백령도, 문산, 군산의 라이다로 측정한 에어로졸 연직분포 -2010년 5월 10~11일 황사를 중심으로-

이혜정 · 김정은* · 전영신

국립기상연구소 황사연구과

(집수: 2013년 7월 8일, 수정: 2013년 9월 4일, 게재확정일: 2013년 9월 27일)

Aerosol Vertical Distribution Measured by LIDARs in Baengnyeongdo, Munsan, and Gunsan during 10~11 May 2010

Hae-Jung Lee, Jeong Eun Kim*, and Youngsin Chun

Asian Dust Research Laboratory, National Institute of Meteorological Research, Seoul, Korea

Abstract This study aims to analyze the vertical distribution of Asian dust measured by LIDARs at three weather stations in Baengnyeongdo (BND), Munsan (MS), and Gunsan (GS) during 10~11 May 2010, and thereby investigate their effectiveness. Asian dust passed through from central to south-western part of Korea. Although dust particles were detected over the surface in MS and GS, LIDAR data showed that the Asian dust with non-spherical particles was observed in all of the three regions. It seems that the naked-eye observation could not detect dust over the surface of BND due to the temperature inversion below a height of 0.45 km. During the Asian dust events, the duration time of dust presented 9.5 hr (BND), 19.5 hr (MS), and 24.5 hr (GS), respectively with the longest time in GS, whereas dust altitudes ranged from 0.4 to 1.3 km (BND), 0.1 to 2.8 km and 4.1 to 4.2 km (MS), and 0.2 to 2.0 km (GS), respectively, while showing the highest altitude in MS. Aerosol optical thickness (AOT) retrieved by LIDAR and skyradiometer (SR), located close to the LIDAR sites, was compared. MS (LIDAR) and Seoul (SR) attained the AOT of 0.64 and 0.50, and GS (LIDAR) and Gongju (SR) attained the AOT of 0.38 and 0.54, respectively. As SR-derived angstrom exponents (AE) during the time period determined as Asian dust by LIDAR data were 0.17 in Seoul (near MS) and 0.30 in Gongju (near GS), it can be said that the characteristics of dust particles were appeared. During the study period, depolarization ratio could serve as a useful indicator to determine dust aerosol. But, it still seems essential to conduct further investigation with longer period of data to better describe the discrepancy of AOT between LIDARs and SR.

Key words: LIDAR, aerosol, Asian dust, depolarization ratio, aerosol extinction coefficient

1. 서 론

대기 에어로졸은 태양빛을 산란 및 흡수함으로써 대기의 복사량을 변화시켜 기후변화 예측에 상당한 불확실성을 제공하는 것으로 알려져 있고, 다른 대기 성분보다 전지구적으로 지역적 분포가 다양해 이에

대한 연구가 활발하게 진행되고 있다(IPCC, 2007). 에어로졸의 광학적 특성 연구에 사용되는 장비 중 하나인 라이다(Light Detection And Ranging; LIDAR)는 고도별 에어로졸 특성을 관측할 수 있는 장점이 있어, 이를 이용한 에어로졸 연구가 진행되어 왔다.

라이다를 이용하여 에어로졸의 공간 및 연직 분포에 대한 관측과 연구를 위해 전세계에 여러 네트워크가 구축되었다. 1997년 독일 라이다 네트워크를 시작으로 2000년에 유럽에서 EARLINET(European Aerosol Research Lidar Network) 등 네트워크가 시작되었다

*Corresponding Author: Jeong Eun Kim, Asian Dust Research Lab., National Institute of Meteorological Research, KMA, 61 Yeouidaebangro 16-gil, Dongjakgu, Seoul 156-720, Korea.
Phone : +82-70-7850-6758, Fax : +82-2-831-4930
E-mail : jekim@kma.go.kr

Fig. 1. Locations of the KMA LIDAR monitoring stations at Baengnyeongdo, Munsan and Gunsan.

(Max Planck Institute for Meteorology, 2003). 또한 NOAA의 NDACC(Network for the Detection of Atmospheric Composition Change)와 NASA의 MPLNET (Micro-Pulse Lidar Network; Welton *et al.*, 2001)은 전 세계 여러 관측지점에 라이다를 설치하여 네트워크를 형성하였다. 그 외 라이다 네트워크로는 ALINE(남미), CIS-LINET(러시아), CORALNet(캐나다), REALM/CREST(미국, 캐나다) 등이 있다. 아시아에서는 2001년부터 일본의 주도로 AD-Net(Asian Dust and aerosol lidar observation Network)이 황사와 에어로졸 연구를 위해 구축되었다(Murayama *et al.*, 2001; Sugimoto *et al.*, 2010). 이러한 각 지역의 네트워크들을 모아 GALION(Gaw Aerosol Lidar Observation Network)이 형성되었다(WMO, 2007).

