CALIPSO 위성 탑재 라이다를 이용한 동북아시아 지역의 대기 에어로솔 3차원 광학특성 분포

이 권 호[†]

경일대학교 공간정보공학과

3-D Perspectives of Atmospheric Aerosol Optical Properties over Northeast Asia Using LIDAR on-board the CALIPSO satellite

Kwon-Ho Lee[†]

Department of Geoinformatics Engineering, Kyungil University, Geongsan 712-701, Korea

Abstract : Backscatter signal observed from the space-borne Light Detection And Ranging (LIDAR) system is providing unique 3-dimensional spatial distribution as well as temporal variations for atmospheric aerosols. In this study, the continuous observations for aerosol profiles were analyzed during a years of 2012 by using a Cloud-Aerosol LIDAR with Orthogonal Polarization (CALIOP), carried on the Cloud-Aerosol LIDAR and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO) satellite. The statistical analysis on the particulate extinction coefficient and depolarization ratio for each altitude was conducted according to time and space in order to estimate the variation of optical properties of aerosols over Northeast Asia (E110°-140°, N20°-50°). The most frequent altitudes of aerosols are clearly identified and seasonal mean aerosol profiles vary with season. Since relatively high particle depolarization ratios (>0.5) are found during all seasons, it is considered that the non-spherical aerosols mixed with pollution are mainly exists over study area. This study forms initial regional 3-dimensional aerosol information, which will be extended and improved over time for estimation of aerosol climatology and event cases.

Key Words : CALIPSO, Aerosols, Lidar, Extinction, Depolarization ratio

요약 : 위성 탑재 라이다 시스템이 관측하는 후방산란 신호는 대기 에어로솔의 3차원 공간적인 분포 특성 및 시간적인 변화를 탐지할 수 있게 한다. 본 연구에서는 Cloud-Aerosol LIDAR and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO) 위성에 탑재된 Cloud-Aerosol LIDAR with Orthogonal Polarization (CALIOP) 라이다 관측자료를 이용하여 2012년 한 해 동안의 동북아시아 지역(북위 20도 - 50도, 동경 110도 - 140도)의 대기 에어로솔의 시공간 분포를 분석하였다. 입자 소산계수와 편광소멸도의 통계 분석으로부터 각 고도별 에어로솔 입자의 광학 특성정보를 분석하였고, 각 계절별 에어로솔 광학 특성값의 연직분포

접수일(2014년 7월 29일), 수정일(1차 : 2014년 8월 29일, 2차 : 10월 4일), 게재확정일(2014년 10월 8일).

[†] 교신저자: 이권호(khlee@kiu.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.

정보를 정량화할 수 있었다. 또한, 편광소멸도 자료는 연중 0.5 이상의 큰 값을 보이고 있어 지역 대기에는 비구형성 입자에 의한 영향이 많이 받고 있음을 알 수 있었다. 본 연구는 지역적 규모의 3차원 에어러솔 분포 정보에 대한 기초연구로서, 향후 추가 자료 조사를 통하여 보다 다양한 이벤트성 사례와 에어러솔 기후학적 정보를 생산할 것이다.

1. 서론

라이다(Light Detection And Ranging; LIDAR)는 레이저 발진기로부터 방사된(emitted) 레이저 빔이 목표 대상에 의하여 반사되거나 산란된 광자(photon)신호를 측정하여 광자 에너지의 이동시간으로부터 대상까지의 거리를 결정하는 방법을 주로 사용하는 원격탐사 기법이다. 라이다는 1960년대의 레이저 발명 이후에 기상학적 목적을 위하여 최초로 사용되었으며(Goyer and Watson, 1963; Barrett and Ben-Dov, 1967), 이후 1971년 발사된 아폴로 15호의 달표면 레이저 고도계 실험이 성공적으로 수행되어 측량, 지리, 고고학 등 다양한 분야에서 활용되기 시작하였다(Cracknell and Hayes, 1991). 일반적으로 지표면 고도 관측이나 대상의 형상을 스캔하기 위한 라이다는 강한 산란신호를 해석하여 비교적 고해상도의 지표 고도 및 형상을 분석할 수 있다. 이와는 달리, 대기 관측을 위한 라이다는 주로 지상의 일정 지점에서 대기 권으로 레이저 펄스를 방사하여 대기의 조성물질(주로 대기 에어러솔 입자 또는 구름)에 의한 약한 후방산란 신호의 강도(intensity)를 측정하여 대기 조성물질의 연직 방향 분포를 측정한다.

