabuki, Y. Iwasaka, M. Yasui, T. Aoki, T. Tanaka, Y. Kurosaki, and K. Masuda, 2006. Aeolian dust experiment on climate impact: An overview of Japan-China joint project ADEC, *Global and Planetary Change*, 52(1): 142-172.
- Murayama, T., 2002. Optical properties of Asian dust aerosol lofted over Tokyo observed by Raman lidar, *Lidar Remote Sensing in Atmospheric and Earth Sciences*, edited by Bissonnette, L.R., Roy, G., and Vallée, G., *Defence R&D Canada, Val-Bélair*, 1, 331-334.

- Murayama, T., H. Okamoto, N. Kaneyasu, H. Kamataki, and K. Miura, 1999. Application of lidar depolarization measurement in the atmospheric boundary layer: Effects of dust and sea-salt particles, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 104(D24): 31781-31792.
- Müller, D., K. Franke, A. Ansmann, D. Althausen, and F. Wagner, 2003. Indo-Asian pollution during INDOEX: Microphysical particle properties and single-scattering albedo inferred from multiwavelength lidar observations, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 108(D19), doi: 10.1029/2003JD003538.
- Noh, Y.M., Y.J. Kim, B.C. Choi, and T. Murayama, 2007. Aerosol lidar ratio characteristics measured by a multi-wavelength Raman lidar system at Anmyeon Island, Korea, *Atmospheric Research*, 86(1), 76-87.
- Noh, Y.M., Y.J. Kim, and D. Müller, 2008. Seasonal characteristics of lidar ratios measured with a Raman lidar at Gwangju, Korea in spring and autumn, *Atmospheric Environment*, 42(9): 2208-2224.
- Sakai, T., T. Shibata, Y. Iwasaka, T. Nagai, M. Nakazato, T. Matsumura, A. Ichiki, Y.-S. Kim, K. Tamura, and D. Troshkin, 2002. Case study of Raman lidar measurements of Asian dust events in 2000 and 2001 at Nagoya and Tsukuba, Japan, *Atmospheric Environment*, 36(35): 5479-5489.
- Shimizu, A., N. Sugimoto, I. Matsui, K. Arao, I. Uno, T. Murayama, N. Kagawa, K. Aoki, A. Uchiyama, and A. Yamazaki, 2004. Continuous observations of Asian dust and other aerosols by polarization lidars in China and Japan during ACE-Asia, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 109(D19), doi: 10.1029/2002JD003253.
- Stocker, T.F., D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley, 2013. Climate change 2013: The physical science basis, *Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5)*(Cambridge Univ Press, New York).
- Sun, Y., G. Zhuang, Y. Wang, X. Zhao, J. Li, Z. Wang, and Z. An, 2005. Chemical composition of dust storms in Beijing and implications for the mixing of mineral aerosol with pollution aerosol on the pathway, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 110(D24), doi: 10.1029/2005JD006054.
- Tesche, M., D. Möller, S. Gross, A. Ansmann, D. Althausen, V. Freudenthaler, B. Weinzierl, A. Veira, and A. Petzold, 2011. Optical and microphysical properties of smoke over Cape Verde inferred from multiwavelength lidar measurements, *Tellus B*, 63(4): 677-694.
- Yu, X., T. Cheng, J. Chen, and Y. Liu, 2006. A comparison of dust properties between China continent and Korea, Japan in East Asia, *Atmospheric Environment*, 40(30): 5787-5797.
- Zhang, Z., G. Engling, C.-Y. Lin, C. C.-K. Chou, S.-C. Lung, S.-Y. Chang, S. Fan, C.-Y. Chan, and Y.-H. Zhang, 2010. Chemical speciation, transport and contribution of biomass burning smoke to ambient aerosol in Guangzhou, a mega city of China, *Atmospheric Environment*, 44(26): 3187-3195.