

수동형-능동형 위성센서 관측자료를 이용한 대기 에어러솔의 3차원 분포 및 복사강제 효과 산정

Aerosol Direct Radiative Forcing by Three Dimensional Observations from Passive- and Active- Satellite Sensors

이 권 호*

경일대학교 위성정보공학과

(2011년 12월 9일 접수, 2012년 1월 21일 수정, 2012년 3월 19일 채택)

Kwon-Ho Lee*

Department of Satellite Geoinformatic Engineering, Kyungil University

(Received 9 December 2011, revised 21 January 2012, accepted 19 March 2012)

Abstract

Aerosol direct radiative forcing (ADRF) retrieval method was developed by combining data from passive and active satellite sensors. Aerosol optical thickness (AOT) retrieved from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) as a passive visible sensor and aerosol vertical profile from the Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO) as an active laser sensor were investigated an application possibility. Especially, space-born Light Detection and Ranging (Lidar) observation provides a specific knowledge of the optical properties of atmospheric aerosols with spatial, temporal, vertical, and spectral resolutions. On the basis of extensive radiative transfer modeling, it is demonstrated that the use of the aerosol vertical profiles is sensitive to the estimation of ADRF. Throughout the investigation of relationship between aerosol height and ADRF, mean change rates of ADRF per increasing of 1 km aerosol height are smaller at surface than top-of-atmosphere (TOA). As a case study, satellite data for the Asian dust day of March 31, 2007 were used to estimate ADRF. Resulting ADRF values were compared with those retrieved independently from MODIS only data. The absolute difference values are 1.27% at surface level and 4.73% at top of atmosphere (TOA).

Key words : Satellite, Lidar, Aerosol, Radiative forcing

1. 서 론

대기중에서 에어러솔의 두 가지 중요한 역할로서,

에어러솔 입자가 직접적으로 태양광을 산란 또는 흡수하여 복사수지에 영향을 미치는 직접효과와 에어러솔이 구름 입자와 수 농도를 변화시키는 간접효과로 알려져 있다 (Albrecht, 1989; Twomey, 1977). 여기에 추가적으로 반 간접효과로 알려진 작용으로서 광 흡수성 에어러솔(주로 검댕이나 사막 먼지)이 대

*Corresponding author.

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

기중에서 태양광의 흡수로 인한 가열현상으로 구름의 증발을 증가시키기도 한다(Ackerman *et al.*, 2000). 이러한 에어러솔의 농도 분포는 주로 지상에서 발생하는 특성과 지구중력의 영향으로 지표면 근처가 가장 높고 고도가 높아질수록 감소하지만 장거리 이동성 에어러솔의 경우는 보다 복잡한 분포 양상을 가진다. 이러한 에어러솔의 연직분포는 복사강제 효과에 영향을 미치는 주요한 요인 중 하나이며(Zhu *et al.*, 2007; Claquin *et al.*, 1998), 먼지 폭풍으로 인한 에어러솔 레이어의 증가는 대기의 가열현상을 증가시킨다(Meloni *et al.*, 2005; Zhang and Christopher, 2003; Liao and Seinfeld, 1998; Carlson and Benjamin, 1980).

동북아시아 지역은 중국의 영향으로 발생하는 각종 오염성 에어러솔과 바이오매스 연소성 에어러솔(Lee *et al.*, 2004), 그리고 황사가 빈번하게 발생하고 있으며 전 세계적으로도 매우 중요한 에어러솔의 발생 지역이므로 이에 대한 지역적 복사강제 효과를 산정하는 것이 중요하다(Lee and Kim, 2010). 복사전달 과정에 있어 지표 알베도, 에어러솔 입자의 크기, 연직분포, 에어러솔 광학두께(Aerosol Optical Thickness; AOT 또는 τ), 단산란알베도(Single Scattering Albedo; SSA 또는 ω_0) 등은 대기권 및 대기권 최 상층부(Top of Atmosphere; TOA)에서의 순 복사 효과가 양의 값 또는 음의 값을 조절할 수 있는 주요 요소이다. 최근 중국 대륙에서 관측된 에어러솔의 단산란 알베도는 약 0.89 정도로 보고되었으며(Lee *et al.*, 2007), 이러한 정보를 바탕으로 산출된 에어러솔에 의한 복사강제효과로 인한 대기 가열률(heating rate)은 약 0.3~0.5°K/day임을 밝혔다(Li *et al.*, 2010). 그러나 이러한 결과는 지상관측망을 이용한 한정된 지점별 자료로서 지역적 특성을 대표하기엔 부족한 점이 있다. 따라서 에어러솔의 분포 및 복사강제 효과에 관한 특성을 연구할 수 있는 관측 기술의 필요성이 요구되며 인공위성관측 자료는 공간적인 한계를 극복한 훌륭한 수단이 되고 있으며(Lee *et al.*, 2009), 대기질 감시에 있어서도 중요하다(Lee *et al.*, 2006).

지구관측 인공위성은 운용 목적에 따라 다양한 형태와 성능을 가지고 있다. 대표적인 저궤도 지구관측 인공위성인 NOAA, TERRA, AQUA는 태양복사에너지 또는 지구복사에너지를 관측하는 수동형(Passive) 센서를 탑재하고 있으며, 대기 에어러솔을 관측함에 있어 주로 수평적 분포에 대한 자료를 산출한다. 그

리고 인공위성탐재용 능동형(Active) 센서를 탑재한 위성으로서, 2006년 4월 28일 미국 반덴버그 공군기지에서 Boeing Delta 로켓에 실려 발사된 Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO) 위성은 수평적인 분포 자료만 제공하던 기존의 방법에서 벗어나 대기 에어러솔의 연직분포에 대한 정보를 생산하고 있다(Winker *et al.*, 2007). CALIPSO 위성에 탑재된 장치 중 the Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization (CALIOP)은 대기 관측용 라이다(Lidar)로서 대기 에어러솔 관련 분야 뿐 만 아니라 다양한 기상 분야에 그 활용도가 증가하고 있다. 물론 기존에 라이다 장비를 보유한 국내 연구기관 및 대학에서도 지상에서 라이다 장비를 이용하여 대기 에어러솔의 연직분포를 분석한 사례가 있었다(Noh *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2008). 또한 지상에서 관측된 라이다 관측결과를 이용하여 복사강제 효과를 산정하거나(Wendisch *et al.*, 2006), 위성자료의 대기보정(Atmospheric correction)에 응용하기도 하였지만(Gong *et al.*, 2006), 공간적인 한계점을 극복하기에는 여전히 어려운 점이 있다.

기존의 복사강제 효과를 산정하기 위한 방법에는 여러 가지 가정된 값을 사용하여 단순히 에어러솔 광학두께를 변수로 취하는 방법(Zhang and Christopher, 2003), 실지 관측을 통한 에어러솔의 광학특성과 광학두께를 이용하는 법(Li *et al.*, 2010), 복사계(radiometer)를 이용한 직접 측정방법(Bush and Valero, 2003)이 널리 사용되고 있다. 첫 번째 방법은 에어러솔 광학특성에 대한 기후학(climatology) 또는 가정된 값을 기본으로 하여 에어러솔의 총량을 조절하는 변수인 에어러솔 광학두께 자료를 관측 값만 이용하게 되는데, 계산은 비교적 간단하나 정확도가 문제될 수 있다. 두 번째 방법은 에어러솔 광학 특성에 대한 관측자료의 사용으로 보다 근거 있는 복사강제 효과 자료를 획득할 수 있는 장점이 있으나 관측자료의 연속성과 공간적 한계점이 있다. 마지막으로 직접 관측방법은 가장 정확한 결과를 얻을 수는 있으나 관측 장비 운용과 공간적 한계점이 존재한다.