대기관측을 위한 지상 라이다 관측은 동일 지점에서 연속적인 대기 에어러솔의 광학특성 정보를 제공할 수 있다. 예를 들면, 다파장 라이다를 이용한 제주도 지역의 대기 에어러솔 집중 관측 사례(Hong *et al.*, 2004), 꽃가루 입자의 광학 특성 관측을 수행한 사례(Noh *et al.*, 2012a; 2012b)와 황사 입자의 미세물리 및 광학 특성 관측 분석 사례(Noh *et al.*, 2011; Shin *et al.*, 2012; Noh and Lee, 2013; Shin *et al.*, 2014), 그리고 화산재 입자의 분포 특성 관측 사례(Shin *et al.*, 2013)가 수행되었다. 이러한 지상관측은 일정 지점에서 연속관측이 가능한 대신, 공간적인 해상도에 한계점이 존재하므로 인공위성에 탑재된 라이다 관측방법이 대안으로 사용되었다. 대표적인 사례로서 1994년 9월에 발사된 우주왕복선 디스커버리호에 탑재된 Lidar In-Space Technology Experiment

(LITE) 미션(McCormick *et al.* 1993; Winker *et al.* 1996)을 시작으로 2003년 1월에 발사된 Ice, Cloud, and land Elevation(ICESAT) 위성 에 탑재된 Geoscience Laser Altimeter System(GLAS) 미션 (Spinhirne *et al.* 2005a; 2005b)이 수행되었다. 그리고 2006년 4월에 발사된 Cloud-Aerosol LIDAR and Infrared Pathfinder Satellite Observation(CALIPSO)위성은 이중 채널 편광 라이다 시스템인Cloud-Aerosol LIDAR with Orthogonal Polarization (CALIOP) 라이다를 탑재하고 있다. CALIPSO 위성은 전 지구를 대상으로 주야간 연속 관측이 가능하므로 대기 중의 입자상 성분의 시·공간적 분포정보를 효과적으로 파악할 수 있다(Campanelli *et al.*, 2012; Miffré *et al.*, 2012).

대기 중의 에어러솔은 발생원과 기상조건에 따라 입체적 분포가 상이하며, 이러한 입체적 분포 특성이 복사 전달과정에 영향을 미치게 된다. 특히, 기존의 복사전달 모의를 위하여 사용되는 에어러솔 모델의 연직구조는 주로 고도에 따른 분포가 표준화된 에어러솔 모델(McClatchey *et al.*, 1972)이 사용되고 있다. 이러한 고정된 에어러솔 연직분포 정보는 실제 대기 환경과는 많은 차이가 있으므로, 대기 에어러솔 입자의 연직구조 관측 정보는 대기 중 입자 분포 특성과 복사전달 프로세스에 대한 보다 정확한 이해를 위하여 필요한 자료이다(Lee, 2012a; 2013). 따라서, 본 연구의 목적은 한반도를 포함하는 동북아시아 지역의 대기 에어러솔 입자의 3차원 공간분포 특성을 정량화하는 것이다. 이를 위하여 장기간 관측된CALIPSO 위성자료를 분석하였으며, 대기 에어러솔의 연직 광학특성 정보와 주요 입자성분별 시 공간 분포 자료를 이용한 통계적 분석이 수행되었다.

2. 연구방법

1) 연구대상 지역

본 연구의 연구 대상 지역은 한반도 전체를 포함하는

Fig. 1. Terra MODIS level 3 aerosol optical thickness (AOT) map over study area. MODIS AOTs observed from March 2000 to Jun 2014 are averaged and overlaid. MODIS data were obtained from MODIS data distribution system (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov>).

북위 20-50도와 동경 110도-140도에 해당하는 영역이다. Fig. 1은 연구대상 지역의 대기 에어로솔 분포 현황을 파악하기 위하여 약 14년 동안(2000년 3월-2014년 6월) Terra MODIS 위성으로 분석된 에어로솔 광학두께 (Aerosol Optical Thickness; AOT) 평균값을 표현한다. 이 결과에서는 연구 대상지역의 주요 에어로솔 분포 영역은 주로 중국 동부 지역과 서해안의 해안가의 AOT 값이 높은 지역으로서, 이 지역은 대기중의 에어로솔 입자의 발생빈도가 높고 대기중에 존재하는 에어로솔 입자 농도가 상대적으로 높은 지역임을 나타낸다. 그러나 MODIS와 같은 수동형 센서 관측자료는 2차원적인 평면 정보만을 제공하므로 대기 중에 복잡하게 존재하는 입자상 물질들의 입체적 분포 특성을 분석하기 위하여 CALIPSO와 같은 능동형 센서 관측자료의 사용이 필요하다.

2) CALIPSO 위성자료

CALIPSO 위성은 저궤도 지구관측 위성의 집합체인 A-Train에 포함되어 있으며, 대기 에어로솔과 구름에 대한 전구 관측자료를 제공한다. CALIPSO 위성은 적외 영상 복사계(Imaging Infrared Radiometer; IIR), 중 해상도 광각 카메라(Moderate Spatial Resolution Wide Field-of-view

Table 1. Characteristics of the Cloud-Aerosol LIDAR with Orthogonal Polarization (CALIOP) instrument

Index	Property
Laser	Nd:YAG, diode pumped, Q-switched
Wavelength	532 nm(orthogonal polarization), 1064 nm
Pulse energy	110 mJoule
Repetition time	20.25 Hz
Receiver telescope	1.0 m diameter
Footprint/FOV	100 m/130 urad
Vertical/horizontal resolution	30-60 m/333 m

Camera; WFC), 그리고 CALIOP 라이다를 포함하여 총 3개의 탑재체를 탑재하고 있으며, 약 16일의 재방문주기를 가진다. 이 중 CALIOP은 532 nm (편광신호 포함)와 1064 nm 파장의 레이저를 사용하여 후방산란신호를 관측한다(Winker *et al.*, 2003) (Table 1 참조).

