한국대기환경학회지 제 29 권 제 2 호
J. KOSAE Vol. 29, No. 2 (2013) pp. 199～210
Journal of Korean Society for Atmospheric Environment
DOI: http://dx.doi.org/10.5572/KOSAE.2013.29.2.199

천리안 위성 해양탑재체와 위성탑재 라이다 관측자료를 이용한 황사 에어러솔의 3차원 모니터링

Three Dimensional Monitoring of the Asian Dust by the COMS/GOCI and CALIPSO Satellites Observation Data

이 권 호*
경일대학교 공간정보공학과

(2013년 2월 4일 접수, 2013년 2월 15일 수정, 2013년 2월 18일 채택)

Kwon-Ho Lee*
Department of Geoinformatics Engineering, Kyungil University

(Received 4 February 2013, revised 15 February 2013, accepted 18 February 2013)

Abstract

Detailed 3 dimensional structure of Asian dust plume has been analyzed from the retrieved aerosol data from two different satellites which are the Korea's 1st geostationary satellite, namely the Communication, Ocean, Meteorological Satellite (COMS) spacecraft launched in 2010, and the NASA's Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO). COMS spacecraft provides the first time resolved aerial aerosol maps by the systematically well-calibrated multispectral measurements from the Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) instrument. GOCI data are used here to evaluate intensity, spatial distribution, and long-range transport of Asian dust plume during 1～2 May 2011. We found that the strong Asian dust plume showing AOT of 2～5 was lofted to the altitude around 2～4 km above the Earth's surface and transported over Yellow Sea with a speed of about 25 km/hr. The CALIPSO extinction coefficient and particulate depolarization ratio (PDR) profiles confirmed that non-spherical dust particles were enriched in the dust plume. This study is a first example of quantitative integration of GOCI and CALIOP measurements for clarifying the overall structure of an Asian dust event.

Key words : Geostationary satellite, GOCI, CALIPSO, Lidar, Asian Dust

1. 서 론

동북아시아 지역에서 주기적으로 발생하고 있는 황사현상은 주로 대륙의 건조지역(고비사막이나 타클라마칸 사막, 또는 내몽골 등)에서 발생하는 토양 먼지가 강력한 바람에 의하여 편서풍을 타고 이동하는 메커니즘의 결과이다(Arimoto *et al*., 2006; Huebert *et al*., 2003; Murayama *et al*., 2001). 순수한 황사입자는 모래 성분이 주를 이루지만, 황사의 이동 경로가 중국의 산업화된 지역을 통과하는 경우에는 이 지역에서 배출되는 오염성 에어러솔과 물리적인 반응을 통

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)53-850-7383, E-mail : khlee@kiu.ac.kr

하여 입자의 광학적 특성에 영향을 미치게 된다(Yu *et al*., 2006; Carrico *et al*., 2003). 즉, 탄소나 황산화물과 같은 매우 작은 입자들이 거대입자인 황사입자의 표면에 달라붙어 각 입자가 가지는 고유의 광학 특성이 매우 복잡해진다. 그리고 황사 현상은 대기중의 입자 농도가 매우 급격히 증가하는 양상을 보이므로 단일 규모로 대기 오염의 증가와 기후변화 영향을 동시에 발생하는 특징을 가지고 있다(Lee, 2012; Zhang *et al*., 2003).

대기중의 에어러솔은 배출원의 특성과 기상조건에 따라 공간적 분포가 달라지지만, 일반적으로 안정된 조건하에서 지상에서 지표면 근처가 가장 높고 고도가 높아질수록 감소한다. 그러나, 황사와 같은 장거리 이동성 에어러솔은 고고도의 빠르게 움직이는 바람과 같이 이동하므로 다양한 수직 분포 양상을 가진다(Shin *et al*., 2012; Hong *et al*., 2004). 특히, 에어러솔의 연직분포는 복사강제효과에 영향을 미치는 주요한 요인 중 하나로 알려져 있다(Meloni *et al*., 2005; Claquin *et al*., 1998; Carlson and Benjamin, 1980). 따라서 에어러솔의 연직분포를 직접 관측이 가능한 라이다(Lidar; Light Detection And Ranging)를 이용하여 대기 에어러솔의 연직분포를 분석해왔다(Noh *et al*., 2011; Lee *et al*., 2008; Hong *et al*., 2004). 지상에서의 라이다 관측을 통하여 얻은 에어러솔의 연직 광학특성 결과를 이용하여 복사강제 효과를 산정하거나(Wendisch *et al*., 2006), 위성자료의 대기보정(Atmospheric correction)에 응용하기도 하지만(Gong *et al*., 2006), 관측지점을 벗어나는 지점에 대한 정보획득이 어려우므로 공간적인 한계점을 극복하기 힘든 단점이 있다.

황사 현상과 같은 광역적 에어러솔 이벤트 현상은 대기 중 입자농도가 높고, 수평적 영향 범위가 넓고, 수직적 분포가 복잡하기 때문에 기존의 대기 자동측정망 또는 특정 장비를 이용한 지상 관측망으로는 공간적 특성을 정량화 하기엔 부족하다. 지상관측의 단점을 극복하기 위하여 공간적 해상도가 높은 광역적 감시 체계 구축의 필요성이 제시되어 인공위성을 이용한 광역감시 기술이 개발되었다(Lee and Kim, 2010; Lee *et al*., 2004). 1970년대부터 시작된 지구관측 인공위성을 이용한 대기 관측 자료는 시·공간적인 해상도와 분광학적 해상도를 가진 다양한 자료를 제공함으로 인하여(Lee *et al*., 2009), 대기질 감시 및 기후변화 연구에 있어서 중요한 역할을 하고 있다(Lee *et al*., 2006).

인공 위성은 위성이 이동하는 궤도에 따라 전 지구를 관측할 수 있는 저궤도 위성과, 항상 같은 지점을 관측하는 정지궤도 위성으로 분류된다. 저궤도 위성은 센서의 관측 폭에 따라 하루 1～3회 정도만 동일지역 상공을 통과하므로 관측자료의 수가 제한적이다. 그러나 천리안 위성 같은 정지궤도 위성은 동일 지역을 연속적으로 관측하므로 지역 규모의 환경감시 측면에서 매우 유용하다. 그리고 인공위성에 탑재된 센서는 지구 방출 복사 또는 지구에 의하여 반사된 태양 복사 에너지를 측정하는 수동형 센서와 기기에서 직접 에너지원을 방사하여 후방 산란된 복사 에너지를 측정하는 능동형 센서로 구분된다. 수동형 센서는 대기 조성 물질의 수평적 분포 분석이 가능하며, 능동형 센서는 대기 연직 분포에 대한 정보를 분석할 수 있다. 따라서 두 가지 서로 다른 위성 관측 자료로부터 획득된 황사에 대한 수평적 분포, 수직적 분포, 그리고 파장별 광학특성 정보는 기존의 지상관측이 가지는 공간적인 한계점을 극복하고 입체적인 에어러솔의 분포 특성의 분석에 유용하다.