우리나라에서는 AD-Net으로써 서울대와 대전 목원대, 제주도 고산에서 라이다가 상시 관측되고 있으며(<http://www-lidar.nies.go.jp>), 서울(서울시 보건환경연구원), 백령도(국립환경과학원), 광주(광주과학기술원) 등에서도 라이다를 이용해 에어로졸을 관측하고 있다. 이들 자료를 활용하여 우리나라 에어로졸/황사의 연직 분포 특성, 라이다 비, 황사의 고도 별 농도 산출 등 활발한 연구가 진행되고 있다(Noh *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2010; Noh *et al.*, 2010, 2011; Yoon *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2011)).

우리나라 기상청은 실시간 황사 감시를 위해 2004년 군산을 시작으로 백령도, 문산, 안면도에 라이다를 도입하여 운영하고 있으나 아직까지 이 자료를 활용한 연구나 자료에 대한 평가가 공개된 적은 없다. 본

연구에서는 백령도, 문산, 군산의 세 지점에서 2010년 5월 10~11일의 라이다 관측결과를 이용하여 황사의 연직 분포와 이동을 분석하고, 기상청에서 운영 중인 라이다가 황사 판별에 유용한지 평가해보고자 한다.

2. 관측 기기 및 방법

기상청에서는 군산(36.99°N, 126.71°E, 2004년 1월~), 백령도(37.97°N, 124.63°E, 2005년 1월~), 문산(37.89°N, 126.77°E, 2006년 12월~)에 이중편광라이다(Dual Polarization Lidar)를 설치하여 운영하고 있다(Fig. 1). 기상청 라이다는 실시간 황사감시 및 예보생산을 주요 목적으로 하기 때문에 황사가 주로 발생하는 2~5월에는 상시 관측하나, 그 외에는 화요일과 목요일, 그리고 황사가 예보된 날에만 관측하고 있다. 매시 00, 15, 30, 45분에 지표에서부터 고도 약 25 km까지 3 m의 연직해상도로 관측한다.

이중편광라이다에 대한 자세한 사양을 Table 1과 Fig. 2에 제시하였다. 이중편광라이다는 에어로졸 수 농도가 큰 경우에도 안정적으로 관측하기 위해 Nd:YAG 고체 레이저를 사용하였다. 기본파장은 1064 nm이며, 사용파장은 2차 조화 발생기를 통해 1064 nm 파장을 532 nm 파장으로 생성하여 관측하며, 레이저 빔은 원하는 편광방향을 얻을 수 있도록 $\lambda/2$ 지연 파장판(retarded waveplate)을 사용하고 있다. 근거리 관측을 위해 송신 레이저빔의 광축과 수신 망원경의 광축이 일치하는 공동축(coaxial) 시스템을 사용한다.

라이다 신호로부터 고도별 에어로졸 소산계수는 아

Fig. 2. Schematic diagram of the KMA LIDAR.

래의 라이다 방정식을 이용해 구한다(Klett, 1981).

$$X(R) = P(R)R^2 = \frac{C}{O(R)}[\beta_1(R) + \beta_2(R)]\exp\left\{-2\int_0^R[\alpha_1(r) + \alpha_2(r)]dr\right\} \quad (1)$$

여기서 $X(R)$ 은 고도 R 에 대해 거리 보정된 후방산란 신호, $P(R)$ 는 레이저에서 산란되어 돌아온 신호, C 는 기기 상수, β 와 α 는 후방산란계수와 소산계수이며, 아래첨자 1과 2는 에어로졸과 공기분자를 의미한다. $O(R)$ 는 지상의 수신 망원경이 근거리 신호를 수신할 수 없어 지표 가까이 존재하는 에어로졸을 잘 관측하지 못하기 때문에 적용하는 중첩보정함수로, 백령도 0.39 km, 문산 0.57 km, 군산 0.60 km까지 적용하였다. 식 (1)의 라이다 방정식에서 공기와 에어로졸의 후방