CALIOP 라이다 시스템은 20 ns의 펄스 폭과 20.25 Hz의 펄스 반복률을 가지는 Nd:YAG 레이저 펄스를 사용하며, 이 레이저 빔은 130 urad의 레이저 발산각을 가지고 지표에서 약 70 m 직경의 크기를 나타낸다(Hostetler *et al.*, 2006). 레이저 수신 시스템은 14 비트, 10 MHz의 아날로그-디지털 변환기로서 532 nm와 1064 nm의 파장 신호를 약 15 m의 수직 해상도로 관측한다. 그러나 파장별 대역폭의 충분한 획득을 위하여 위성으로부터 가장 먼 거리 구간 중 해수면 고도 -0.5 km와 8.2 km 사이에 해당하는 수신 자료 중 532 nm 파장에 대해서는 30 m의 수직 해상도, 1064 nm 파장에 대해서는 60 m의 공간해상도를 가지도록 평균된 자료를 사용한다(Farr *et al.*, 2007).

본 연구에서는 CALIOP 에어로솔 연직관측 자료를 분석하기 위하여, CALIOP Level 2 에어로솔 수직분포자료(코드명: CAL_LID_L2_05kmAPro-Prov, Version 3.02)와 수직 특성 마스크자료(코드명: CAL_LID_L2_VFM, Version 3.02)를 사용하였다. CALIOP은 탄성 산란(Elastic Backscatter) 라이다 시스템으로서 라이다가 관측하는 광신호($P(r)$)를 수치해석적으로 계산하여 에어로솔 입자의 광학특성값을 산출한다. $P(r)$ 은 다음의 식 (1)과 같은 라이다 방정식에 의하여 표현된다.

$$P(r) = \frac{1}{r^2} E_0 \zeta [\beta_M(r) + \beta_P(r)] \cdot T_M^2(0, r) \cdot T_O^2(0, r) \cdot T_P^2(0, r) \quad (1)$$

위 식에서, r 은 CALIOP으로부터의 거리, E_0 는 레이저

에너지, ξ 는 라이다 시스템 상수, β_M 과 β_P 는 각각 대기 분자와 입자에 의한 체적 후방산란 계수이다. 그리고 T_M , T_O , T_P 는 각각 대기 분자와 오존, 그리고 입자에 의한 투과도로서, 식(2), (3), (4)와 같이 고도별 대기분자 산란 계수 ($\sigma_M(r)$), 오존 흡수계수 ($\sigma_O(r)$), 고도별 대기분자 산란 계수 ($\sigma_M(r)$) 및 라이다 비 (Sp)의 지수함수로 정의된다.

$$T_M^2 = \exp \left[-2 \int_0^r \sigma_M(r) dr \right] \quad (2)$$

$$T_O^2 = \exp \left[-2 \int_0^r \sigma_O(r) dr \right] \quad (3)$$

$$T_M^2 = \exp \left[-2\eta(r) \int_0^r \sigma_P(r) dr \right] = \exp \left[-2\eta(r) S_P \int_0^r \beta_P(r) dr \right] \quad (4)$$

따라서, 식 (1)에 식 (2), (3), (4)를 대입하여 수치해석적으로 풀게 되면 에어러솔에 의한 후방산란 계수와 소산계수를 구할 수 있게 된다. CALIOP Level 2 에어러솔 연직분포 자료는 이와 같은 방법을 확장하여 개발된 CALIPSO 표준 분석 알고리즘인 Selective Iterated Boundary Layer(SIBYL), Scene Classification Algorithm(SCA), Hybrid Extinction Retrieval Algorithm(HERA)가 적용되어 산출된 532nm와 1064nm 파장에서 에어러솔 소산 계수 (extinction coefficient, σ_{ext}), 후방산란 계수 (backscattering coefficient), 입자 편광소멸도 (particulate depolarization ratio, δ_P)의 연직분포 자료를 포함한다 (Winker *et al.*, 2009; Young and Vaughan, 2009). 이 중 입자 편광소멸도는 CALIOP 라이다의 532 nm 채널의 수평 편광신호($\beta_{P,=}$)와 수직 편광신호($\beta_{P,\perp}$)의 비율로서 식(5)와 같이 계산된다.