따라서 본 연구에서는 정지궤도 해양 탑재체 관측자료와 위성 탑재 라이다 관측자료를 통합하여 황사 현상에 대한 3차원 공간분포 및 광학적 특성을 분석하는 것을 목적으로 하였다. 연구 대상 지역은 천리안 위성의 정지궤도 관측범위이며, 천리안 위성 발사 후 첫 황사현상이 보고되었던 2011년 5월 사례를 선정하였다. 그리고 서로 다른 관측방식을 가지는 위성자료를 이용하여 황사 현상에 대한 수평적 공간분포 및 수직적 광학특성 분포 정보를 종합적으로 획득하였다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서는 대륙에서 발생하여 장거리 이동을 하는 황사를 대상으로 정지궤도 위성인 천리안 위성의 해양탑재체인 Geostationary Ocean Color Imager (GOCI)와 Cloud Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO) 위성자료를 사용하였다. GOCI의 원시 자료로부터 에어러솔 광학두께(Aerosol Optical Thickness; AOT)를 분석하는 방법은 Lee *et al*. (2012)에서 사용한 방법을 변형하였다. 각

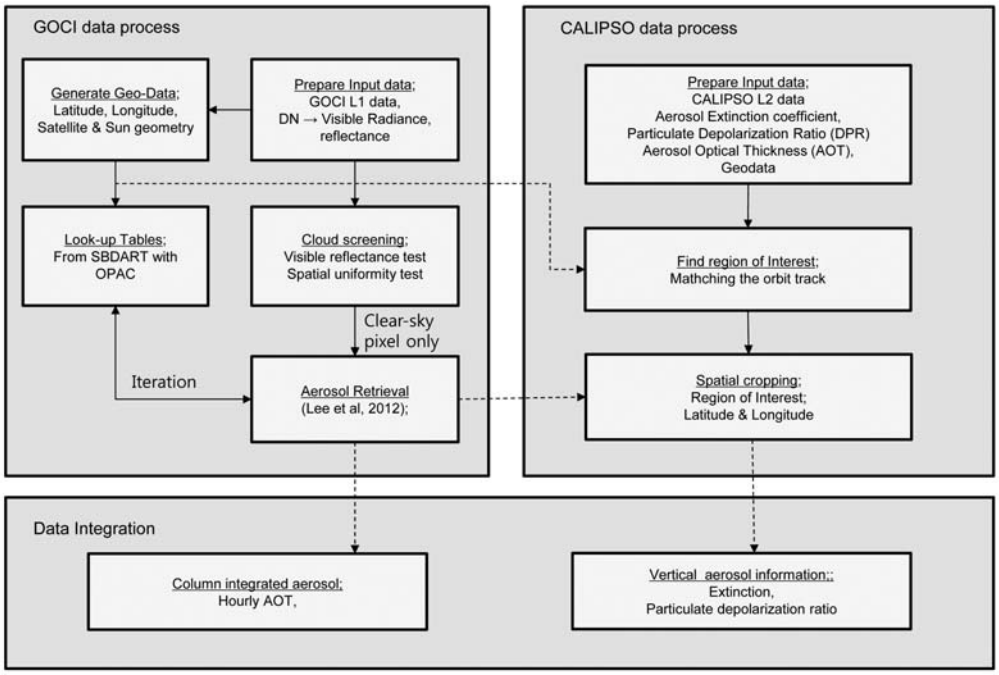

Fig. 1. Flow chart of satellite data processing.

Table 1. Specification of the GOCI sensor. Extraterrestrial solar irradiance, and Rayleigh optical thickness at a given band wavelength.

Band	1	2	3	4	5	6	7	8
Wavelength [μm]	412	443	490	555	660	680	745	865
Band width [nm]	20	20	20	20	20	20	40	40
Signal to noise ratio (SNR)	1,000	1,090	1,170	1,070	1,010	870	860	750
F_0 [W/m^2/μm/sr]	1738.8	1922.1	1988.4	1869.9	1535.3	1508.3	1295.9	967.6
Rayleigh optical thickness (ROT)	0.319	0.236	0.156	0.095	0.046	0.041	0.028	0.015

자료에 대한 획득 및 분석과정에 대한 상세 설명은 다음과 같으며, 전체적인 자료처리 과정은 그림 1과 같다.

2. 1 에어러솔 수평 분포 변화

천리안 위성은 영문 코드 네임이 COMS (the Communication, Ocean, and Meteorological Satellite) 로서, 2010년 7월 24일 프랑스령 기니아의 꾸르 우주센터에서 발사되어 현업화된 자료를 생산하고 있다. 천리안 위성에 탑재된 해양센서인 GOCI는 2백만 화소의 CMOS array로 구성된 세계최초의 정지궤도 해양 탑재체로서 수명은 약 7.7년이다. GOCI는 6개의 가시광선(λ=412 nm, 443 nm, 490 nm, 555 nm, 660 nm, 680 nm)과 2개의 근적외 영역(λ=745 nm, 865 nm)에서 매 시간별 한반도 지역을 관측한 영상자료를 생산하고 있다(Ryu *et al*., 2012). 표 1에는 GOCI 센서의 특징을 요약하였다. GOCI의 관측영역은 북위 36°와 동경 130°를 중심으로 수평면적 2,500 km × 2,500 km에 해당하며, 영상의 공간해상도는 약 500 m이다. 이와 같이, 정지궤도이면서 비교적 고해상도의 다중 파장 센서이므로 한반도를 준 실시간으로 광역감시를 할 수 있는 중요한 역할을 수행할 수 있다.

GOCI가 관측하는 전기적 신호를 정확한 물리량인 복사량으로 환산하는 과정에서 기기오차 및 신호대

잡음비 등 여러 요소를 고려한 복사보정에 관한 정확도는 약 4% 이내를 가지는 것으로 알려져 있다(Kang *et al*., 2010). GOCI 영상자료는 현재 한국 해양과학기술원 해양위성센터 (http://kosc.kordi.re.kr/index.kosc)에서 제공되며, 초기 원시자료인 Level-1 (L1)자료는 복사보정을 거친 디지털화된 숫자 (Digital number; DN)를 NASA의 표준 위성자료 저장 형식인 HE5 포맷 (http://www.hdfgroup.org/HDF5/)으로 저장되어 있다. DN 값을 물리적으로 의미가 있는 복사량 (Radiance, L)으로 변환하기 위하여 다음의 식 (1)을 사용한다.

$$L=DN\times a+b \tag{1}$$

여기서 a와 b는 선형 변환 상수로서, 현재 GOCI 자료내에서 제공되는 값 a=1.0E−6, b=0을 사용하여 계산된 복사량 L은 $W\cdot m^{-2}\cdot sr^{-1}\cdot \mu m^{-1}$의 단위를 가진다. 식 (1)을 이용하여 변환된 복사량은 이후 자료처리를 위한 편의상 다음의 식 (2)를 이용하여 반사도 (ρ_{TOA})로 변환한다.

$$\rho_{TOA}=\frac{\pi\cdot L(\lambda)}{F_0(\lambda)\cdot \cos\theta_0} \tag{2}$$