산란계수 β 와 소산계수 α 의 비는 라이다 비(lidar ratio, S)로, 공기분자의 라이다 비 S_2 는 고도에 관계없이 일정하고, 에어로졸의 라이다 비 $S_1(R)$ 는 에어로졸의 크기와 형태에 따라 다른 값을 가지며, 에어로졸의 연직분포 특성이 다르기에 실제로는 고도에 따라 다른 값을 가지지만, 본 연구에서는 고도에 관계없이 50 Sr (Murayama *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2011)으로 일정하다고 가정하여 식 (1)의 라이다 방정식을 계산하였다. 식 (1)로부터 식 (2)인 에어로졸 소산계수를 구하는 과정은 Sasano *et al.*(1985)에 자세히 나타나있다. 이때, 에어로졸이 없다고 가정한 기준고도(R_0)는 6 km로 정하였으며, 구름이 관측될 때는 계산에서 제외하였다.

$$\alpha_1(R) = \frac{S_1(R)X(R)\exp\left\{-2\int_0^R\left[\frac{S_1(r)}{S_2} - 1\right]\alpha_2(r)dr\right\}}{\frac{S_1(R_0)X(R_0)}{\alpha_1(R_0) + \frac{S_1(R_0)}{S_2}\alpha_2(R_0)} - 2\int_{R_0}^R S_1(r)X(r)\exp\left\{-2\int_{R_0}^r\left[\frac{S_1(r')}{S_2} - 1\right]\alpha_2(r')dr'\right\}dr} - \frac{S_1(R)}{S_2}\alpha_2(R) \quad (2)$$

편광소멸도(Depolarization ratio, δ)는 식 (3)와 같이 수직($P_{\perp}$)과 수평($P_{\parallel}$)성분의 신호 합에 대한 수직성분 신호의 비로 구한다. 편광소멸도는 에어로졸의 비구형성에 대한 정보를 제공하므로, 관측된 에어로졸이 인위적 오염원(구형)에서 기인했는지 황사(비구형)인지 판별하는 데 유용하다(Sugimoto and Lee, 2006).

$$\delta = \frac{P_{\perp}}{P_{\parallel} + P_{\perp}} \quad (3)$$

Table 1. Main instrument parameters of KMA Lidar.

Characteristic	Dual Polarization Lidar
Laser	Nd:YAG 2 nd harmonic
Wavelength (nm)	532, 1064 nm
Energy/pulse (mJ)	160 (532 nm), 350 (1064 nm)
Repetition (Hz)	20
Telescope	Newtonian
Diameter (mm)	300
Field of view (mrad)	< 1.5
Detector	PMT (Photomultiplier tube)
Filter	
Central Wavelength	532 nm
FWHM	1 nm
Data acquisition	Waveform digitizer

(a) 08 May 2010

(b) 09 May 2010

(c) 10 May 2010

(d) 11 May 2010

Fig. 3. Surface synoptic charts at 2100 LST from 8 to 11 May 2010.

라이다로 계산한 에어로졸 소산계수(α_1)를 식 (4)와 같이 고도에 따라 적분하면 532 nm의 에어로졸 광학두께(Aerosol optical thickness, τ_{lidar})를 계산할 수 있다.

$$\tau_{\text{lidar}} = \int_0^{R_0} \alpha_1(R) dR \quad (4)$$

식 (4)로 계산된 라이다의 에어로졸 광학두께(532 nm)를 스카이라디오미터(POM-01, PREDE)의 Angstrom exponent(AE, 400, 500, 675 nm)를 이용해 계산한 532 nm에서의 에어로졸 광학두께와 비교하였다.

지상의 황사 농도를 비교하기 위해 광학입자계수기(Environmental Dust Monitor #365, GRIMM Aerosol Technik, EDM) 자료로 계산한 PM_{10} 질량농도를 이용하였다. 광학입자계수기는 0.25~32 μm 범위에서 32개

입경구간의 수농도를 광학적으로 측정 한 후 질량농도로 환산한다.

3. 결 과

3.1 지상에서 관측된 황사의 특징

2010년 5월 10~11일 우리나라에서 관측된 황사는 5월 8일 몽골 및 내몽골 지역에서 발원하여 저기압 후면을 따라 요동반도를 거쳐 북한을 시작으로 우리나라 중부지방과 남서지역에 영향을 주었다(Fig. 3). 이 황사는 5월 11일 오전까지 중부지방 일대에서 관측되었고 대륙고기압이 점차 남동쪽으로 확장하면서 5월 11일 오후에 관측이 종료되었다.

