화산재입자의 고유 광학특성이 원격탐사 복사량에 미치는 민감도 분석

이권호* · 장은숙**†

*경일대학교 공간정보공학과, **한중대학교 공학부

Sensitivity Analysis of Volcanic Ash Inherent Optical Properties to the Remote Sensed Radiation

Kwon-Ho Lee * and Eun-Suk Jang **†

*Department of Geoinformatics Engineering, Kyungil University, **Faculty of Engineering, Hanzhong University

Abstract : Volcanic ash (VA) can be estimated by remote sensing sensors through their spectral signatures determined by the inherent optical property (IOP) including complex refractive index and the scattering properties. Until now, a very limited range of VA refractive indices has been reported and the VA from each volcanic eruption has a different composition. To improve the robustness of VA remote sensing, there is a need to understanding of VA - radiation interactions. In this study, we calculated extinction coefficient, scattering phase function, asymmetry factor, and single scattering albedo which show different values between andesite and pumice. Then, IOPs were used to analyze the relationship between theoretical remote sensed radiation calculated by radiative transfer model under various aerosol optical thickness (τ) and sun-sensor geometries and characteristics of VA. It was found that the mean rate of change of radiance at top of atmosphere versus τ is six times larger than in radiance values at $0.55 \mu\text{m}$. At the surface, positive correlation dominates when $\tau < 1$, but negative correlation dominates when $\tau > 1$. However, radiance differences between andesite and pumice at $11 \mu\text{m}$ are very small. These differences between two VA types are expressed as the polynomial regression functions and that increase as VA optical thickness increases. Finally, these results would allow VA to be better characterized by remote sensing sensors.

Key Words : Remote sensing, volcanic ash, inherent optical property, radiative transfer model

요약 : 화산재입자의 굴절률과 산란 같은 고유 광학 특성으로 결정되는 분광학적 신호는 원격탐사 센서를 통하여 측정될 수 있지만, 화산 폭발 이후 생성된 화산재입자의 성분에 대한 굴절률에 관한 정보는 매우 제한적이었다. 따라서, 화산재입자의 원격탐사의 강건성을 개선하기 위하여 화산재입자와 복사전달 과정의 상호작용에 대한 정확한 이해가 필요하다. 본 연구에서는 화산재 주요 성분으로 알려진 화산성 안산암과 부석

접수일(2013년 10월 24일), 수정일(1차 : 2014년 1월 13일, 2차 : 2월 12일), 게재확정일(2013년 2월 12일).

† 교신저자: 장은숙(esjang@hanzhong.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

에 대한 입자 소산계수, 산란 위상함수, 비대칭 계수, 단산란 알베도 값을 정량화 하였다. 이러한 화산재입자의 고유 광학 특성값은 복사전달모델의 입력자료로 이용하여 다양한 에어러솔 광학두께(τ) 및 기하조건에서 원격탐사 센서(인공위성과 지상관측용)가 측정하는 이론적인 복사량과 화산재입자 특성의 관계를 분석하였다. 복사전달모델 분석결과, 대기권 최상층부에서 τ 에 대한 복사량의 변화율의 평균값은 안산암의 경우 부식보다 6배 정도 크게 나타났다. 지표에서 이러한 변화율은 $\tau < 1$ 인 경우 양의 상관관계를 보이지만, $\tau > 1$ 인 경우에는 음의 상관관계를 보였다. 그러나, 적외선 영역인 $11 \mu\text{m}$ 에서는 차이가 매우 적게 나타났으며, 여기서 발생하는 복사량의 오차범위는 광학두께가 증가할수록 커지는 양상을 보이며, 다항 회귀함수로 표현될 수 있다. 이러한 결과는 원격 탐사 관측자료를 이용한 화산재 관측에 있어서 화산재의 정량적 분석에 도움이 될 것이다.

1. 서론

화산폭발로 인하여 대기 중으로 배출된 화산재는 인접지역에 막대한 피해를 유발하며, 화산폭발 규모에 따라 높은 고도까지 상승되어 고층기류의 이동에 따라 이동 및 확산을 한다. 화산재 구름(Volcanic ash cloud)은 각종 입자상 물질(토양 및 마그마 등)과 가스성분(SO_2 , HF 등)이 혼합되어 있으며, 항공 및 교통안전, 경제적 손실, 환경 및 보건, 기후, 국가안보 등의 재해가 초래될 수 있다. 실제로 2010년 3월 20일부터 시작된 아이슬랜드의 Eyjafjallajökull 화산(북위 63.633°, 동경 19.6°) 활동은 몇 달 간 계속되었으며 강력한 화산폭발과 함께 막대한 양의 화산재를 대기 중으로 배출하였으며, 화산재의 영향을 종합적으로 파악하기 위하여 원격탐사 기법이 활용되었다(Derimian *et al.*, 2012; Gasteiger *et al.*, 2011). 그리고 역사상 가장 큰 화산 폭발 중 하나인 Pinatubo 화산폭발과 El Chichon 화산폭발은 전 지구적인 기후변화 효과를 유발한 것으로 알려져 있다(Mishchenko *et al.*, 2007). 따라서 화산재로 인한 재해 예방 및 경감을 위하여 화산재의 시·공간적 모니터링은 필수적이다.