여기서 $F_0(\lambda)$는 파장 λ에 대한 태양상수(단위: $Wm^{-2}\ \mu m^{-1}\ sr^{-1}$), θ_0는 태양 천정각이다(표 1참조). 이 반사도 값은 지구 대기권내로 입사하는 태양 복사 에너지와 인공위성이 관측하는 복사량의 비율로서 대기중 에어러솔과 대기분자, 그리고 지표면에 의하여 반사된 태양 복사량의 합이며, 식 (3)과 같은 복사전달 방정식을 사용하여 각 요소별 기여도를 해석할 수 있다.

$$\rho_{TOA}(\lambda)=\rho_{Aer}(\lambda)+\rho_{Ray}(\lambda)+\frac{T_o(\lambda)\cdot T_s(\lambda)\cdot \rho_{Surf}(\lambda)}{1-H_a\cdot \rho_{Surf}(\lambda)} \tag{3}$$

여기서 ρ_{TOA}, ρ_{Aer}, ρ_{Ray}, ρ_{Surf}는 각각 위성이 관측한 반사도, 에어러솔에 의한 반사도, 대기분자산란 (Rayleigh 산란)에 의한 반사도, 지표반사도이다. T_o,T_s는 각각 태양과 위성경로에 대한 대기 투과도이며, Ha는 반구 알베도 (Hemishperic Albedo)이다. 식 (3)으로부터 ρ_{Ray}는 Rayleigh 산란식을 이용하여 계산 가능하며, ρ_{Surf}는 실지 관측값이나 경험식을 통하여 얻을 수 있으므로 이 값들을 ρ_{TOA}에서 소거하면 ρ_{Aer}를 얻는다. ρ_{Aer}는 대기중의 에어러솔 입자수에 대한 함수로서 에어러솔 입자의 광학특성에 따라 달라지게 된다. 황사의 경우, 일반적으로 알려진 입자의 크기와 굴절률을 이용하여 산정된 단일 입자 광학적 특성을 결정하고 이 값과 다양한 AOT (파장=550 nm) 조건하에서 위성이 관측한 값 ρ_{Aer}를 이론적으로 모의하여 조견표 (Look-up Tables; LUTs)를 작성하였으며, 이 조견표를 이용하여 GOCI 자료로부터 황사에 대한 AOT를 결정하게 된다. 그림 2는 조견표의 한 사례로서, 주어진 기하조건하에서 AOT와 GOCI가 관측하는 이론적인 복사량과의 관계를 나타낸다. 조견표 작성을 위한 복사전달모델은 Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer (SBDART) (Richiazzi *et al*., 1998)를 사용하였다. SBDART는 평행-평면 (plane-parallel) 복사전달 기법과 구분종좌표법 (discrete ordinate method)을 사용하는 포트란 코드로서 지표와 대기의 조건에 따라 자외선-가시광선-적외선 영역에서의 복사량을 모의할 수 있다. SBDART의 에어러솔 특성 변수의 입력자료로서는 Optical Properties of Aerosols and Clouds (OPAC) (Hess *et al*., 1998) 대기 에어러솔 모델이 사용되었다. OPAC 모델은 10가지 대기 에어러솔의 조성에 따른 미세물리정보와 미리 계산된 광학특성값을 아스키 형태로 제공한다.

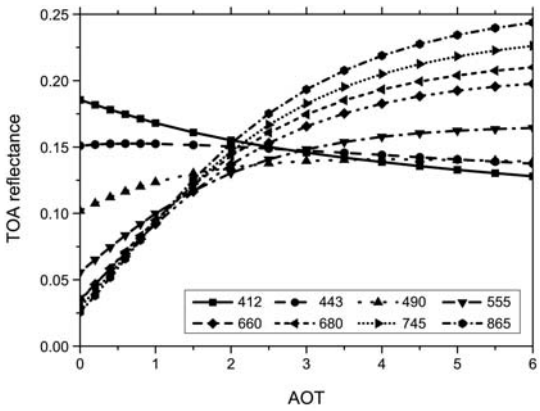

Fig. 2. Example of look-up table for aerosol retrieval from GOCI observed spectral reflectance data (sun zenith angle=30°, satellite view angle=30°, relative azimuth angle=60°, surface mode=ocean bidirectional reflectance model).

2. 2 CALIOP 에어러솔 연직분포

CALIPSO 위성은 2006년 4월 28일 미국 반덴버그 공군기지에서 Boeing Delta 로켓에 실려 발사되었다. CALIPSO 위성은 대기 관측용 the Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization (CALIOP) 라이다와 3채널 적외선 복사계, 그리고 광각 카메라가 탑재되어 있다. 이 중 CALIOP은 다이오드 ND: YAG 레이저를 사용하여 두 개의 파장(1,064 nm와 532 nm)에서 편광된 레이저 빔(펄스 에너지: 110 mj, 펄스 주기: 20.25 Hz, 빔 폭: 지상에서 약 70 m)을 지구로 방사하며, 감지기에서는 532 nm 파장대에서만 편광신호를 분리한다(Winker *et al*., 2007). CALIOP은 대기 관측용 라이다로서 대기 에어러솔 관련 분야뿐만 아니라 다양한 기상 분야에 그 활용도가 증가하고 있다.

CALIOP이 수신하는 레이저 빔의 후방산란 신호는 1차 보정된 원시 레이저 신호인 Level-1로 저장되며, 원시 레이저 신호로부터 구름과 에어러솔에 대한 정보를 추출한 Level-2 자료로 가공된다. 본 연구 사용된 CALIPSO Level-2 5KM Aerosol profile (CAL2_5KM_Apro) (version 3.02) 자료는 위성 궤도의 각 격자에서 수평해상도 5 km를 가지는 에어러솔의 광학특성값 (후방산란계수, 에어러솔 소산계수, 편광소멸도, 에어러솔 광학두께 자료 등)을 제공한다. CAL2_5KM_Apro 자료는 NASA Langley Research Center의 The Atmospheric Science Data Center (ASDC) (http://eosweb.larc.nasa.gov)에서 연구대상지역과 기간을 검색하여 해당 자료를 획득하였다.

기본적으로, CALIOP과 같은 라이다가 관측하는 자료 중 편광소멸도(Depolarization ratio; DPR)는 대기 중 입자(에어러솔 또는 대기분자)의 모양과 크기, 조성에 따라 달라지게 되는 총 후방산란 에너지의 수직($\beta_{\perp}$)과 수평($\beta_{\parallel}$) 성분 비율이다. 비구형 먼지입자가 에어러솔 층에 포함되어 있을 경우 약 0.1 이상의 DPR 값을 가지며, 이에 반해 완전한 구형 입자는 0.1보다 작은 값을 가진다(Noh *et al*., 2011). 본 연구에서는 비구형 입자인 황사에 대한 특성 분석을 위하여, 대기 중 모든 입자의 특성을 반영하는 체적 편광소멸도 (Volume Depolarization Ratio; VDR)와 에어러솔 입자에 대한 특성만을 반영하는 입자 편광소멸도(Particulate Depolarization Ratio; PDR)를 계산하였다. VDR과 PDR은 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$VDR=\frac{\beta_{\perp}}{\beta_{\parallel}}=\frac{\beta_{\perp,p}+\beta_{\perp,m}}{\beta_{\parallel,p}+\beta_{\perp,m}} \quad (4)$$

$$PDR=\frac{\beta_{\perp,p}}{\beta_{\parallel,p}}=\frac{\beta_{\perp}\exp[2(S_a\beta_p+\alpha_m)]-\frac{\delta_m}{1+\delta_m}\beta_m}{\beta_{\parallel}\exp[2(S_a\beta_p+\alpha_m)]-\frac{\delta_m}{1+\delta_m}\beta_m} \quad (5)$$

여기서, β는 라이다가 수신하는 후방산란 신호이며, 아래첨자 p와 m은 각각 에어러솔과 대기 분자를 의미한다. S_a는 소산-후방산란 비율인 라이다 비, α_m과 δ_m는 각각 대기 분자에 의한 소산계수와 DPR이다.