따라서 본 연구에서는 라이다 탑재 위성인 CALIPSO와 수동형 센서인 MODIS 관측자료를 이용하여 한반도 인근지역에서의 대기 에어러솔에 대한 공간 분포 및 광학적 특성 분석을 수행하여 기후변화와 관련된 복사강제 효과를 산정하는 방법을 제안하고

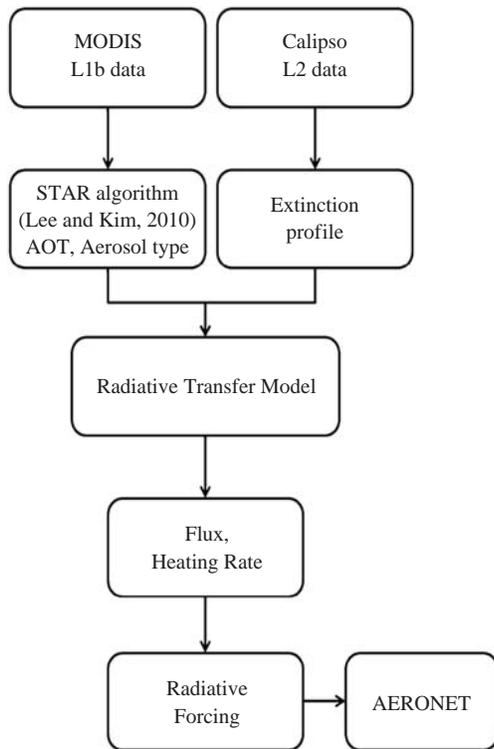


Fig. 1. Flow chart of data processing.

자 한다. 복사강제효과의 산정을 위하여 SBDART (Richiazzi *et al.*, 1998) 코드가 사용되었으며, 입력자료로서 MODIS와 CALIPSO 위성자료가 사용되었다. 두 위성관측 자료는 에어러솔의 수평적 요소와 수직적 요소를 제공해 주므로 에어러솔 복사강제효과를 보다 입체적으로 파악하는 데 도움이 된다. 또한 수동형과 능동형 위성센서와의 통합분석은 기존의 지상관측이 가지는 공간적인 한계점을 극복함으로써 인하여 보다 입체적인 에어러솔의 분포 특성의 분석에 유용할 것이다. 본 연구에서 제안하고 있는 인공위성 관측자료를 사용하는 방법의 경우 누구나 자료를 사용할 수 있어 경제적이고, 광역 관측 자료로서 지역별 특징을 잘 나타내고, 자동화된 분석 알고리즘을 통하여 자료의 생산이 용이하다는 장점이 있다. 그러나, 저궤도 위성의 경우, 하루 1~3회 정도만 한반도 인근지역 상공을 통과하므로 시간적 한계점이 존재하고, 공간적 자료의 크기가 크므로 자료의 전처리 과정이 많고, 위성자료는 측정(measurement)이 아닌

도출(retrieval)된 자료로서 도출 정확도가 최종 결과물의 정확도에 영향을 끼친다는 단점이 존재한다.

따라서, 본 연구에서도 보다 정확도를 향상시키기 위해 각 픽셀 별로 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 공간해상도를 가지는 MODIS 에어러솔 광학두께 자료(Lee and Kim, 2010)와 5 km의 공간해상도를 가지는 CALIPSO 에어러솔 프로파일 자료를 사용하였다. 에어러솔의 고도에 따른 복사강제 효과를 분석하기 위하여 황사현상이 보고되었던 2007년과 2011년에 사례를 대상으로 복사강제량 지도를 제작하였다. 본 연구에서는 한반도 인근 지역을 대상으로 대기 에어러솔의 복사강제 효과를 규명하기 위하여 수동형과 능동형 위성센서를 통합하여 복사강제 효과를 분석하는 방법을 제시하고자 하였다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서는 사용된 위성자료는 한반도를 포함하는 동경 $110 \sim 150$ 도와 북위 $20 \sim 50$ 도에 해당하는 지역을 통과하는 자료를 사용하였다. AQUA/MODIS와 CALIPSO의 관측시간이 약 75초 정도 차이가 나며 이 시간 동안에는 에어러솔의 큰 변화가 없다는 가정하에 두 영상을 사용하게 된다. 동일 시기별 MODIS와 CALIPSO 위성자료의 제작을 위해 AQUA/MODIS Level 1b Calibrated Radiance (Version 5.2, Collection 5) 영상과 CALIPSO Level 2 Aerosol Profile (Version 3.01) 자료를 각각 수집, 처리하였다. 여기서 사용된 MODIS 자료는 NASA의 MODIS 자료검색 및 저장 시스템(<http://laddswb.nasa.gov/>)에서 검색 후 FTP서버를 통해 수집하였다. CALIPSO 자료는 NASA의 Langley 대기과학 자료 센터(<http://eosweb.larc.nasa.gov/>)에서 검색 후 FTP 서버를 통해 수집하였다. 두 위성자료의 사용을 위하여 구름의 양이 최소이며, 에어러솔 플룸을 통과하는 사례를 선정하여 2007년 3월 31일의 황사현상에 대한 자료를 사례연구로 선정하였다.

수동형-능동형 위성자료를 이용한 복사강제 효과를 산정하기 위하여 그림 2와 같은 과정을 처리하였다. 우선, 전처리과정으로 위성자료에 대하여 연구대상 지역에 해당하는 정보만 추출하고 각 위성자료별 전처리 과정을 수행하게 되고, 이 결과물을 복사

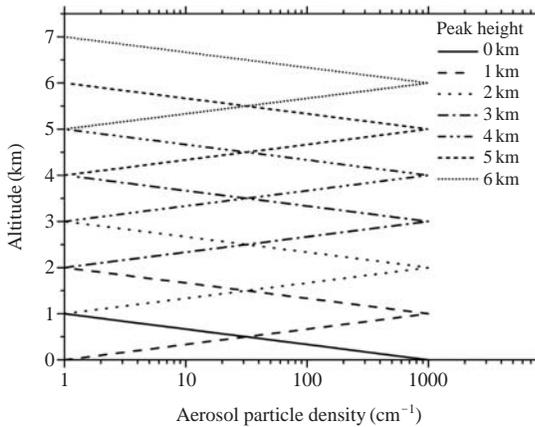


Fig. 2. Assumed vertical distributions of aerosol layers for the sensitivity study.

전달 모델의 입력자료로 복사전달모델을 수행하게 된다. 복사전달모델의 결과물로는 각 고도 별 복사 플러스와 가열도로서 자료처리 과정에 대한 상세 설명은 아래와 같다.