라이다 관측지점인 백령도, 문산, 군산에서 광학입

Fig. 4. Time series of PM_{10} mass concentration measured by EDM, aerosol optical thickness (AOT) retrieved by LIDAR (532 nm, solid and closed circles) and skyradiometer (532 nm, triangles), and Angstrom exponent (400~675 nm, squares) at (a) Baengnyeongdo, (b) Munsan and (c) Gunsan during May 10~11, 2010. Shaded area indicates a dust layer detected by LIDAR and the dashed boxes represent dust period by naked-eye observation at Munsan and Gunsan.

자계수기 자료로 계산한 지상의 PM_{10} 농도 시계열을 Fig. 4에 보였다. 5월 10~11일 동안 백령도, 문산, 군산에서 PM_{10} 최대값은 각각 75, 197, 136 $\mu g\ m^{-3}$ 으로 문산에서 가장 높고 백령도에서 가장 낮았다. 문산에서는 첫 번째 정점이 나타날 때인 5월 10일 15시에 세 지점 중 처음으로 황사가 관측되었고 19시까지 지속되었으며, 군산에서는 5월 11일 14시에 PM_{10} 농도가 최대가 될 때 황사가 관측되었다. 그러나 백령도의 지상 PM_{10} 농도는 관측자가 황사로 맨눈 관측될 만큼 증가하지 않았다.

3.2 라이다로 관측한 황사의 연직분포 및 이동

백령도와 문산, 군산에서 라이다로 관측한 2010년 5월 10~11일의 고도별 후방산란신호와 편광소멸도, 에어로졸 소산계수를 Fig. 5에 나타내었다. 5월 10일 14시부터 백령도의 후방산란신호세기와 편광소멸도(> 0.2)가 증가해, 이때부터 11일 자정까지 비구형 입자인 황사가 유입된 것으로 추정된다. 문산에서는 5월 10일 8시~5월 11일 11시까지 에어로졸이 존재했고, 이 기간 동안 에어로졸의 편광소멸도는 0.2 이상으로 증가하여 비구형 입자가 존재함을 알 수 있다. 문산의 기

상청 라이다와 근거리에 위치한 서울대학교 NIES 라이다의 관측자료(<http://www.lidar.nies.go.jp/Seoul/index.html>)를 비교하면, 시간에 따른 편광소멸도의 공간분포가 매우 유사하게 나타났으며, 편광소멸도는 문산에서 약간 높았다. 군산에서도 5월 10~11일에 에어로졸이 존재하고, 편광소멸도는 0.2 이상으로 증가하는 등 세 지역 모두 황사가 관측된 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 에어로졸 소산계수가 $0.1\ km^{-1}$ 이상이고, 편광소멸도가 0.2 이상일 때를 황사로 판단하기로 했다. 황사로 판별하기 위한 편광소멸도 기준은 Kim *et al.*(2010)에서 제시한 0.136(서울)보다 높는데, 이는 기상청 라이다가 실시간 황사 감시를 주목적으로 하여 황사 판별을 쉽게 할 수 있도록 편광소멸도를 높게 설정했기 때문이다. 그러나 각 지점에서 편광소멸도가 얼마나 높게 설정되어 있는지는 확인이 어렵다. 위 기준으로 판단할 때 황사의 체류시간은 백령도 9.5시간(5월 10일 14시~23시 30분), 문산 19.5시간(5월 10일 9시 30분~11일 5시), 군산 24.5시간(5월 10일 15시 30분~11일 16시)으로 군산에서 가장 오랫동안 관측되었다. 그러나, 구름이 없는 조건에서만 에어로졸 소산계수를 구했기 때문에 문산과 군산에서의

Fig. 5. Time height indications of range corrected LIDAR signal (top), depolarization ratio (middle) and aerosol extinction coefficient (bottom) at (a) Baengnyeongdo, (b) Munsan and (c) Gunsan during 10~11 May 2010.

Fig. 6. (a) IODI image retrieved from MTSAT-1R data at 1700 LST and (b) vertical distribution of temperature, potential temperature, relative humidity, wind direction and wind speed at Baengnyeongdo at 2100 LST on 10 May 2010.