3. 결과 및 고찰

3. 1 2011년 5월 황사의 장거리 이동

천리안 위성이 성공적으로 발사된 이후, 2011년~2012년 동안에 황사현상이 매우 드물게 관측되었다. 실제로 기상청 기록에 의하면, 2011년에는 8일, 2012년에 1일이 관측되었다[http://www.kma.go.kr/weather/asiandust/observday.jsp]. 이 중 2011년 두 번째로 발생한 황사현상은 4월 29일 대륙의 건조사막지역에서 강한 저기압(중심기압=약 990 hPa)에 의하여 생성된 강한 기압차로 인하여 시작되었다. 그리고 4월 30일과 5월 2일 사이에 저기압이 만주와 동해상을 통과하면서 황사구름은 저기압의 후면에 형성된 등압면을 따라 이동하였다.

그림 3은 2011년 4월 30일부터 5월 2일 기간에 발생한 황사현상에 대하여 GOCI RGB Maker Version 1.0 (Lee, 2013)로 제작된 매 시간별 GOCI 관측 자료에 대한 칼라합성 영상이다. 저기압 중심부가 위치한 만주와 동해 전 지역, 그리고 남한에 걸쳐 짙은 구름이 존재하고 있으나, 중국 산동 반도로부터 서해에 걸쳐 있는 황색 영역은 황사가 위치한 영역이다. 기존의 저궤도 위성(예: MODIS, SeaWiFS, GMS 등)이 하루 1~2회 영상자료를 제공하는 것과는 달리, GOCI 영상자료는 매 시간별로 영상자료를 제공함으로서 황사현상에 대한 이동현상을 보다 가시적으로 표현할 수 있는 큰 장점이 있다.

그림 4에서는 GOCI 자료로부터 AOT값을 도출한 결과로서 황사가 짙은 영역(그림 3에서 황색영역이 강한 지역) 에서는 AOT 값이 약 2~5 정도로 매우

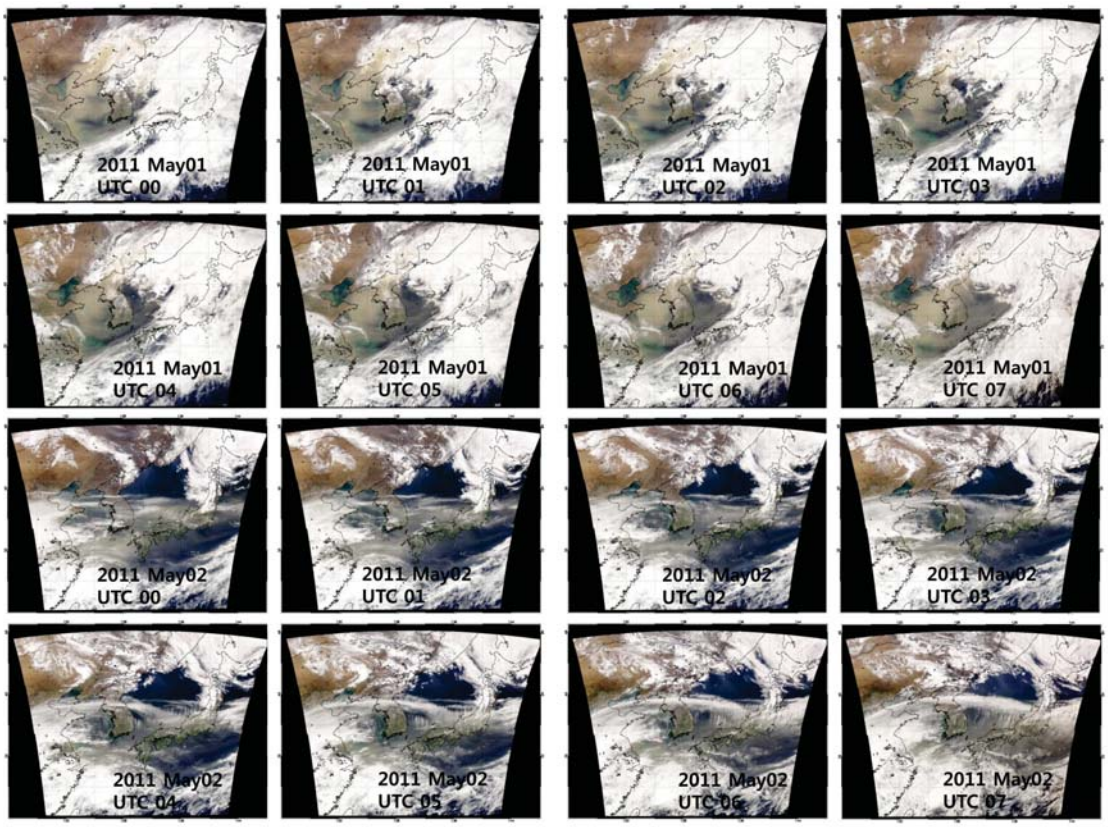

Fig. 3. GOCI RGB color composite images by GOCI RGB maker for Asian dust event period 1～2 May 2011, UTC 00-07.

큰 값을 나타낸다. 이 당시 중국 Xianghe (116.57°E, 39.45°N, PI: Dr. Pucai Wang & Dr. Xiangao Xia)와 서울 연세대 (126.56°E, 37.33°N PI: Prof. Jhoon Kim)의 AERONET suhphotometer (http://aeronet.gsfc.nasa.gov)로 관측된 AOT 값은 약 1.5～2.0 정도의 값을 기록하였으나 이는 황사의 가장자리 영역이 위치한 곳으로서 GOCI AOT가 1.0～2.0의 값을 가지며 서로 비슷한 값을 나타냈다. 그리고 AOT 값이 존재하지 않는 지역은 구름이 존재하거나 해양에서의 반사도 값이 크게 나타남으로 인하여 영상자료처리 과정에서 제거된 픽셀 영역이다.