2.1 MODIS 에어러솔 광학두께

수동형 위성센서인 MODIS는 1999년에 발사된 TERRA 위성과 2001년에 발사된 AQUA 위성에 탑재되어 있으며 지상에서 700 km 떨어진 궤도를 돌면서 36개의 채널로 지구를 관측한다. NASA에서 제공하고 있는 현업용 에어러솔 광학두께 도출 알고리즘은 현재 Version 5.2 (Collection 5)까지 업데이트 되어 있으며 (Levy *et al.*, 2007) 정확도는 육지와 해양에서 각각 ±15%와 ±5%와 같이 알려져 있다 (Remer *et al.*, 2005). 그러나 MODIS 알고리즘은 공간해상도가 약 10 km로서 지역적 에어러솔 분포 특성에는 다소 적합하지 않다. 따라서 MODIS의 원시 관측 자료로부터 기인한 채널 별 복사량으로부터 지역적 특성을 고려한 알고리즘인 SaTellite Aerosol Retrieval (STAR) (Lee and Kim, 2010)을 이용하여 약 1 km의 해상도를 가지는 에어러솔 광학두께 자료를 생산하였다. STAR 알고리즘은 약 15%의 정확도를 가지고 있다. MODIS 위성자료는 식 (1)과 같은 복사전달 방정식을 사용하여 해석하게 된다.

$$\rho_{TOA} = \rho_{Aer} + \rho_{Ray} + \frac{T_o \cdot T_s \cdot \rho_{Surf}}{1 - a} \quad (1)$$

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_s 는 각각 태양과 위성경로에 대한 대기 투과도이며, a 는 반구 알베도 (Hemishperic Albedo)이다. 식 (1)에 의하면, 위성이 관측한 값으로부터 대기분자산란과 지표 반사도에 의한 영향을 제거하면 에어러솔에 의한 반사도 값을 산정할 수 있다. 에어러솔에 의한 반사도는 에어러솔 입자수에 대한 함수로서 에어러솔 입자의 광학특성에 따라 달라지게 된다. 그러므로 해당 지역에서 흔히 발견되는 에어러솔 입자의 광학적 특성을 고려하여 복사전달모델을 수행하여 에어러솔 반사도와 에어러솔 광학두께와의 관계표 (Look-up 표; LUTs)를 작성한다 (식 2). 여기서 얻어진 이론적인 에어러솔 광학두께와 에어러솔 반사도와의 관계는 위성으로 관측한 에어러솔 반사도를 이용하여 역으로 에어러솔 광학두께를 찾는 과정을 수행한다.

$$\tau = f(\rho_{Aer}) \quad (2)$$

그리고 이 과정에서 위성으로부터 획득한 에어러솔 반사도는 각 픽셀별로 주어진 태양과 위성에 대한 기하조건의 함수이므로 LUT도 이 조건에 맞는 조건을 찾아 에어러솔 광학두께로 전환하는 과정을 거쳐서 최종적으로 에어러솔 광학두께를 결정한다.

2.2 CALIOP 에어러솔 소산계수

CALIPSO 위성은 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 편광 된 레이저 빔 (펄스 에너지: 110 mJ, 펄스 주기: 20.25 Hz, 빔폭: 지상에서 70 m)을 지구로 방사하며, 감지기에서는 532 nm 파장대에서만 편광신호를 분리한다 (Winker *et al.*, 2007). 보다 자세한 장치적 특성과 자료목록은 CALIPSO 자료해설집 (<http://eosweb.larc.nasa.gov/PRODOCS/calipso/DPC/>)에서 얻을 수 있다.

CALIOP이 관측하는 레이저 신호는 1차적으로 보정되고 기하학적인 위치정보를 포함하는 Level-1 자료로 제공된다. Level-1 자료로부터 원시 레이저 신호로부터 구름과 에어러솔에 대한 정보를 추출한 Level-2 자료로 가공된다. 본 연구에서는 CALIPSO Level-2 Aerosol profile (version 3.01) 자료를 이용하였다.

이 자료는 각 격자별로 수평해상도 5 km를 가지는 에어러솔 광학특성값을 제공하며, CALIPSO 위성의 궤도에 대한 좌표값과 관측시간, 고도, 온도, 파장 별 후방산란계수와 에어러솔 소산계수, 에어러솔 광학두께 자료를 포함하는 총 57개의 자료를 포함하고 있다.

CALIPSO Level-2 에어러솔 광학 특성값 중에서 파장 532 nm에서의 에어러솔 소산계수자료가 본 연구에서 사용되었다. CALIPSO 에어러솔 소산계수는 약 0.02 km^{-1} 의 정확도를 가지는 것으로 보고되었다 (Kim *et al.*, 2008). 에어러솔 소산계수 (σ_{ext})는 에어러솔 입자에 의하여 소산되는 빛 에너지의 양을 상대적으로 나타내는 값으로 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\sigma_{\text{ext}}(\lambda) = \int_{r=0}^{r=\infty} \pi r^2 \cdot Q(r, \lambda, m) \cdot N(r) dr \quad (3)$$

여기서 r , m , λ , $N(r)$ 는 각각 에어러솔 입자의 반지름, 굴절률, 파장, 수농도이다. 라이다 관측을 통하여 고도 별 에어러솔 소산계수를 구할 수 있으며 전 대기층에 대하여 적분한 값은 에어러솔 광학두께와 같은 값이 된다. 또한, 식 (3)에 의하면 에어러솔의 수농도가 증가할수록 이 값은 커지므로 복사전달모델의 입력자료로서 에어러솔의 연직분포를 표현하기 위하여 사용된다.

2.3 복사전달 모델

에어러솔의 광학 특성 값은 복사 전달모델의 입력값으로 활용되어 위성센서가 측정하게 되는 복사량을 이론적으로 계산할 수 있다. 본 연구에서 사용된 복사 전달 모델은 Santa Barbara Disort Radiative Transfer (SBDART) (Ricchiuzzi *et al.*, 1998)로서, 복사 플럭스 계산을 위하여 필요한 입력 값은 다음과 같다. 파장 조건은 $0.2 \sim 4 \mu\text{m}$ 의 단파장 전체 영역을 지정하였고, 대기 조성은 US 표준대기 모델, 지표 알베도, 에어러솔 광학두께, 그리고 에어러솔 광학특성 모델과 연직분포 값이다. 이 중 에어러솔 광학두께는 수동형 센서인 MODIS 에어러솔 광학두께 값을 사용하였고, 에어러솔 연직분포는 CALIOP 관측자료에서 제공되는 에어러솔 소산계수에 대한 연직분포자료를 이용하였다. 각각의 모델 계산은 MODIS 위성 영상에서 구름의 영향이 없는 청천 영역에 대한 픽셀에 모두 적용되었다.