$$\delta_P = \frac{\beta_{P,\perp}}{\beta_{P,=}} \quad (5)$$

그리고 각 관측지점별 AOT 값을 식(6)과 같이 고도별 σ_{ext} 를 적분하여 계산하였다.

$$\tau = \int_0^{TOA} \sigma_{ext}(Z) dz \quad (6)$$

연구대상 지역의 에어러솔 연직 분포 특성을 파악하기 위하여 2012년 한 해 동안 관측된 CALIOP 라이다 관측 프로파일 자료로부터 계절별 평균분포 특성을 분석하였다. 계절 평균은 각 계절에 해당하는 월에 대하여 고도별 σ_{ext} 값을 시간과 고도에 대하여 평균화하였고, 이를 토대로 March-April-May(MAM; 봄), June-July-August(JJA; 여름), September-October-November(SON; 가을),

December-January-February(DJF; 겨울)의 4계절 프로파일 자료를 계산하였다. 평균값 계산에 사용된 에어러솔 프로파일 자료의 정확도를 높이고 구름이나 지표로 인한 노이즈를 제거하기 위하여 구름-에어러솔 구분 점수 (Cloud Aerosol Discrimination(CAD) Score)가 에어러솔의 범위에 해당하는 -20 부터 -100인 경우와 소산계수 품질 관리 플래그(Quality Assurance Flag) 값이 에어러솔 입자에 해당하는 경우만을 선택하였다. 그리고 주야간 대기 에어러솔 분포변화를 비교하기 위하여 주간과 야간 동안에 관측된 자료를 추가적으로 구분하여 평균값을 계산하였다.

3. 결 과

1) 에어러솔 연직 분포 특성

Fig. 2는 주간과 야간의 계절별 평균 σ_{ext} 의 수직 분포 값을 나타낸다. 일반적으로, 본 연구의 대상지역인 동북아시아 지역의 σ_{ext} 연직분포는 약 10 km 부근 이하의 고도에 주로 분포하고 있으며, 약 5 km 고도 이하에서 σ_{ext} 값의 증가가 커지는 것을 알 수 있다. σ_{ext} 연직분포의 계절별 특징으로는, 주로 여름과 가을철에 약 3 km 이상의 고도에서 σ_{ext} 값이 상대적으로 높은 값을 나타내고 있다. 이러한 결과는 이 고도 영역에서 에어러솔 입자 농도의 증가로 인한 σ_{ext} 값이 증가했음을 증명하여, 이러한 높은 고도에서는 주로 편서풍과 같은 강한 바람이 존재하므로 장거리 이동성 에어러솔의 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

이러한 결과는 Winker *et al.* (2013)이 2006년부터 2011년 동안 관측된 CALIOP 자료를 이용하여 전 지구의 σ_{ext} 연직분포를 분석한 결과, 봄철 북서태평양 지역의 σ_{ext} 연직분포는 다른 지역에 비하여 상대적으로 매우 높은 고도인 약 8 km까지 높은 σ_{ext} 값이 분석된 것과 일치한다. 그러나 Winker *et al.* (2013)에서 제시되고 있는 결과는 동북아 에어러솔의 주요 배출원인 동북아시아 대륙지역에서 멀리 떨어진 지역을 대상으로 분석되었으므로 보다 강한 에어러솔 관측신호를 분석하는 데에는 한계가 있으나, 본 연구의 대상지역은 동북아 지역의 에어러솔 발생원과 주요 이동경로를 포함하고 있으므로 동북아

Fig. 2. Seasonal mean extinction (@532nm) profile for daytime (solid line) and nighttime (dashed line). CALIOP extinction observed from December 2011 to November 2012 was averaged.

시아 지역의 에어러솔 분포특성을 보다 세밀히 분석한 결과를 제공하고 있다는 점에서 차이가 있다. 한편, Fig. 2에서 야간의 에어러솔 연직분포 양상은 주간 결과보다는 상대적으로 낮은 고도와 σ_{ext} 값을 보인다. 이러한 결과는 야간 동안의 에어러솔 배출원의 감소와 혼합고의 저하 등으로 인한 에어러솔 고도의 감소가 원인으로 판단된다.

Fig. 3은 각각 주간과 야간 동안 CALIOP 라이다 관측에 의한 계절별 δ_P 연직분포 결과이다. δ_P 값은 입자에 입사하는 광 성분의 산란 특성이 입자의 비 구형도(non-sphericity)에 따라 변하는 특성을 반영한 값으로서 입자 비구형도가 커질수록 δ_P 값도 커진다. 일반적으로 비구형 먼지나 화산재는 0.3 이상의 범위를 나타내며, 구형의 스모크 입자나 오염성 입자는 0.01-0.05의 범위의 δ_P 값을 나타내는 것으로 알려져 있다(Tesche *et al.*, 2009; Burton *et al.*, 2013). 그러나, Fig. 3에서 나타나는 것처럼, 동북아시아 지역의 δ_P 값은 0.5보다 큰 값이 여러 고도 층에서 나타났다. 특히, 여름과 가을에는 고도별로 매우 다양하게 나타나고 있으며, 고도 2 km와 7 km 부근의 에

어러솔 입자가 상대적으로 강한 비구형도가 나타나고 있다. 이러한 결과는 CALIOP 자료처리 알고리즘 상에서 구름제거 과정이 완벽하지 않아 발생하는 것으로 추정되며, 이에 대한 추가연구의 필요성이 제기된다.