실제 황사 체류시간은 더 길 것으로 판단된다. 지상의 황사는 세 지점 중 문산에서 가장 먼저 관측되었는데, 라이다 자료 또한 황사가 가장 먼저 관측된 지점 역시 문산(5월 10일 9:30)이며, 다음으로 백령도, 군산 순이었다. 이 자료로부터 황사가 백령도 지표 부근에는 영향을 미치지 않고 상층으로만 이동한 것을 알 수 있다. 그리고 라이다 자료로부터 황사는 백령도에서 5월 10일에만 관측된 반면 문산과 군산에서는

5월 11일까지 관측된 것을 확인할 수 있다. 백령도, 문산, 군산에서 황사가 분포하는 최저 및 최고 고도는 각각 0.4~1.3 km, 0.1~2.8 km와 4.1~4.2 km(두 개의 황사 층), 0.2~2 km로 문산에서 가장 높은 고도까지 존재하였다. 황사가 가장 높은 고도까지 나타날 때의 혼합고 $H = \min(\partial X(R)/\partial R)$ (Flamant *et al.*, 1997)는 백령도 1.3 km, 문산 2.7 km, 군산 2 km로 황사가 존재하는 최고 고도와 거의 일치하였다. 이처럼 황사가 중

부지방에서 남쪽으로 이동하면서 세 지점의 황사 관측시간 및 농도가 달랐으며, 혼합고 차이는 황사의 연직분포에 영향을 미친 것으로 보인다.

백령도에서 황사가 관측된 것은 라이다뿐만 아니라 위성을 통해서도 확인할 수 있다. MTSAT-1R 위성자료로부터 5월 10일 17시에 산출한 적외광학두께지수(Infrared Optical Depth Index, IODI)가 백령도 부근에서 약 0.01로 나타나 황사가 존재한 것을 확인할 수 있다(Fig. 6a)(Kim *et al.*, 2008). 백령도에서 지상에 황사가 관측되지 않은 이유를 조사하기 위해 5월 10일 21시에 관측한 온도와 온위, 상대습도, 풍향 및 풍속의 연직분포를 살펴보았다(Fig. 6b). 연직 온도분포를 보면 고도 0.19~0.43 km에서 고도에 따라 온도와 온위가 증가하고, 상대습도는 급격히 감소하였으며, 풍속은 고도 0.43 km를 기준으로 17 knot에서 급격히 감소하는 등 0.19~0.45 km 사이에 역전층이 형성된 것을 알 수 있었다. 라이다 자료에서 백령도 상공에 황사가 존재하는 고도는 약 0.45~0.9 km였으며, 황사는 이 역전층으로 인해 지표 부근까지 영향을 주지 않은 것으로 보인다.

3.3 라이다와 스카이라디오미터로 관측한 에어로졸 광학두께

5월 10~11일 동안 백령도, 문산, 군산에서 라이다로 구한 에어로졸 광학두께를 Fig. 4에 나타내었다. 에어로졸 광학두께와 지상의 PM_{10} 농도를 비교할 때 백령도와 문산은 시간에 따른 값의 변화가 비슷하지 않았지만, 군산은 값의 경향과 정점이 비슷한 시각에 나타났다. 황사로 판별(라이다)된 시간 동안, 라이다로 계산된 평균 에어로졸 광학두께는 백령도 0.47, 문산 0.66, 군산 0.71로 군산에서 높게 계산되었다. 문산과 군산에서 라이다로 계산한 에어로졸 광학두께(532 nm)를 서울대학교(문산과 약 50 km 거리)와 공주대학교(군산과 약 60 km 거리)의 스카이라디오미터 자료로 계산한 에어로졸 광학두께(532 nm)와 비교하였으며, 이때 라이다와 스카이라디오미터 자료에서 구름이 관측된 시각은 비교에서 제외하였다. 백령도 인근에는 이 기간 동안 비교할 수 있는 에어로졸 광학두께 관측자료가 존재하지 않았다. 문산의 라이다와 서울대학교 스카이라디오미터의 경우 비교 가능한 자료 수는 14개(30분 평균값)이며, 이들의 평균 에어로졸 광학두께는 각각 0.64 ± 0.11 , 0.50 ± 0.11 로 라이다로 계산한 값이 평균 22% 정도 높았으나, 그 중 5월 10일 11시 30분~15시 30분에는 매우 잘 일치했다(Fig. 4b). 군산에서 비교 가능한 자료 수는 7개(30분 평균값)이며, 라이다와 스카이라디오미터(공주)로 계산한 에어로졸 광학두께는 0.38 ± 0.09 , 0.54 ± 0.11 로 라이다로 계산한 에어로졸 광학두께가 평균 30% 낮았다(Fig.