SBDART의 수행결과물은 사용자의 선택 사항으로서 각 고도 별 복사 플럭스를 계산할 수 있는 옵션을 선택하였다. 복사 플럭스의 단위는 단위면적당 입사하는 빛 에너지로서 W/m^2 이며 에어러솔에 의한 복사강제력 ($\text{ADRF}_{\text{TOA, Surf}}$)을 산출하기 위하여 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$\text{ADRF}_{\text{TOA, Surf}} = \Delta F_{\text{aerosol}} - \Delta F_{\text{non-aerosol}} \quad (4)$$

여기서 ΔF 는 어떤 고도에서 하향 복사량과 상향 복사량의 차이를 나타내는 순 플럭스 (W/m^2)이며 에어러솔에 의한 복사강제력은 에어러솔이 존재하는 경우와 에어러솔이 없는 경우(즉, $\text{AOT}=0$ 인 상태)와의 차이로 정해진다.

그리고 복사강제력을 산출하기 위하여 모델 입력값으로 사용된 인공위성자료의 정확도는 모델 계산 결과의 불확실도에 영향을 미친다. CALIOP의 경우 에어러솔 수직분포값이 모델에서는 상대적인 값으로만 사용되므로 절대오차값이 결과물에 영향을 미치지 않는다. 그러나 MODIS AOT는 복사강제력의 주요 변수요인이므로 위성자료가 가지는 정확도인 15%에 대하여 모델결과값에 미치는 영향을 알아보았다. 15%의 AOT 오차로 인한 복사 플럭스 값의 변화는 지표에서 $18 \sim 24 \text{ W}/\text{m}^2$, TOA에서 $3 \sim 9 \text{ W}/\text{m}^2$ 이고, 이 범위는 상대오차로서 TOA에서 0.4~1%, 지표에서 5.8%에 해당한다.

3. 민감도 실험

에어러솔의 연직분포는 복사전달과정을 이해하는데 중요한 요소로 알려져 있으므로 (Haywood and Ramaswamy, 1998), 에어러솔의 연직분포가 복사강제 효과에 미치는 영향을 파악하기 위하여 몇 가지 에어러솔의 연직분포의 경우를 가정하여 복사 전달 모델링을 수행하여 복사강제력을 이론적으로 계산하였다. 에어러솔 층의 구조는 그림 2와 같이 전체 약 2 km의 분포를 가지며 중심고도에서 최고농도를 가지는 형태로서, 고도 0 km부터 6 km까지 1 km 간격으로 7가지의 중심고도를 가지는 경우를 가정하였다. 에어러솔의 광학특성 모델은 황사모델을 선택하였는데, 여기서 사막 먼지 모델을 지표로 사용하는 것에는 두 가지 이유가 있다. 첫째, 사막먼지는 주로 장거

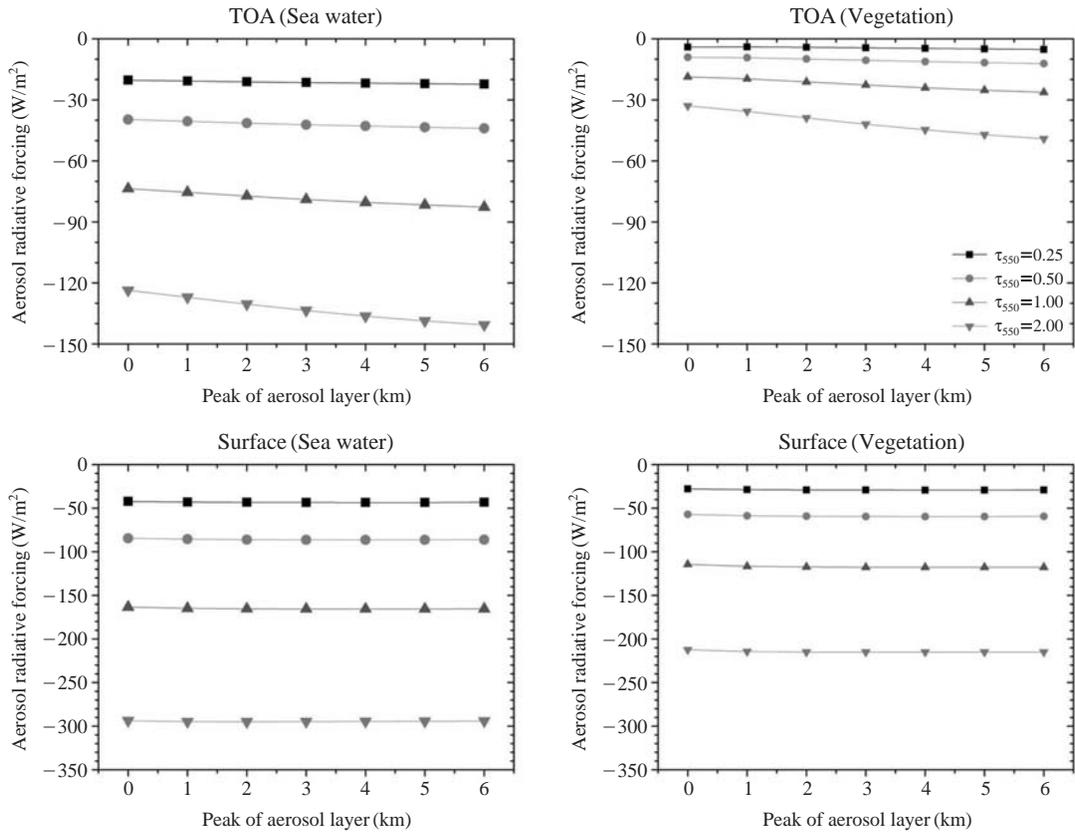


Fig. 3. Aerosol radiative forcing values as a function of the peak of aerosol layer(0 to 6 km). Other inputs to the SBDART are sun zenith angle=40, $\tau=0.25, 0.5, 1.0, 2.0$.

Table 1. Aerosol radiative forcing change due to increase of 1 km altitude. Unit of the number is W/m^2 and percentage in bracket.

Surface	$\tau=0.25$	$\tau=0.5$	$\tau=1.0$	$\tau=2.0$
Sea (SFC)	-0.20 (0.46)	-0.31 (0.37)	-0.37 (0.22)	-0.08 (0.03)
Sea (TOA)	-0.33 (1.55)	-0.72 (1.74)	-1.51 (1.95)	-2.83 (2.17)
Veg (SFC)	-0.21 (0.74)	-0.36 (0.63)	-0.53 (0.46)	-0.43 (0.20)
Veg (TOA)	-0.19 (4.28)	-0.52 (5.01)	-1.27 (5.90)	-2.70 (6.92)

Table 2. Averaged aerosol radiative forcing compared to aerosol layer at 0 km. Unit of the number is W/m^2 and percentage in bracket.