전체 연구 기간 동안의 CALIOP 라이다로 관측된 파장별 σ_{ext} , AOT, δ_P 의 계절별 평균값을 요약한 결과를 표 2와 3에 정리하였다. 이 중 동북아 지역 에어러솔의 계절별 평균 δ_P 값은 주로 여름과 가을 동안에 상대적으로 높은 값 0.58 - 0.91의 값을 나타내었으며, 입자 비구형도가 다른 계절에 비하여 크게 나타나고 있었다.

대기중에 존재하는 에어러솔 입자가 고도별로 혼합된 상태인 경우 기존의 수동형 센서로 이를 구분하기는 불가능하다. CALIOP 수직 특성 마스크(Vertical Feature Mask; VFM) 자료는 고도별 6가지 주요 에어러솔 타입(clean maritime, dust, polluted continental, clean continental, polluted dust, smoke)에 관한 정보를 제공하고 있다(Liu *et al.*, 2005; Omar *et al.*, 2009). CALIOP VFM 자료는 이전에 언급된 SCA 알고리즘을 사용하며, 이 알고리즘에서는 편광소멸도를 이용한 비구형 입자의 구분, 후방산

Fig. 3. Seasonal mean depolarization ratio (@532nm) profile for daytime (solid line) and nighttime (dashed line). CALIOP depolarization ratio observed from December 2011 to November 2012 was averaged.

Table 2. Regional mean extinction, AOT, depolarization ratio during 2012. Units of extinction is km^{-1}

Parameter	MAM	JJA	SON	DJF	Average
Mean extinction(@532nm)	0.15	0.19	0.18	0.20	0.18 ± 0.02
Mean extinction(@1064nm)	0.14	0.14	0.13	0.15	0.14 ± 0.01
Mean AOT(@532nm)	0.24	0.23	0.23	0.23	0.23 ± 0.01
Mean AOT(@1064nm)	0.23	0.16	0.16	0.17	0.18 ± 0.03
Mean DP(@532nm)	0.51	0.91	0.72	0.45	0.65 ± 0.18

Table 3. Same as Table 2, but for nighttime

Parameter	MAM	JJA	SON	DJF	Average
Mean extinction(@532nm)	0.09	0.13	0.14	0.14	0.12 ± 0.02
Mean extinction(@1064nm)	0.08	0.08	0.10	0.11	0.09 ± 0.01
Mean AOT(@532nm)	0.24	0.21	0.22	0.22	0.22 ± 0.01
Mean AOT(@1064nm)	0.17	0.10	0.136	0.16	0.14 ± 0.03
Mean DP(@532nm)	0.47	0.58	0.68	0.48	0.55 ± 0.10

란 계수, 토지피복 타입이 입력자료로 사용된다. CALIOP VFM 자료를 AERONET 자료와 비교한 결과는 약 70% 이내에서 일치하며, 각 에어러솔 타입 중에서도 dust 타입과 polluted dust 타입이 비교적 잘 일치하는 것으로 알려져 있다(Mielonen *et al.*, 2009).

고도별 총 소산계수($\sigma_{tot,ext}(Z)$)는 각 에어러솔 타입(i)

별 소산계수($\sigma_{i,ext}(Z)$)의 합계로서 표현 가능하다(식 (7)).

$$\sigma_{tot,ext}(Z) = \sum_{i=1}^6 \sigma_{i,ext}(Z) \quad (7)$$

Fig. 4와 5는 에어러솔 타입 별 소산계수 분포를 나타내며, 각 실선의 색깔은 clean maritime(blue), dust(yellow), polluted continental(grey), clean continental(sky blue),

Fig. 4. Seasonal mean daytime extinction (@532nm) profile for different aerosol types. Colors represents clean maritime (blue), dust (yellow), polluted continental (grey), clean continental (sky blue), polluted dust (orange), and smoke (red), respectively.

Fig. 5. Same as Fig. 4, but for nighttime.

Fig. 6. Daytime AOT maps with longitude and latitude directional mean AOT and extinction plots during 2012.

Fig. 7. Same as Fig. 6, but for nighttime.

polluted dust(orange), smoke(red)와 같이 구분된다. clean maritime, clean continental, polluted continental, polluted dust 타입은 지표 근처에서 큰 값을 나타내지만 smoke, dust 타입에 의한 소산계수의 연직분포는 주로 상층 대기에서 큰 소산계수값을 나타내고 있다. 그리고 dust 타입의 증가는 Fig. 2와 3에서 총 σ_{ext} 값과 δ_p 의 증가와 관련이 있다.