4c). 스카이라디오미터로 산출한 웅스트룡 지수가 0.51 이하이면 황사로 판별할 수 있는데(NIMR, 2009), 라이다의 편광소멸도(0.2)를 기준으로 판별된 황사기간 동안 스카이라디오미터의 웅스트룡 지수는 문산 0.17, 군산 0.30으로, 라이다가 황사를 잘 판별하였음을 알 수 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 2010년 5월 10~11일 백령도, 문산, 군산기상대에서 지상과 라이다 관측자료를 이용하여 황사의 연직 분포를 분석하고, 기상청 라이다가 황사 판별에 유용한지 살펴보았다. 라이다 자료로부터 세 지점 모두 비구형 입자인 황사가 존재하는 것으로 판별되었고, 문산 라이다 자료는 서울대학교 라이다의 편광소멸도 분포와 매우 유사하게 나타났다. 라이다로 판별한 황사의 체류시간은 백령도 9.5시간, 문산 19.5시간, 군산 24.5시간으로 군산에서 가장 길었으며, 분포 고도는 백령도에서 0.4~1.3 km, 문산에서 0.1~2.8 km와 4.1~4.2 km, 군산에서는 0.2~2.0 km로 문산에서 가장 높은 고도까지 존재했다. 문산과 군산에서는 지상에서도 황사가 관측되었으나 백령도에서는 고도 0.45 km 이하에 형성된 역전층 때문에 황사가 지상에 영향을 미치지 못한 것으로 보인다. 황사는 중부지방에서 남쪽으로 이동하여 관측된 시간과 농도가 달랐고, 혼합고 차이는 황사의 연직분포에 영향을 미친 것으로 판단된다.

라이다로 판별한 황사 기간의 에어로졸 광학두께는 백령도 0.47, 문산 0.66, 군산 0.71로 군산에서 가장 높았다. 이 자료를 스카이라디오미터로 계산한 에어로졸 광학두께와 비교한 결과, 문산(라이다)과 서울(스카이라디오미터)에서 0.64 ± 0.11 , 0.50 ± 0.11 , 군산과 공주에서는 0.38 ± 0.09 , 0.54 ± 0.11 로 각각 22%, 30%의 차이를 보였으나 문산의 경우 5월 10일 11시 30분~15시 30분에는 두 자료가 매우 비슷했다. 라이다로 판별한 황사 기간 동안 스카이라디오미터의 웅스트룡 지수는 문산과 군산에서 각각 0.17, 0.30으로 황사의 특징이 뚜렷하게 나타났다.

기상청 라이다로 계산한 에어로졸 소산계수는 장기간의 자료를 가지고 추가적인 검증이 필요할 것으로 보인다. 그럼에도 불구하고 기상청 라이다 도입의 주요 목적인 황사의 실시간 감시 및 판단에 있어 편광소멸도 자료가 유용하게 사용될 수 있는 것으로 판단된다. 그리고 기상청 라이다의 편광소멸도는 황사감시를 위해 높게 설정되어 있고, 또 얼마나 높은지 알 수 없으나, 추후 세 지점 모두 재설정하여 입자의 비구형성을 판단할 때 지점간 상호 비교 및 타기관과의 라이다 자료와 정량적 비교가 가능하게 할 계획이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상연구소 2013년 주요과제인 ‘예보기술 지원 및 활용연구(NIMR-2012-B-1)’ 사업에 의해 수행되었습니다. 라이다를 운영하고 관리해주신 백령도기상대, 문산기상대, 군산기상대 직원분들과 (주)이엔쓰리환경의 조성주 박사께 감사드립니다.