Surface	$\tau=0.25$	$\tau=0.5$	$\tau=1.0$	$\tau=2.0$
Sea (SFC)	-1.11 (2.63)	-1.75 (2.07)	-2.05 (1.25)	-0.87 (0.30)
Sea (TOA)	-1.25 (6.13)	-2.75 (6.92)	-5.76 (7.83)	-10.80 (8.74)
Veg (SFC)	-1.29 (4.64)	-2.15 (3.76)	-2.98 (2.61)	-2.55 (1.20)
Veg (TOA)	-0.54 (13.52)	-1.70 (18.69)	-4.53 (24.33)	-9.98 (30.31)

리 이동 시 고도가 높은 지점을 이동하므로 연직분포의 영향을 파악하는 중요한 잣대가 된다. 둘째, 황사와 같은 사막먼지는 광 흡수성이 높으므로 대기

온난화에 중요한 원인이 된다. 그리고 에어로솔 광학 두께에 대한 영향도 고려하기 위하여 $\tau=0, 0.5, 1.0, 2.0$ 의 값을 사용하였으며, 지표반사도에 대한 영향을

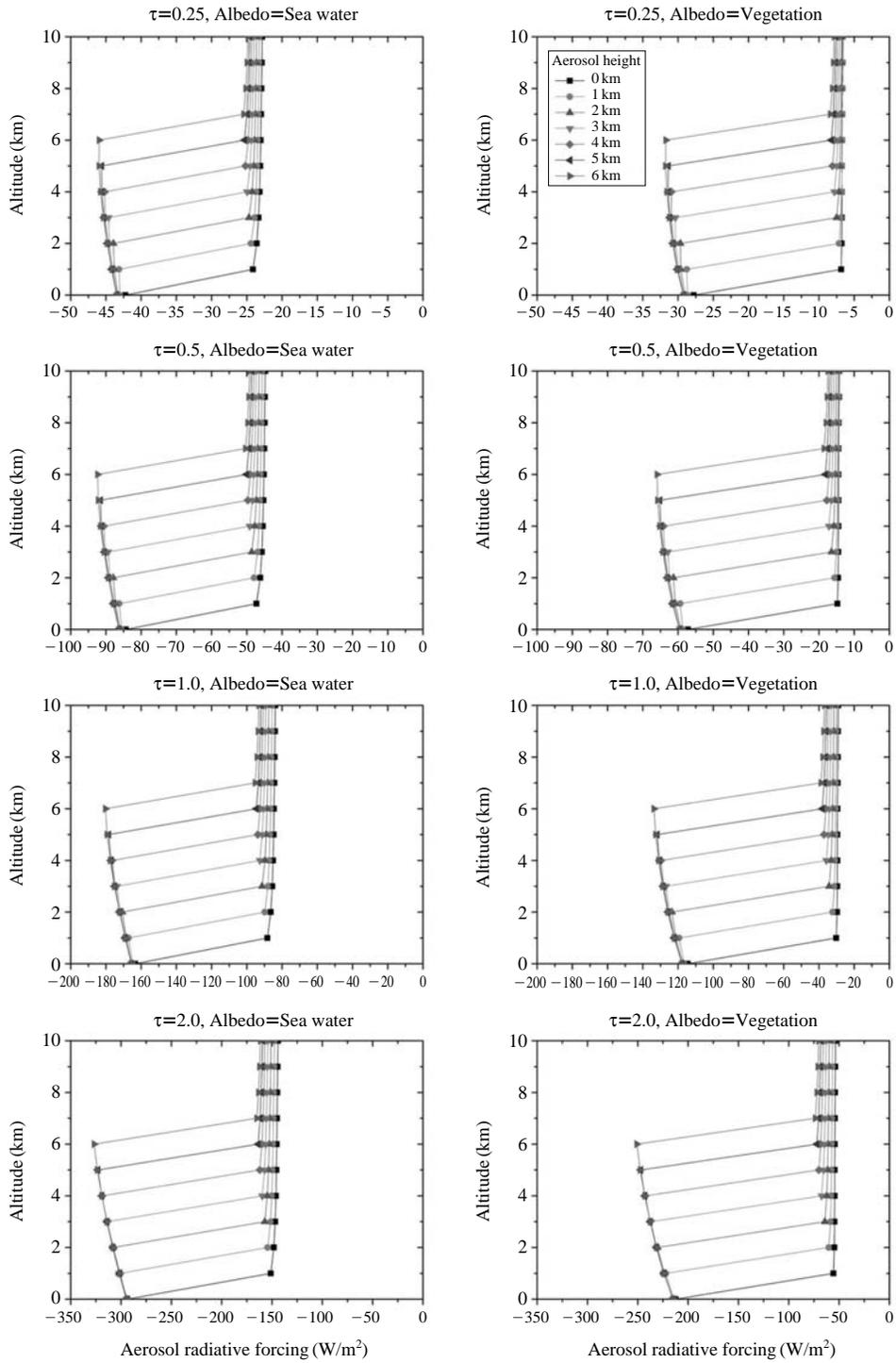


Fig. 4. Vertically resolved aerosol radiative forcing as a function of aerosol layer for different AOTs and surface albedos.

고려하기 위하여 육지와 해양을 대표하는 식생과 해수에 대한 알베도 모델을 이용하여 복사전달모델링을 수행하였다.

그림 3은 대기 최상층(Top of Atmosphere; TOA)과 지표에서의 에어러솔에 의한 복사강제 효과를 나타내며, TOA와 지표면에서 에어러솔에 의한 복사강제력은 모두 음의 값을 나타낸다. 이것은 에어러솔에 의하여 대기중에서 흡수된 태양 복사량으로 인하여 지표와 TOA에서 정상시보다 복사량이 줄어든 것을 의미한다. 그리고 에어러솔 광학두께값이 같은 경우(즉, 같은 양의 에어러솔이 존재하는 경우), 에어러솔 층의 고도가 증가할수록 복사강제력이 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 지표면에서의 복사강제력은 에어러솔의 고도에 영향을 적게 받는 것으로 나타났다. 표 1에서는 에어러솔 층의 고도가 1km씩 증가함에 따라 변하는 복사강제력이 식생에 대한 지표면에서는 0.5% 미만, 해수에 대한 지표면에서는 0.7% 미만으로서 적은 변화를 나타냈다. TOA에서는 이보다 큰 ~2% (해수)와 ~7% (식생)로 지표면보다 큰 변화를 보였다. 표 2에서는 에어러솔이 0km에 존재하는 경우와 다른 고도의 경우를 상대적으로 비교한 결과로서, 표 1에서처럼 에어러솔의 고도에 따른 차이는 지표보다 TOA에서 크게 나타났다. 이 차이는 식생의 경우 최대 30%까지도 달라질 수 있으며, 따라서 에어러솔 층에 대한 복사강제력의 민감도는 해양보다는 육지에서 더 크게 나타나며 지표면보다 TOA에서 더 크게 나타나는 것으로 예상된다.