GOCI 자료에 나타난 황사 구름은 편서풍과 저기압의 이동에 따라 이동을 하고 있는 것으로 나타났다. 즉, 저기압 후면에서 원형으로 이동하는 형태를 보임과 함께 동진하고 있어 황사의 영역이 재빨리 태평양으로 이동하지 않고 한반도 주변으로 남동진하고 있었다. 그림 5의 왼쪽 결과는 2011년 5월 1일 GOCI AOT 결과 중 UTC 03시와 UTC 06시를 비교한 것으로 황사영역이 남하하고 있는 것을 증명한다. 황사 영역의 이동 속도를 추정하기 위하여 AOT값이 3보다 큰 지점을 황사영역의 경계로 설정하였다. 예를 들어, 검정색 쇄선으로 나타내낸 지점은 UTC 03시에 동경 124.5°에 위치하며, 3시간 후인 UTC 06시엔 동경 125.2°에 위치한다. 이 차이는 경도 0.7°이므로 중위도에서 0.7°는 약 70 km 정도의 거리이므로 황사의 이동속도는 약 70 km/3 hr=23.3 km/hr=6.5 m/sec으로 계산된다.

이 결과의 정확도를 판단하기 위하여 NOAA NCEP /NCAR Reanalysis 1 (Kalnay *et al*., 1996) 자료 중 바람 벡터와 비교하였다. 그림 5의 오른쪽 결과는 2011년 5월 1일 UTC 06시의 700 mb (고도 3 km)와 850 mb (고도 1.5 km)에서의 수평바람벡터이다. 황사영역

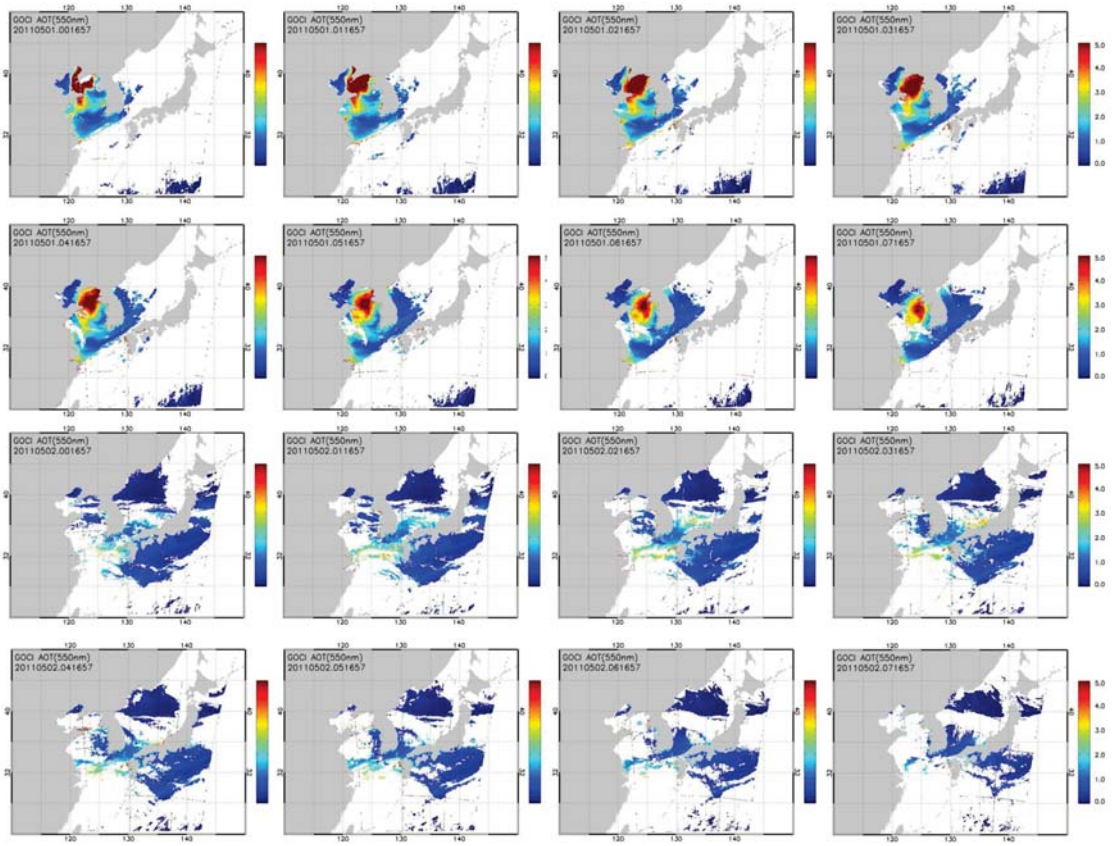

Fig. 4. GOCI retrieved AOT at 550 nm for Asian dust event period 1～2 May 2011, UTC 00-07.

이 위치한 지점에서의 NCEP 바람벡터 자료는 약 6.5 m/sec (700 mb)와 4.0 m/sec (850 mb)로서 GOCI AOT로부터 계산한 황사의 이동속도가 700 mb에서의 NCEP 바람벡터와 같은 결과를 얻었다. 이와 같은 결과로부터 정지궤도 GOCI 위성영상자료로부터 황사의 양적 규모와 수평적 분포 형태, 그리고 이동속도와 방향까지도 파악할 수 있었다.

3. 2 황사의 연직 광학특성

2011년 4월 30일～5월 2일에 발생하였던 황사 사례에 대하여 CALIOP 관측 자료를 분석하였다. 그림 6은 황사 발생 기간 중 유효한 CALIPSO 위성의 이동 경로와 각 경로별로 분석된 에어러솔 소산계수와 PDR의 연직분포를 나타낸다. CALIPSO 위성의 경로가 황사 영역을 통과하게 되면 황사에 대한 단면 구조를 파악 할 수 있다.

그림 6의 에어로졸의 소산계수 분포는 중앙의 CALIPSO 위성이 통과한 경로를 따라 관측된 결과로서, 에어러솔이 존재하는 경우 소산계수의 값이 커짐으로 인하여 고도별 에어러솔의 농도 분포를 간접적으로 유추할 수 있다. 이 결과로부터 4월 30일에는 중국 베이징 인근 지역에 고도 약 4 km 이하에 강한 황사영역이 존재함을 알 수 있다. 그리고 5월 1일에는 황사 구름이 동쪽으로 이동을 하여 서해-한반도-동해 일부 지역에 위치하였으며, 이 때 CALIPSO는 동해상공을 통과하였다. 당시 황사는 전날보다 고도가 내려간 3 km 이하에서 발견되었다. 이와 같은 결과는 앞서 GOCI AOT 분석결과와 일치한다. 5월 2일에는 황사구름이 좀더 동쪽으로 이동을 하여 동해-일본에 걸쳐있었으며, 북해도 남쪽의 약한 황사층은