REFERENCES

- Flamant, C., J. Pelon, P. H. Flamant, and P. Durand, 1997: Lidar determination of the entrainment zone thickness at the top of the unstable marine atmospheric boundary layer. *Bound.-Layer Meteor.*, **83**, 247-284.
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1-996.
- Kim, M.-H., S.-W. Kim, S.-C. Yoon, N. Sugimoto, and B.-J. Sohn, 2011: Characteristics of the Lidar Ratio Determined from Lidar and Sky Radiometer Measurements in Seoul. *Atmos.*, **21**, 57-67.
- Kim, M.-J., Y.-J. Kim, E.-H. Sohn, K.-L. Kim, and M.-H. Ahn, 2008: The Study on the Quantitative Dust Index Using Geostationary Satellite. *Atmos.*, **18**, 267-277.
- Kim, S. W., S.-C. Yoon, J. Kim, J.-Y. Kang, and N. Sugimoto, 2010: Asian dust event observed in Seoul, Korea, during 29-31 May 2008: Analysis of transport and vertical structure of dust particles from lidar and surface measurements. *Sci. Total Environ.*, **408**, 1707-1718.
- Klett, J. D., 1981: Stable analytical inversion solution for processing lidar returns. *Appl. Opt.*, **20**, 211-220.
- Lee, B.-I., S.-C. Yoon, and Y.-J. Kim, 2008: Analysis of Vertical Profiles and Optical Characteristics of the Asian Dust Using Ground-based Measurements. *Atmos.*, **18**, 287-297.
- Max Planck Institute for Meteorology, 2003: A European aerosol research lidar network to establish an aerosol climatology, MPI-Rep. 348.
- Murayama, T., and Coauthors, 2001: Ground-based network observations of Asian dust events of April 1998 in East Asia. *J. Geophys. Res.*, **106**, 18,346-18,359.
- _____, and Coauthors, 2003: An intercomparison of lidar-derived aerosol optical properties with airborne measurements near Tokyo during ACE-Asia. *J. Geophys. Res.*, **108**, 8651, doi:10.1029/2002JD003259.
- NIMR (National Institute of Meteorological Research), 2009: Development and application of monitoring and forecasting technology for yellow-sand (I), NIMR report, pp 128.
- Noh, Y.-M., H.-L. Lee, and Detlef Muller, 2010: Investigation of Source Dependent Optical and Microphysical Characteristics of Aerosol Using Multi-wavelength Raman Lidar in Anmyun, Korea. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **26**, 554-566.
- _____, K.-H. Lee, and H.-R. Lee, 2011: A Retrieval of Vertically-Resolved Asian Dust Concentration from Quartz Channel Measurements of Raman Lidar. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **27**, 326-336.
- _____, 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. *Atmos. Res.*, **86**, 76-87, doi:10.1016/j.atmosres.2007.03.006.
- Sasano, Y., E. V. Browell, and S. Ismail, 1985: Error caused by using a constant extinction/backscattering ratio in the lidar solution. *Appl. Opt.*, **24**, 3929-3932.
- Sugimoto, N., and C. H. Lee, 2006: Characteristics of dust aerosols inferred from lidar depolarization measurements at two wavelengths. *Appl. Opt.*, **45**, 7468-7474.
- _____, I. Matsui, A. Shimizu, T. Nishizawa, Y. Hara, and I. Uno, 2010: Lidar Network Observation of Tropospheric Aerosols. *Proc. SPIE*, **7860**, 78600J, doi: 10.1117/12.869900, 2010.
- Welton, E. J., J. R. Campbell, J. D. Spinhirne, and V. S. Scott, 2001: Global monitoring of clouds and aerosols using a network of micro-pulse lidar systems, in Lidar Remote Sensing for Industry and Environmental Monitoring, U. N. Singh, T. Itabe, N. Sugimoto, (eds.). *Proc. SPIE*, **4153**, 151-158.
- WMO, 2007: Plan for the implementation of the GAW Aerosol Lidar Observation Network GALION, GAW Report No.178, Hamburg, Germany.
- Yoon, S.-C., Y.-J. Lee, S.-W. Kim, M.-H. Kim, and N. Sugimoto, 2010: Measurements of the Lidar Ratio for Asian Dust and Pollution Aerosols with a Combined Raman and Back-scatter Lidar. *Atmos.*, **20**, 483-494.

※ 영어로 작성되지 않은 한글 및 일본어 참고문헌은 편집진에서 영어로 번역하였습니다. 번역된 참고문헌은 다음과 같습니다.

국립기상연구소, 2009: 황사감시 예측기술 지원 및 활용연구(I). 128 pp.
NIMR (National Institute of Meteorological Research), 2009: Development and application of monitoring and forecasting technology for yellow-sand (I), NIMR report, pp 128.