에어러솔 레이어의 위치에 따라 복사강제력이 어떻게 변하는지 비교하기 위하여 그림 4와 같이 고도에 따른 복사강제력을 분석하였다. 일반적으로 복사강제력은 태양복사에너지가 에어러솔과 반응하기 시작하는 에어러솔 레이어의 최상부부터 점차 감소하기 시작하여 에어러솔이 가장 많이 위치한 중심고도에서 최저치를 나타냈으며, 에어러솔 층 아래로 갈수록 점점 줄어드는 경향을 나타냈다. 그리고 에어러솔 레이어가 증가할수록 TOA에서의 복사강제력은 작아지고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 결과가 나타나게 되는 원인은 대기중의 가스상 성분의 연직분포와 관련이 있다. 태양 복사 에너지의 흡수와 대기분자에 의한 Rayleigh 산란이 지표면 근처에서 최대로 나타나기 때문에 에어러솔 층이 지표면에 가까울수록 에어러솔에 의하여 소산되는 복사 에너지량이 상대적

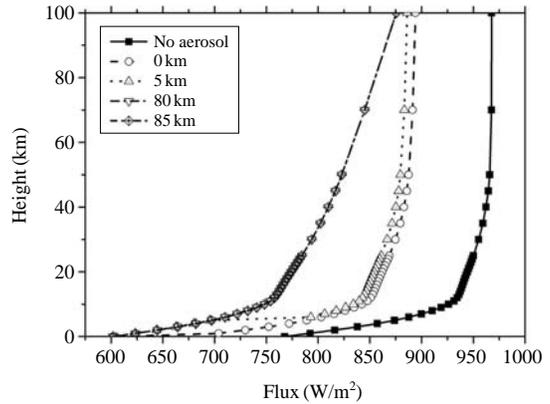


Fig. 5. Vertically resolved short wave net flux (downward-upward flux) calculated for four different aerosol heights. Inputs to the SBDART are sun zenith angle=40, $\tau=1.0$. No aerosol represent pure Rayleigh atmosphere ($\tau=0$).

으로 줄어들기 때문이다.

그림 5는 에어러솔의 위치가 복사 플럭스에 미치는 영향을 단적으로 보여준다. 에어러솔 이외의 대기 구성물질의 영향이 적은 80 km와 85 km의 고고도에서는 에어러솔의 고도에 따른 복사플럭스의 변화가 없지만, 대기 구성물질이 상대적으로 풍부한 저고도에서는 0 km와 5 km의 에어러솔 고도변화에 의한 복사플럭스의 변화가 상대적으로 커지게 된다. 따라서 대류권에서 에어러솔의 연직분포의 변화가 복사강제에 미치는 영향이 상대적으로 크게 나타남을 알 수 있다.

4. 결과 및 고찰

4.1 에어러솔 광학두께와 광 소산계수 연직분포

위성자료로부터 복사강제력을 분석하기 위하여 장기간의 관측 자료와 다양한 사례가 필요하나 본 연구의 범위를 벗어나므로, 비교적 에어러솔 플룸이 잘 나타나며 에어러솔의 고도가 높게 나타나는 경우, 동시에 에어러솔이 위치하고 있는 위성영상에서 구름에 의한 영향이 상대적으로 적게 나타나는 사례를 선정하였다. 선정된 사례로는 2007년 3월 31일 황사 현상이 발생한 사례에 대하여 위성관측자료를 분석하였다.

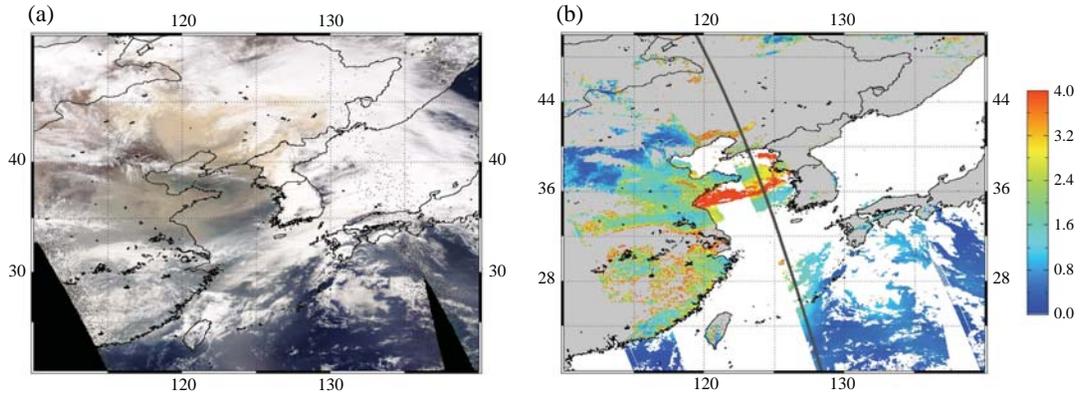


Fig. 6. (a) AQUA/MODIS color composite images and (b) AOT map on 31 March 2007. Calipso overpass orbit on the same day is shown as grey solid line in AOT map.

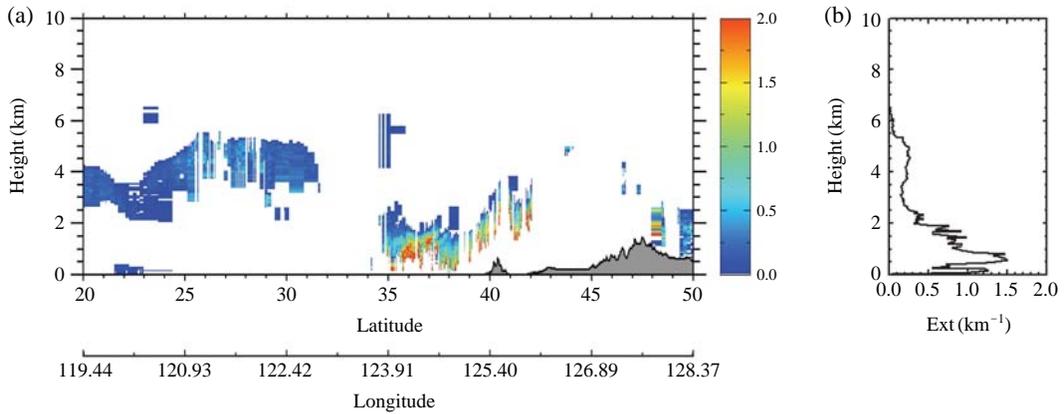


Fig. 7. (a) Aerosol extinction coefficient at 532 nm by CALIPSO overpass track as shown in Fig. 5(b) and (b) mean extinction profile on 31 March 2010.

그림 6은 2007년 3월 31일의 AQUA/MODIS 칼라 합성 영상과 STAR 알고리즘에 의한 에어리솔 광학 두께 결과를 보여준다. 그림 5a의 AQUA/MODIS 칼라 합성 영상에서는 만주와 동해 전 지역, 그리고 남한에 걸쳐 짙은 구름이 존재하고 있으나, 중국 산둥반도로부터 서해에 걸쳐 있는 짙은 황색 영역은 황사 에어리솔로 판단된다. 그림 6b에서는 AQUA/MODIS 자료로부터 에어리솔 광학두께값을 도출한 결과로서 황사에 대한 영역에서는 에어리솔 광학두께 값이 약 2~4 정도로 매우 큰 값을 보인다. 이 정도의 에어리솔 광학두께 값은 평상시보다 매우 큰 값으로 대기 중의 황사 입자로 인하여 태양광의 대부분이 소산되

고 있는 것과 같은 의미이다. 이 결과에서 에어리솔 광학두께 자료가 없는 지역은 구름이 존재하거나 해양에서의 sun-glint 효과로 인하여 제거된 픽셀 영역이다. 그리고, 동일한 날에 대하여 AQUA/MODIS의 후속으로 CALIPSO 위성이 통과한 궤도를 그림 5b에 회색선으로 표시를 하였다. 이 당시 CALIPSO 위성의 이동 경로는 황사의 영향이 잘 나타나는 서해상을 통과하여 황사 에어리솔에 대한 영역을 관측했음을 알 수 있다.