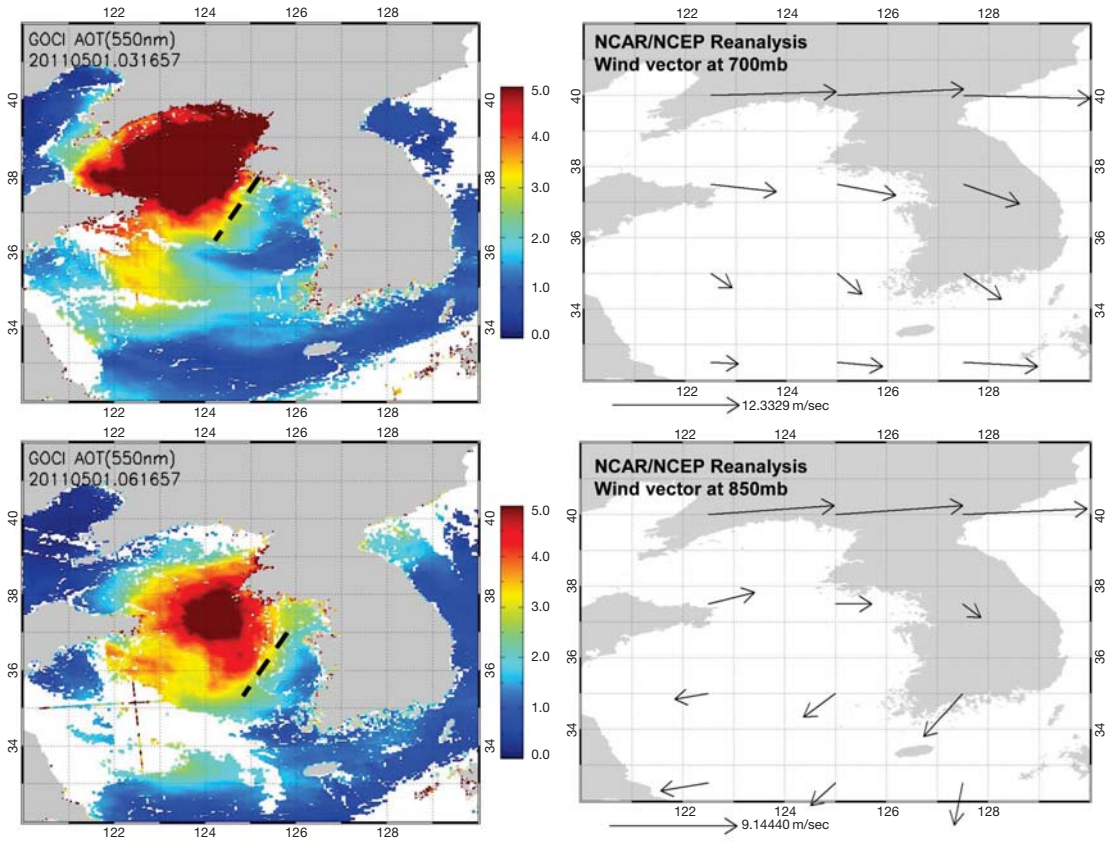

Fig. 5. Selected GOCI AOT images of Fig. 3 for 1 May 2011 (left column). Black dashed line represents the location of boundary of Asian dust plume (AOT>3.0). The southeastward shift of the dust plume between two GOCI observations taken 3 hours apart is about 70 km corresponding to wind speed of 20~23 km/hr. The NCEP wind vectors for that day were 6 m/sec and 4 m/sec for 700 mb (height=3 km) and 850 mb (height=1.5 km).

약 1 km 이하의 지표에 위치하고 있다. 그러나 서쪽에는 다른 황사층이 존재하였으며, 산동반도 인근에서 관측된 결과에서는 3 km 이상과 1 km 이하에서 강한 에어러솔에 의한 신호가 관측되었다. 표 2에 황사의 각 CALIPSO 궤도별로 관측된 황사층에 대한 평균 고도 자료를 나열하였다. 그러나 이 결과는 고도별 에어로졸의 존재에 관한 정보만을 제공하고 에어러솔의 종류에 따른 정보를 포함하고 있지 않으므로 다른 물리량을 통하여 분석을 해야 한다.

그림 6의 PDR 값 결과로부터는 에어러솔 층에 대한 비구형도를 나타내므로, 손사계수 결과로부터 에어러솔의 강도를 확인한 후, 에어러솔 중 비구형 입자인 황사가 어느 정도 포함되어 있는가에 대한 정보를 획득할 수 있다. 본 연구결과에서는 에어러솔 소산계수가 높게 나타난 고도의 영역에서 PDR은 약 0.25 이상의 값을 보인다. 기존의 지상 관측 연구결과에 설명한 것처럼 비구형 입자가 존재하는 경우 PDR 값이 약 0.1 이상의 값을 보이고 있으며, 본 연구의 CALIPSO PDR 값도 상대적으로 높은 값을 나타내고 있다(Shin *et al*., 2012; Noh *et al*., 2011, 2007; Shimizu *et al*., 2004; Sakai *et al*., 2003). 이러한 결과는 비구형 황사입자가 에어러솔 층에 포함되어 있음을 증명한다. CALIPSO가 한반도 주변을 통과한 시간대에 PDR 값은 5월 1일 동해에서 0.29, 5월 2일 서해와 북태평양 지역에서 각각 0.23, 0.17로 분석되었다. 따라서, 위성 탑재 라이다 관측자료에서도 대기