CALIOP 에어러솔 수직 특성 마스크 자료를 이용하여 주요 에어러솔 타입별 소산계수 프로파일을 분석한 결과, smoke와 dust 입자가 주로 존재하고 있으며, 특히 여름과 가을에는 고도가 증가할수록 smoke의 영향이 커짐을 알 수 있다. Smoke 입자는 주로 대륙에서 발생하는 각종 오염성 에어러솔 및 바이오매스 버닝과 활발한 대기 연직방향 동역학으로 인한 결과물로 인한 것으로 보인다(Lee *et al.*, 2007; 2012b). dust 입자의 증가는 σ_{ext} 및 δ_p 의 증가와 관련성을 보였다. 그리고 주간과 야간의 차이는 총 소산계수의 결과와 마찬가지로, Fig. 5의 야간 동안의 에어러솔 연직분포 양상은 주간보다는 에어러솔 층이 저하하며 복잡하지 않은 형태를 나타내고 있으므로, 에어러솔의 성분별 연직분포 변화는 기상학적 조건과 에어러솔 배출량에 의존함을 알 수 있다.

Fig. 6과 7은 연구대상 지역 전체에 대한 AOT 분포 지도와 위도와 경도 방향 평균 σ_{ext} 및 AOT 분포 변화를 나타낸다. CALIPSO 위성의 이동경로가 주간과 야간동안에 서로 다른 방위각을 가지므로 Fig. 6과 7의 지도위에 표현된 AOT값은 동북방향으로 다르게 나타난다. Fig. 1의 MODIS AOT 분포도와 마찬가지로 CALIPSO AOT 값이 주로 높은 지역은 주야간을 통틀어 주로 중국 동부지역이 주로 높았으며, σ_{ext} 값이 큰 지역은 북위 27-42도, 동경 110-123도 영역에서 0.2 km^{-1} 이상의 값이 나타났다. 그리고 CALIPSO AOT 값이 높은 지역일수록 주간과 야간의 에어러솔의 고도층이 야간에 비하여 상대적으로 증가하고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

CALIPSO 위성에 탑재된 CALIOP 라이다 관측자료를 이용하여 2012년 한 해 동안의 동북아시아의 대기 에어러솔의 3차원 분포 특성에 관하여 분석하였다. 계절

적 에어러솔의 수직분포 특성으로는 봄에는 비교적 고도가 높은 영역에서 σ_{ext} 값이 높게 나타나며, 여름과 가을철의 경우는 다른 계절보다 상대적으로 높은 σ_{ext} 값이 전체 고도에서 나타났다. 그리고 주야간의 σ_{ext} 값의 변화는 전체 고도에서 일반적으로 야간의 경우가 더욱 낮은 특징을 나타냈으며, 이는 에어러솔 배출량 및 혼합고의 저하등이 원인으로 판단된다. 그리고 입자의 비구형도를 나타내는 δ_p 자료를 분석한 결과는 전 계절에 걸쳐 약 0.5 이상의 높은 값을 나타내므로, 연구 대상지역의 에어러솔 입자의 모양은 비구형성 입자가 흔히 존재하고 있는 것을 알 수 있다. 특히 이러한 결과는 σ_{ext} 값이 크게 나타난 여름과 가을철에 더욱 크게 나타나고 있다.

CALIOP 에어러솔 수직 특성 마스크 자료를 이용하여 주요 에어러솔 타입별 소산계수 프로파일을 분석한 결과, smoke와 dust 입자가 주로 존재하고 있으며, 특히 여름과 가을에는 고도가 증가할수록 smoke의 영향이 커지는 현상을 발견하였다. 이것은 대륙에서 발생하는 각종 오염성 에어러솔 및 바이오매스 버닝으로 인한 배출 smoke 입자의 증가와 활발한 대기 연직방향 동역학으로 인한 결과물로 인한 것으로 보이며, dust 입자의 증가는 σ_{ext} 및 δ_p 의 증가와 관련성을 보였다. 이러한 위성탐재라이다 관측자료의 분석결과는 동북아시아 지역의 에어러솔 분포변화 및 광학특성 정량화를 위하여 매우 효과적이므로, 대기 에어러솔의 현황파악 및 이동현상, 기후 변화에 미치는 영향에 관련된 연구에 있어도 기여도가 클 것으로 기대된다.