그림 7a에는 이때의 CALIOP 에어리솔 소산계수 자료를 나타낸 결과이다. MODIS 자료로부터 서해상의 황사영역으로 보이는 북위 35도와 40도 사이에서

에어러솔 소산계수값이 높게 나타나고 있으며 그 고도는 약 2km 이하에서 강하게 나타나며 약 1.5km에서 최대치를 보였다. 그러나 요동반도 북쪽 육지에서의 황사영역은 이보다 높은 약 4km 이하의 고도에서 나타나고 있다. 이러한 결과는 북동쪽에서 이동하는 황사가 해양을 통해 남쪽으로 이동하면서 점차적으로 고도가 낮아지고 있는 현상을 보여주는 것이다.

이렇게 에어러솔 층이 상승한 경우에 대하여 MODIS 위성영상에서 에어러솔 복사강제력을 산출하고자 할 때, 가정된 연직분포 자료를 복사전달 모델의 입력자료로 활용하는 것은 오차의 원인이 되는 것은 이전의 민감도 실험의 결과에서 언급하였다. 따라서 복사강제력의 산출 시 에어러솔의 양을 표현하는 수단인 에어러솔 광학두께와 함께 에어러솔 연직분포 역시 고려되어야 하므로 CALIPSO 에어러솔 소산계수 연직분포 자료를 이용하였으며 그 결과는 다음과 같다.

4.2 에어러솔 복사강제력

사례 연구에 대하여 복사강제력을 산출하고자 MODIS 에어러솔 광학두께 자료와 CALIOP 에어러솔 소산계수 연직분포 자료를 복사전달 모델의 입력자료로 활용하였다. CALIOP에서 제공되는 소산계수 연직분포 자료는 각 위치별로 다른 값을 가지게 되나, 본 연구에서는 연구대상 지역 전체에 대한 복사강제력을 산출하고자 그림 7b와 같이 해당영역에 대한 CALIOP 자료를 평균한 에어러솔 연직분포자료를 사용하였다. 사례 연구에서는 에어러솔의 상승고도가 주로 황사에 의한 것이며, 에어러솔 광학두께 값이 작은 지역은 고도에 의한 영향이 미비하므로 이러한 평균값을 사용하여도 큰 무리가 없다는 가정하에 복사강제력을 산출하였다. 그러나 에어러솔의 고도가 다르게 나타나는 경우에 대해서는, 에어러솔의 특성이나 기상조건에 의한 변수가 존재하므로 향후 연구에서 다룰 예정이다.

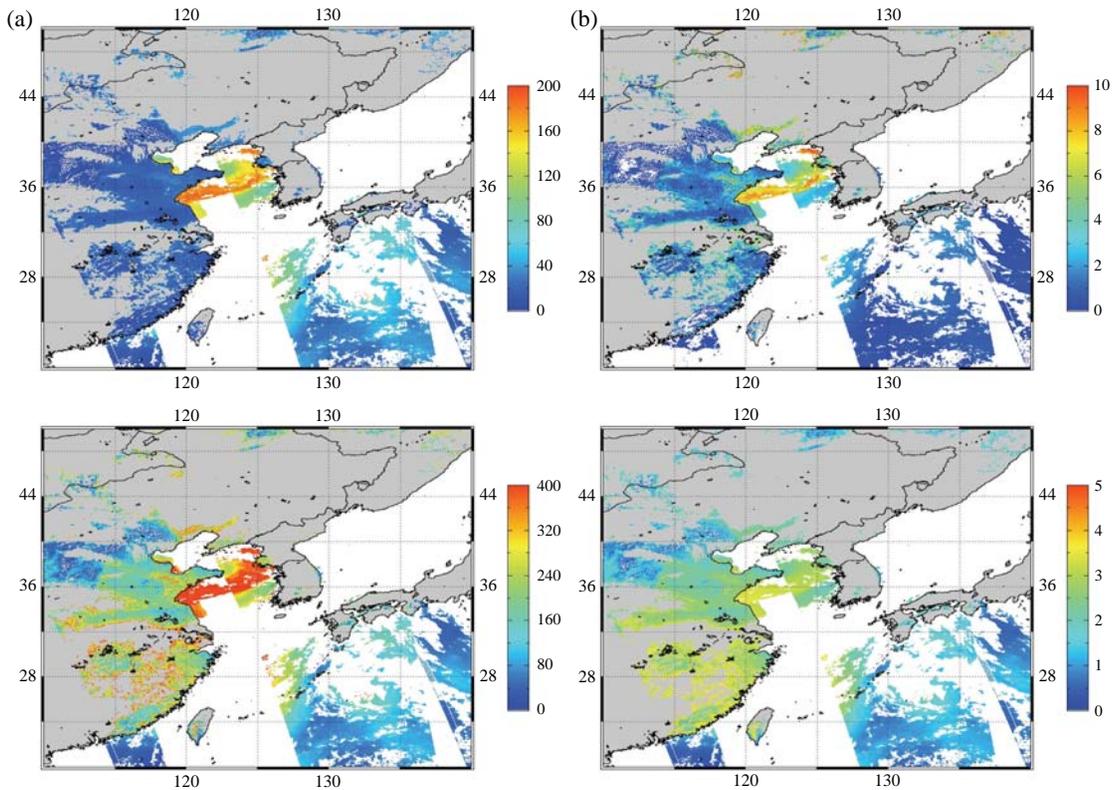


Fig. 8. (a) aerosol radiative forcing by the integration of MODIS-CALIPSO data and (b) difference between Calipso used and assumed on 31 March 2007.

사례 연구일에 대한 위성자료 결과인 그림 6과 7의 자료로부터 복사전달모델링을 수행하여 에어러솔에 의한 복사강제력을 산출한 결과는 그림 8(a)와 같다. 그리고 CALIOP 자료를 사용하지 않고 에어러솔의 연직분포가 지상으로부터 고도가 높아질수록 지수적으로 감소하는 분포라고 가정한 경우와 CALIOP 자료를 사용한 경우를 비교한 결과는 그림 8(b)에 나타내었다. 에어러솔 복사 강제력은 에어러솔의 연직분포를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우에서 매우 다른 양상으로 나타나고 있다. 일반적으로 에어러솔의 고도를 고려하지 않고 복사강제력을 산출할 경우에는 민감도 실험에서와 마찬가지로 오차를 발생시킨다는 결과를 여기에서도 확인할 수가 있다.