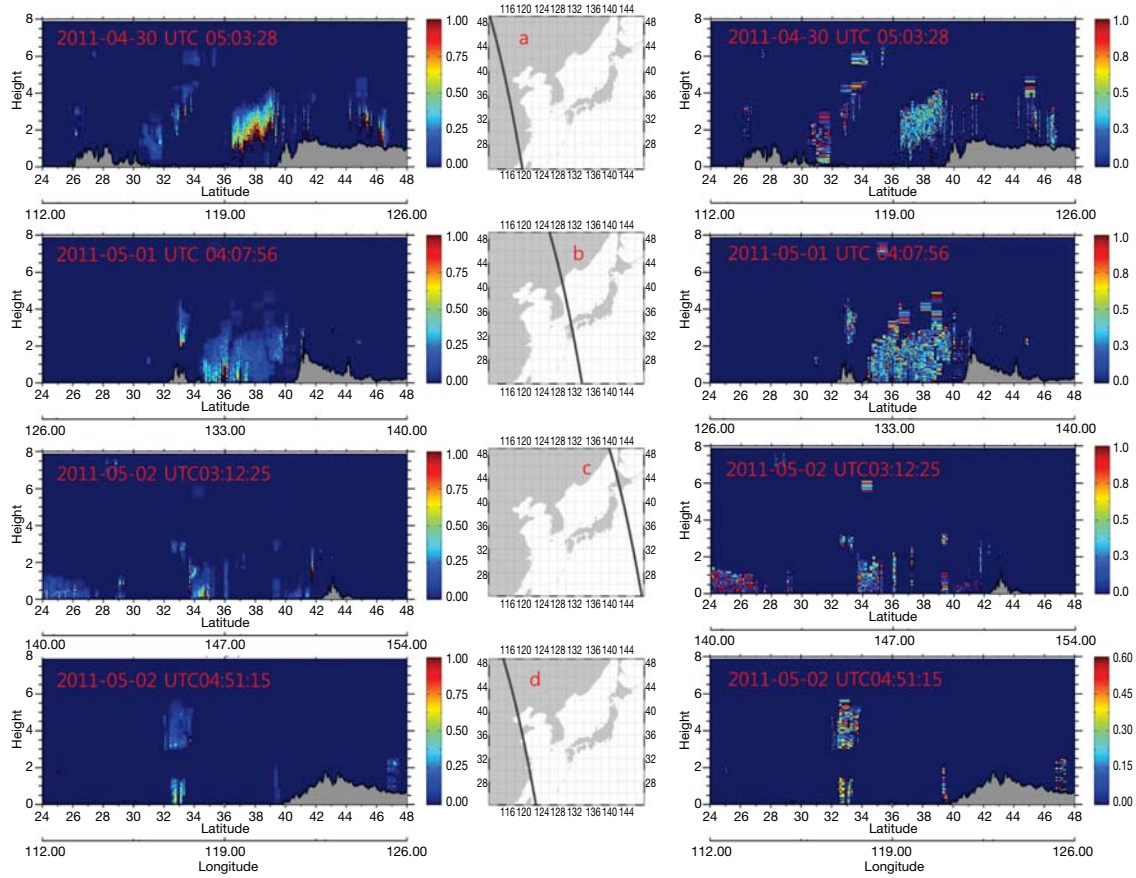

Fig. 6. Available CALIPSO observed extinction coefficients at 532 nm (left column), orbits (middle column), and particulate depolarization ratio (PDR) at 532 nm (right column) during 2011 May Asian dust event. Labels of the corresponding orbits are: a=2011-04-30T05-03-28, b=2011-05-01T04-07-56, c=2011-05-02T03-12-25, and d=2011-05-02T04-51-15, respectively.

중 비구형 황사 입자에 대한 충분한 관측이 가능함을 증명하였다.

4. 요약 및 결론

1970년대 이후로 지구관측 인공위성은 광역 대기 감시라는 훌륭한 수단이 되어 왔으며, 센서기술의 발달과 자료처리 능력의 발달로 사용영역이 증가하고 있다. 일반적인 저궤도 위성이 하루에 1~2회 관측 자료를 생산할 수 있는 데 반하여, 정지궤도 위성은 특정 관측지점을 연속 관측할 수 있는 장점이 있다. 그리고 영상자료만 제공하는 수동형 위성센서와는 달리 대기중으로 직접 레이저를 조사하여 대기 성분의 연직구조를 파악할 수 있는 능동형 센서를 이용한 분석자료는 황사와 같은 다중 층을 가지는 에어러솔의 연직구조를 파악하는 데 중요한 수단이 되고 있다. 본 연구에서는 세계최초의 정지궤도 해색 센서인 천리안 위성의 GOCI 자료를 이용하여 2011년 5월에 발생한 황사현상에 대한 수평적 공간 분포 및 장거리 이동특성과, 위성탑재 라이다인 CALIOP 자료로부터 황사에 대한 연직 광학특성 구조를 분석하였으며, 표 2에는 위성자료와 기상조건에 대한 결과를 요약하였다.

Table 2. Characteristics of Asian dust layer. Values were spatially averaged for rectangular region of 32°E～42°E and 120°N～130°N.

Date (dd mm yyyy)	Hour (UTC)	AOT	Dust top height (km)	Total Backscatter (Mm^{-1})	Extinction (km^{-1})	PDR	Wind speed (m/sec)	Wind direction (degree)
1 May 2011	00	2.82					23.09	295.22
1 May 2011	01	2.56						
1 May 2011	02	2.59						
1 May 2011	03	2.54						
1 May 2011	04	2.48	3.74	5.02	0.18	0.29		
1 May 2011	05	2.42						
1 May 2011	06	2.36					19.23	314.72
1 May 2011	07	2.30						
2 May 2011	00	0.99					10.85	301.30
2 May 2011	01	1.09						
2 May 2011	02	1.14						
2 May 2011	03	1.19	2.06	4.87	0.19	0.17		
2 May 2011	04	1.23						
2 May 2011	05	1.24	4.07	3.87	0.17	0.23		
2 May 2011	06	1.23					6.79	286.71
2 May 2011	07	1.21						

정지궤도 위성인 천리안 GOCI 자료로부터 도출된 황사의 AOT 분석결과는 황사 영역에 대한 공간적 분포 정보를 기존의 저궤도 위성 관측자료보다 시간적 해상도(매 시간별 자료 생성)와 공간적 해상도(약 500 m의 픽셀)가 높은 관측 결과를 상세하게 얻을 수 있었다. 그 결과, 5월 1일 서해상에서 관측된 황사의 중심영역에서 최대 5.0 이상의 AOT 값을 보이는 강력한 황사영역이 존재하였으며, 황사 경계면의 순간 이동 속도는 약 23.3 km/hr 를 가지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 추후 GOCI 위성영상으로부터 황사에 대한 이동 벡터를 결정하는 알고리즘 개발의 기본자료로 활용할 예정이다. 그리고 추가 연구로서, 현재 GOCI AOT를 육상에서도 분석할 수 있는 알고리즘이 개발될 것이다.

또한, 본 연구에서는 CALIPSO 위성의 탑재 라이다인 CALIOP 관측 자료 중 에어러솔 소산계수와 PDR의 분석을 통해, 황사 영역에 대한 연직 구조에 대한 정보와 에어러솔 입자에 대한 비구형성을 정량화하였다. GOCI 관측 기간과 동일한 황사 발생 기간 동안에 황사의 영역을 통과하는 CALIPSO 위성의 궤도 자료를 수집하여 분석한 결과, 황사 층은 고도 약 4 km 이하에서 분포하고 있었으며, 소산계수 값은 약 0.3～0.8 km^{-1}의 값을 나타내었다. 그리고 황사가 존재하는 에어러솔 층에서는 약 0.2～0.4의 높은 PDR 값을 보였으며, 이는 전형적인 비구형 입자의 특성을 반영하는 황사 층이 존재함을 증명하였다. 기존의 지상관측 라이다로 분석한 결과와 마찬가지로 CALIPSO 관측 결과는 황사 영역에 대한 PDR 값의 정보를 제공하였으며, 이러한 결과는 혼합 상태의 에어러솔 층이 존재하는 경우, 황사와 비황사 입자에 대한 비율을 결정지을 수 있는 단서로 활용할 수 있다. 따라서, 향후 연구에서는 CALIPSO 위성 자료에 적합한 알고리즘을 개발하여 황사/비황사 혼합비율 및 입자의 미세물리적 특성을 분석함과 동시에 혼합정도에 따른 미세물리적 특성을 역분석 모델(Inverse modeling) 으로부터 분석할 필요가 있다. 그리고 정지궤도 위성과 라이다 탑재 위성을 이용한 분석 결과는, 황사의 발원지와 장거리 이동 중에 황사영역의 변화 및 혼합 상태에 따른 광학적 미세물리적 특성을 정량화 하는데 큰 기여를 할 것으로 예상된다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부 소관 연구개발사업인 “정지궤도 해양위성(GOCI)활용연구 지원사업” 및 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2012-7080) 지원을 받아 수행되었습니다. 본 연구를 위하여 GOCI자료를 제

공해주신 해양과학기술원 해양위성센터와 CALIPSO 자료를 제공해 주신 NASA Langley research center, 그리고 AERONET database 자료를 제공해주신 연세대, Xinghe 관측소 PI님들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

Arimoto, R., Y.J. Kim, Y.P. Kim, P.K. Quinn, T.S. Bates, T.L. Anderson, S. Gong, I. Uno, M. Chin, B.J. Huebert, A.D. Clarke, Y. Shinozuka, R.J. Weber, J.R. Anderson, S.A. Guaz-zotti, R.C. Sullivan, D.A. Sodeman, K.A. Prather, and I.N. Sokolik (2006) Characterization of Asian dust during ACE-asia, Global Planet, Change, 52, 23-56.