사 사

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2012-7080)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Barrett, E.W. and B.D. Oded, 1967. Application of the Lidar to Air Pollution Measurements, *J. Appl. Meteor.*, 6: 500-515.
- Burton, S.P., R.A. Ferrare, M.A. Vaughan, A.H. Omar,

- R.R. Rogers, C.A. Hostetler, and J.W. Hair, 2013. Aerosol classification from airborne HSRL and comparisons with the CALIPSO vertical feature mask, *Atmos. Meas. Tech.*, 6: 1397-1412, doi:10.5194/amt-6-1397-2013.
- Campanelli, M., V. Estelles, T. Smyth, C. Tomasi, M.P. Martinez-Lozano, B. Claxton, P. Muller, G. Pappalardo, A. Pietruczuk, J. Shanklin, S. Colwell, C. Wrench, A. Lupi, M. Mazzola, C. Lanconelli, V. Vitale, F. Congeduti, D. Dionisi, F. Cardillo, M. Cacciani, G. Casasanta, and T. Nakajima, 2012. Monitoring of Eyjafjallajökull volcanic aerosol by the new European Skynet Radiometers(ESR) network, *Atmos. Environ.*, 48: 33-45, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2011.09.070.
- Cracknell, A.P. and L.W.B. Hayes, 1991. *Introduction to Remote Sensing (2 ed.)*, London: Taylor and Francis, ISBN 0-8493-9255-1, OCLC 70765252.
- Farr, T.G., P.A. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, M. Paller, E. Rodriguez, L. Roth, D. Seal, S. Shaffer, J. Shimada, J. Umland, M. Werner, M. Oskin, D. Burbank, and D. Alsdorf, 2007. The Shuttle Radar Topography Mission, *Rev. Geophys.*, 45(2): RG2004, doi:10.1029/2005RG000183.
- Goyer, G.G. and R. Watson, 1963. The Laser and its Application to Meteorology, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 44 (9): 564-575. [accessdate= requires |url= (help)]
- Hong, C.S., K.H. Lee, Y.J. Kim, and Y. Iwasaka, 2004. LIDAR measurement of vertical aerosol profile and optical depth during the ACE-Asia 2001 IOP at Gosan, Jeju Island, Korea, *Environ. Moni. & Assess.*, 92: 43-57.
- Hostetler, C.A., Z. Liu, J. Reagan, M. Vaughan, D. Winker, M. Osborn, W.H. Hunt, and K.A. Powell, 2006. CALOP algorithm theoretical basis document calibration and level 1 data products, *Release 1.0 document no.*, PC-SCI-201.
- Lee, K.H., Y.J. Kim, W. von Hoyningen-Huene, and J.P. Burrows, 2007. Spatio-Temporal Variability of Atmospheric Aerosol from MODIS data over Northeast Asia in 2004, *Atmos. Environ.*, 41(19): 3959-3973. doi:10.1016/j.atmosenv.2007.01.048.
- Lee, K.H., 2012a. Aerosol direct radiative forcing by three dimensional observations from passive- and active- satellite sensors, *J. of Korean Society for Atmos. Environ.*, 28(2): 159-171, DOI: <http://dx.doi.org/10.5572/KOSAE.2012.28.2.159> (in Korean with English abstract).
- Lee, K.H., 2012b, Impact of Northeast Asian biomass burning activities on regional atmospheric environment, *J. of the Korean Association of GIS*, 15(1): 184-196 (in Korean with English abstract).
- Lee, K.H., 2013. Three dimensional monitoring of the Asian dust by the COMS/GOCI and CALIPSO satellites observation data, *J. of Korean Society for Atmos. Environ.*, 29(2): 119-210 (in Korean with English abstract).
- Liu, Z., A.H. Omar, Y. Hu, M.A. Vaughan, and D.M. Winker, 2005, *CALIP algorithm theoretical basis document. Part 3: Scene classification algorithms, technical report*, Langley Res. Cent., NASA, Hampton, Va.
- McClatchey, R.A., R.W. Fenn, J.E. A. Selby, F.E. Volz, and J.S. Garing, 1972. Optical properties of the atmosphere. 3rd ed. *AFCRL Environ. Res.*, 411: 108.
- McCormick M.P., D.M. Winker, E.V. Browell, J.A. Coakley, C.S. Gardner, R.M. Hoff, G.S. Kent, S.H. Melfi, R.T. Menzies, C.M.R. Menzies, D.A. Randall, and J.A. Reagan, 1993. Scientific investigations planned for the Lidar In-space Technology Experiment (LITE), *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 74(2): 205-214.
- Miffre, A., G. David, B. Thomas, P. Rairoux, A.M. Fjaeraa, N.I. Kristiansen, and A. Stohl, 2012. Volcanic aerosol optical properties and phase partitioning behavior after long-range advection