특히, 민감도 실험의 결과에서 나타난 것과 같이, TOA에서의 복사강제력은 에어러솔의 고도를 고려한 경우와 그렇지 못한 경우에 있어 매우 큰 차이점이 나타나고 있다. 황사 영역 중심부의 에어러솔 광학두께 값이 2 이상으로 매우 크게 나타나는 지역에서는 복사강제력의 값이 약 $\sim 10 \text{ W/m}^2$ 의 차이를 보였다. 그리고 연구 대상 영역 전체 평균 값으로는 TOA에서 1.79 W/m^2 (4.73%)와 지표에서 1.89 W/m^2 (1.27%)로 나타났다. 즉, 에어러솔의 고도 변화로 인하여 지표면에서의 복사강제력은 TOA에서의 복사강제력과 비교했을 때 상대적으로 차이점이 적은 것으로 나타났다. 이는 그림 3(b)에서 보이듯이 복사전달 과정에 있어 지표면에 도달하는 복사량이 에어러솔의 고도보다 광학두께에 더 많은 영향을 받기 때문이다. 따라서 수동형 위성관측 자료를 이용하여 복사강제력을 산출하는 경우에는 에어러솔의 고도 값을 고려하여 복사전달 모델링을 수행하는 것이 정확한 결과를 얻을 수 있는 것으로 기대된다.

5. 결 론

본 연구에서는 지구관측 위성 시리즈 중 대표적인 수동형 센서인 MODIS로 분석된 에어러솔 광학두께 자료와 능동형 센서인 CALIOP 위성탐재 라이더 관측자료를 이용하여 국내 최초로 에어러솔에 대한 수평, 수직 분포 특성을 분석하여 에어러솔 복사강제효과를 정량화하였다. 기존의 복사강제력 산출방법에서는 주로 에어러솔에 의한 복사강제력 산출 시 가장

된 값이나 지상이나 항공 관측자료를 사용하게 되나 공간적 한계가 있으므로, 본 연구에서 제시된 수동형-능동형 위성센서 자료의 사용은 이러한 공간적 한계를 극복할 수 있으며 향후 다양한 위성자료의 활용적인 측면에 있어 중요한 의미를 가진다.

민감도 실험을 통하여 에어러솔의 연직분포 자료는 복사전달과정에서 중요한 요소로서 에어러솔에 의한 복사강제효과에 영향을 미치고 있음을 증명하였으며, 그 절대량은 지상에서보다 TOA에서 더 크게 영향을 미칠 수 있다. 또한, 지표 알베도가 증가함에 따라 에어러솔의 고도에 의한 영향은 작아지게 되므로 육지보다는 해양에서 그 중요성은 커짐을 알 수 있었다.

실제 에어러솔의 고도가 복사강제력 산출에 어떻게 영향을 미치는 지에 대하여 정량적으로 분석하기 위한 사례 연구로서 2007년 3월 31에 발생한 황사 현상에 대한 위성자료를 분석하였다. 이 사례에서는 MODIS 위성으로 분석된 에어러솔 광학두께 값은 2~4 사이의 매우 높은 값을 나타냈으며, CALIPSO 에어러솔 소산계수의 연직분포를 보면 황사에 의하여 증가된 부분이 고도 1~4 km 사이에 존재하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 수동형-능동형 위성 관측자료를 이용하여 복사전달 모델링 결과, 에어러솔 복사강제력은 지표에서 $300 \sim 400 \text{ W/m}^2$, TOA에서 $140 \sim 180 \text{ W/m}^2$ 으로 분석되었으며, 이러한 값은 라이더 관측자료를 사용하지 않았을 경우와 비교했을 때 약 1~5% 정도의 차이가 있었다.

이와 같이 수동형-능동형 위성센서 자료를 이용한 분석방법은 에어러솔의 입체적인 분포특성정보와 함께 에어러솔의 연직분포 정보가 고려된 에어러솔 복사강제효과를 산출함으로써 보다 정확하고 진보된 기후변화 자료를 생산할 수 있게 한다. 본 연구에서 제시된 통합 위성센서 분석 방법은 동북아시아 지역에서 자주 발생하는 이벤트성 에어러솔 현상(예: 황사나 연무, 바이오매스 연소성 에어러솔)의 공간적 특성 및 이로 인한 복사 특성을 밝히는 데 매우 유용한 정보를 제공할 것이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기후변화 감시·예측 및 국가정

책지원 강화사업 (RACS 2010-1003) 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- Ackerman, A.S., O.B. Toon, D.E. Stevens, A.J. Heymsfield, V. Ramanathan, and E.J. Welton (2000) Reduction of tropical cloudiness by soot, *Science*, 288, 1042-1047.
- Albrecht, B.A. (1989) Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness, *Science*, 245, 1227-1230.
- Bush, B.C. and F.P.J. Valero (2003) Surface aerosol radiative forcing at Gosan during the ACE Asia campaign, *J. Geophys. Res.*, 108(D23), 8660, doi:10.1029/2002JD003233.
- Carlson, T.N. and S.G. Benjamin (1980) Radiative heating rates for Saharan dust, *J. Atmos. Sci.*, 37, 193-213.
- 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.
- Haywood, J.M. and V. Ramaswamy (1998) Global sensitivity studies of the direct radiative forcing due to anthropogenic sulfate and black carbon aerosols, *J. Geophys. Res.*, 103, 6043-6058.
- Kim, S.-W., S. Berthier, J.-C. Raut, P. Chazette, F. Dulac, and S.-C. Yoon (2008) Validation of aerosol and cloud layer structures from the space-borne lidar CALIOP using a ground-based lidar in Seoul, Korea, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 3705-3720, doi:10.5194/acp-8-3705-2008.
- 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. 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., Z. Li, M.S. Wong, J. Xin, Y. Wang, and F. Zhao (2007) Aerosol single scattering albedo estimated across China from a combination of ground and satellite measurements, *J. of Geophys. Res.*, 112, D22S15, doi:10.1029/2007JD009077.
- 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*, Y.J. Kim, U. Platt, M.B. Gu, H. Iwahashi (Eds.), Springer, doi:10.1007/978-1-4020-9674-7_2, 13-38.
- Levy, R.C., L.A. Remer, S. Mattoo, E.F. Vermote, and Y.J. Kaufman (2007) Second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer spectral reflectance, *J. Geophys. Res.*, 112, D13211, doi:10.1029/2006JD007811.
- Li, Z., K.-H. Lee, Y. Wang, J. Xin, and W.-M. Hao (2010) First observation-based estimates of cloud-free aerosol radiative forcing across China, *J. Geophys. Res.*, 115, D00K18, doi:10.1029/2009JD013306.
- Liao, H. and J.H. Seinfeld (1998), Radiative forcing by mineral dust aerosols: Sensitivity to key variables, *J. Geophys. Res.*, 103(D24), 31637-31645.
- 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.
- 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)
- Remer, L.A., Y.J. Kaufman, D. Tanré, S. Mattoo, D.A. Chu, J.V. Martins, R.-R. Li, C. Ichoku, R.C. Levy, R.G. Kleidman, T.F. Eck, E. Vermote, and B.N. Holben (2005) The MODIS aerosol algorithm, products and validation, *J. Atmos. Sci.*, 62, 947-973.
- Ricchiazzi, P., S. Yang, C. Gautier, and D. Sowle (1998) SB-DART: 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.

- Twomey, S. (1977) The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds, *J. Atmos. Sci.*, 34, 1149-1152.
- 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.
- Zhang, J.L. and S.A. Christopher (2003) Longwave radiative forcing of Saharan dust aerosols estimated from MODIS, MISR, CERES observations on Terra, *Geophys. Res. Lett.*, 30, doi:10.1029/2003GL018479.