Carlson, T.N. and S.G. Benjamin (1980) Radiative heating rates for Saharan dust, J. Atmos. Sci., 37, 193-213.

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, J. Geophys. Res., 108(D23), 8650, doi:10.1029/2003JD003405.

Claquin, T., M. Schulz, Y.J. Balkanski, and O. Boucher (1998) Uncertainties in assessing radiative forcing by mineral dust, Tellus B, 50, 491-505.

Gong, W., Z. Zhu, P. Li, Q. Qin, Z. Hao, M. Liu, and Y. Ma (2006) Mobile aerosol Lidar for earth observation atmospheric correction, 2006 IEEE International Sensing Symposium Geoscience and Remote, 1126-1129, doi:10.1109/IGARSS.2006.291.

Hess, M., P. Koepke, and I. Schult (1998) Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC, B. Am. Meteorol. Soc., 79, 831-844.

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 2001IOP at Gosan, Jeju Island, Korea, Environ. Moni. & Assess., 92, 43-57.

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, J. Geophys. Res., 108 (D23), 8633, doi:10.1029/ 2003JD003550.

Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K.C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jenne, and D. Joseph (1996) The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, Bull. Amer. Meteor. Soc., 77, 437-470.

Kang, G., P. Coste, H. Youn, F. Faure, and S. Choi (2010) An In-Orbit Radiometric Calibration Method of the Geostationary Ocean Color Imager, IEEE T. Geoscience and Remote Sensing, 48, 4322-4328.

Lee, B.-I., S.-C. Yoon, and Y. Kim (2008) Analysis of vertical profiles and optical characteristics of the Asian dust using ground-based measurements, Atmosphere, 18(4), 287-297. (in Korean with English abstract)

Lee, K.H. (2012) Aerosol direct radiative forcing by three dimensional observations from passive- and active-satellite sensors, Korean J. of Atmos. Environ., 28(2), 159-171. (in Korean with English abstract)

Lee, K.H. (2013) Creating atmospheric scattering corrected true color image from the COMS/GOCI data, J. of the Korean Association of Geographic Information Studies, 16(1). 1-14 (in Korean with English abstract).

Lee, K.H. and Y.J. Kim (2010) Satellite remote sensing of Asian aerosols: a case study of clean, polluted and dust storm days, Atmos. Meas. Tech., 3, 1771-1784, doi:10.5194/amt-3-1771-2010.

Lee, K.H., D.H. Lee, and Y.J. Kim (2006) MODIS application of MODIS satellite observation data for air quality forecast, Korean J. of Atmos. Environ., 22(6), 851-862. (in Korean with English abstract)

Lee, K.H., J.E. Kim, Y.J. Kim, and J. Kim (2004) Impact of the smoke aerosol plume from Russian forest fires on the atmospheric environment over Korea during May 2003, Korean J. of Atmos. Environ., 20(5), 603-613. (in Korean with English abstract)

Lee, K.H., J.H. Ryu, J.H. Ahn, and Y.J. Kim (2012) First retrieval of data regarding spatial distribution of Asian dust aerosol from the geostationary ocean color imager, Ocean Science Journal, 47(4), 465-472. DOI: 10.1007/s12601-012-0042-2.

Lee, K.H., Z. Li, Y.J. Kim, and A. Kokhanovsky (2009) Aerosol monitoring from satellite observations: a history of three decades, Atmospheric and Biological Environmental Monitoring, YJ Kim, U. Platt, MB Gu, H Iwahashi (Eds.), Springer, doi:10.1007/978-1-4020-9674-7_2, 13-38.

Meloni, D., A.D. Sarra, T.D. Iotio, and G. Fiocco (2005) Influence of the vertical profile of Saharan dust on the visible direct radiative forcing, J. Quant. Spectrosc. Radiat. T., 93, 497-413.

Murayama, T., N. Sugimoto, I. Uno, K. Kinoshita, K. Aoki, N.

Hagiwara, Z. Liu, I. Matsui, T. Sakai, T. Shibata, K. Arao, B.-J. Shon, J.-G. Won, S.-C. Yoon, T. Li, J. Zhou, H. Hu, M. Abo, K. Iokibe, R. Koga, and Y. Iwasaka (2001) Ground-based network observation of Asian dust events of April 1998 in East Asia, J. Geophys. Res., 106(D16), 18,345-18,359, doi:10.1029/2000JD900554.

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)

Noh, Y.M., Y.J. Kim, and D. Müller (2007) Retrieval of aerosol microphysical parameter by inversion algorithm using multi-wavnelength Raman lidar, Korea Society for Atmospheric Environment, 23(1), 97-109. (in Korean with English abstract)

Ricchiazzi, P., S. Yang, C. Gautier, and D. Sowle (1998) SBD ART: A research and teaching tool for plane-parallel radiative transfer in the Earth's atmosphere, Bull. Am. Meteorol. Soc., 79, 2101-2114, doi:10.1175/1520-0477.

Ryu, J.-H., H.-J. Han, S. Cho, Y.-J. Park, and Y.-H. Ahn (2012) Overview of Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) and GOCI Data Processing System (GDPS), Ocean Science Journal, 47(3), 223-233.

Sakai, T., T. Nagai, M. Nakazato, Y. Mano, and T. Matsumura (2003) Ice clouds and Asian dust studied with lidar measurements of particle extinction-to-backscatter ratio, particle depolarization, and water-vapor mixing ratio over Tsukuba, Applied Optics, 42(36), 7103-7116.

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, 109, D19S17.

Shin, S., D. Shin, K. Lee, and Y. Noh (2012) Classification of dust/non-dust particle from the Asian dust plumes and retrieval of microphysical properties using Raman Lidar System, Korean J. of Atmos. Environ., 28(6), 688-696. (in Korean with English abstract)

Wendisch, M., D. Müller, I. Mattis, and A. Ansmann (2006) Potential of lidar backscatter data to estimate solar aerosol radiative forcing, Appl. Opt. 45, 770-783.

Winker, D.M., W.H. Hunt, and M.J. McGill (2007) Initial performance assessment of CALIOP, Geophys. Res. Lett., 34, L19803, doi:10.1029/2007GL030135.

Yu, H., Y.J. Kaufman, M. Chin, G. Feingold, L.A. Remer, T.L. Anderson, Y. Balkanski, N. Bellouin, O. Boucher, S. Christopher, P. DeCola, R. Kahn, D. Koch, N. Loeb, M.S. Reddy, M. Schulz, T. Takemura, and M. Zhou (2006) A review of measurement based assessments of the aerosol direct radiative effect and forcing, Atmospheric Chemistry and Physics, 6, 613-666.

Zhang, X.Y., S.L. Gong, T.L. Zhao, R. Arimoto, Y.Q. Wang, and Z.J. Zhou (2003) Sources of Asian dust and role of climate change versus desertification in Asian dust emission, Geophys. Res. Lett., 30, 2272, doi:10.1029/2003GL018206, 24.