- characterized by UV-Lidar measurements, *Atmos. Environ.*, 48: 76-84.
- Mielonen, T., A. Arola, M. Komppula, J. Kukkonen, J. Koskinen, G. de Leeuw, and K.E. J. Lehtinen, 2009. Comparison of CALIOP level 2 aerosol subtypes to aerosol types derived from AERONET inversion data, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L18804, doi:10.1029/2009GL039609.
- Noh Y.M. and K.H. Lee, 2013. Characterization of Optical Properties of Long-range Transported Asian Dust in Northeast Asia, *Korean Journal of Remote Sensing*, 29(2): 243-251, <http://dx.doi.org/10.7780/kjrs.2013.29.2.8> (in Korean with English abstract).
- Noh Y.M., D. Mueller, K.H. Lee, Y.J. Choi, K.R. Kim, H.L. Lee, and T.J. Choi, 2012a. Instantaneous Monitoring of Pollen Distribution in the Atmosphere by Surface-based Lidar, *Korean Journal of Remote Sensing*, 28(1): 1-9 (in Korean with English abstract).
- Noh Y.M., H.L. Lee, D. Mueller, K.H. Lee, Y.J. Choi, K.R. Kim, and T.J. Choi, 2012b. Retrieval of Pollen Optical Depth in the Local Atmosphere by Lidar Observations, *Korean Journal of Remote Sensing*, 28(1): 11-19 (in Korean with English abstract).
- Noh, Y.M., K.H. Lee, and H. Lee, 2011. A retrieval of vertically- resolved Asian dust concentration from quartz channel measurements of Raman lidar, *Korean J. of Atmos. Environ.*, 27(3): 326-336 (in Korean with English abstract).
- Omar, A., D.M. Winker, M.A. Vaughan, Y. Hu, C.R. Trepte, R.A. Ferrare, K. Lee, C.A. Hostetler, C. Kittaka, R.R. Rogers, R.E. Kuehn, and Z. Liu, 2009. The CALIPSO automated aerosol classification and Lidar ratio selection algorithm. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 26, 1994-2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2009JTECHA1231.1>.
- Shin D.H., Y.M. Noh, K.H. Lee, E.S. Jang, S.K. Shin, and Y.J. Kim, 2013. Development of stratospheric Lidar for observation of volcano aerosols in the stratosphere over Korea, *Korean Journal of Remote Sensing*, 29(5): 581-588, <http://dx.doi.org/10.7780/kjrs.2013.29.5.13> (in Korean with English abstract).
- Shin S.K., D.H. Shin, K.H. Lee, and Y.M. Noh, 2012. Classification of Dust/Non-dust Particle from the Asian Dust Plumes and Retrieval of Microphysical Properties using Raman Lidar System, *J. KOSAE*, 28(6): 688-696, DOI: <http://dx.doi.org/10.5572/KOSAE.2012.28.6.688> (in Korean with English abstract).
- Shin S.K., Y.M. Noh, K.H. Lee, D.H. Shin, K.C. Kim, and Y.J. Kim, 2014. Study on the Variation of Optical Properties of Asian Dust Plumes according to their Transport Routes and Source Regions using Multi-wavelength Raman LIDAR System, *Korean Journal of Remote Sensing*, 30(2): 241-249, <http://dx.doi.org/10.7780/kjrs.2014.30.2.7> (in Korean with English abstract).
- Spinhirne, J.D., S.P. Palm, W.D. Hart, D.L. Hlavka, and E.J. Welton, 2005b. Cloud and aerosol measurements from GLAS: Overview and initial results, *Geophys. Res. Lett.* 32: L22S03, doi: 10.1029/2005GL023507.
- Spinhirne, J.D., S.P. Palm, D.L. Hlavka, W.D. Hart, and E.J. Welton, 2005a. Global aerosol distribution from the GLAS polar orbiting lidar instrument, *IEEE*, 2-8, DOI: 10.1109/AERSOL. 2005.1494140.
- Tesche, M., A. Ansmann, D. Müller, D. Althausen, R. Engelmann, V. Freudenthaler, and S. Groß, 2009. Vertically resolved separation of dust and smoke over Cape Verde using multiwavelength Raman and polarization lidars during Saharan Mineral Dust Experiment 2008, *J. Geophys. Res.*, 114, D13202, doi:10.1029/2009JD011862.
- Winker D.M., R.H. Couch, and M.P. McCormick, 1996. An overview of LITE: NASA's Lidar In-space Technology Experiment. *Proc. IEEE*, 84: 164-180.

- Winker, D.M., J.R. Pelon, and M.P. McCormick, 2003. The CALIPSO mission: Spaceborne lidar for observation of aerosols and clouds, *Proc. of SPIE*, Hangzhou, China, Oct. 23, 2002, Vol. 4893.
- Winker, D.M., M.A. Vaughan, A.H. Omar, Y. Hu, K.A. Powell, Z. Liu, W.H. Hunt, and S.A. Young, 2009. Overview of the CALIPSO Mission and CALIOP Data Processing Algorithms, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 26: 2310-2323.
- Winker, D.M., J.L. Tackett, B.J. Getzewich, Z. Liu, M.A. Vaughan, and R.R. Rogers, 2013. The global 3-D distribution of tropospheric aerosols as characterized by CALIOP, *Atmos. Chem. Phys.*, 13: 3345-3361, doi:10.5194/acp-13-3345-2013.
- Young, S.A. and M.A. Vaughan, 2009. The retrieval of profiles of particulate extinction from Cloud Aerosol Lidar Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO) data: Algorithm description, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 26: 1105-1119, doi:10.1175/2008JTECHA1221.1.