화산재 모니터링 정보는 실지 관측(in-situ)으로부터 획득하는 것이 가장 정확한 방법이지만, 실지 관측의 위험성과 광역 관측의 어려움 등의 문제가 존재한다. 따라서, 화산재 탐지에 있어 직접 관측의 제한점을 극복하고, 보다 효율적인 관측을 위하여 인공위성이나 지상 원격탐사 관측장비가 널리 사용되고 있다. 인공위성은 관측 영역이 넓고 주기적인 관측이 가능한 장점으로 인하여 대기중의 입자상 성분의 시·공간적 분포정보를 효과적으로 파악할 수 있으며(Lee *et al.*, 2004; 2006a; 2006b), 위성 탑재 센서의 특징에 따라 다양한 화산재 탐지 알고리

즘이 개발되었다(Francis *et al.*, 2012; Ellord *et al.*, 2003; Prata *et al.*, 1989). 지상원격탐사 방법은 복사계나 라이다 관측으로부터 화산재입자에 대한 에어러솔 광학두께(aerosol optical thickness, τ) 또는 광 소산 계수(light extinction coefficient)를 분석할 수 있어 관측 지점에서의 시간변화에 따른 화산재입자의 변화 양상을 측정할 수 있다(Campanelli *et al.*, 2012; Miffre *et al.*, 2012). 한편, 화산재를 포함하는 대기 중 입자 성분의 미세물리특성과 광학특성은 태양광과 반응하는 과정에 영향을 미치는 인자이므로(Lee *et al.*, 2008), 보다 정확한 원격 탐사 결과를 얻기 위하여 화산재입자 특성과 태양 복사의 상호작용에 대한 정확한 이해가 요구된다.

본 연구는 화산재입자의 특성이 복사전달과정 및 원격탐사에 미치는 민감도에 관한 영향을 정량화하는 것을 목적으로 하였다. 따라서, 현재까지 알려진 화산재입자의 미세물리 특성자료를 조사하여 화산재입자에 대한 광학특성모델을 산정하여 각 모델 별 특성을 분류하였다. 그리고 여기서 개발된 화산재입자 모델은 복사전달모델을 이용하여 다양한 환경조건(화산재입자의 종류, 광학두께, 입자크기, 고도 등)에서 원격탐사센서가 측정하는 이론적인 복사량을 계산하여 화산재입자의 특성에 따른 민감도를 분석하였다

2. 연구방법

Fig. 1은 화산재입자의 특성에 따른 민감도 분석을 위하여 본 연구에서 사용된 자료처리 및 분석과정을 도시한 순서도이다. 민감도실험을 위한 자료처리과정은 1) 화산재 성분에 대한 입자 굴절률(refractive index, m) 테이

Fig. 1. Flow diagram of the ash optical and radiative transfer model for the generation of the data set.

블 작성 부분, 2) 굴절률과 입자크기분포를 이용한 입자 산란 특성값 계산부분, 3) 광학 특성값을 이용한 복사전달모델 수행 부분으로 크게 세 부분으로 나누어져 있다.

화산재입자의 미세 물리적 특성값은 화산재 원격탐사에 필요한 복사전달 모의를 위하여 필요한 정보로서, 입자의 굴절률과 크기분포(size distribution) 값이 기본적으로 사용된다. 입자의 산란이론(scattering theory)에 의하면, 입자의 굴절률과 크기분포는 화산재입자로 인하여 유발되는 광 산란 및 광 흡수 효과를 정량화하는데 필요한 값이다. 입자의 굴절률은 식(1)과 같이 실수부(n)와 허수부(k)로 구성되며, 각각 입자에 의한 광 산란(light scattering)과 광 흡수(light absorption)에 대한 기여도에 관여한다.

$$m(\lambda) = n(\lambda) - ik(\lambda) \quad (1)$$

입자의 크기분포는 대기 중에 존재하는 입자의 개수를 입자의 크기로 표현한 것으로, 흔히 식(2)와 같은 로그노말(log-normal) 분포 함수가 사용된다.

$$\frac{dN(r)}{d \ln r} = \frac{N_i}{2\pi\sigma_i} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln r - \ln r_{m,i}}{\sigma_i} \right)^2 \right] \quad (2)$$

여기서 N_i , r_m , σ_i 는 각 모드 i 에서의 입자의 총 개수, 평균 입자 크기, 정규 분포를 구성하는 표준편차이다. 그러

나 화산재입자에 대한 크기분포는 일반적으로 알려져 있는 입자 크기분포 모델(예: urban, rural, oceanic 모델 등)과 같이 정량적으로 고정된 값이 사용되지 않고, 식(3)의 유효 반경(Effective radius, Re)으로 표현되는 일련의 가정된 값을 사용하여 계산된 복사량의 조건표를 이용하여 원격탐사 자료로부터 역으로 크기분포를 산정한다.

$$Re = \frac{\int_0^\infty r^3 n(r) dr}{\int_0^\infty r^2 n(r) dr} \quad (3)$$

화산재입자의 광학 특성값인 소산계수(extinction coefficient, σ_{Ext}), 단산란 알베도(single scattering albedo, ω_0), 비대칭 인자(asymmetry parameter, g), 산란 위상함수(scattering phase function, $P(\Theta)$)는 복사전달과정에 영향을 미치는 주요 인자들이며, 이전 단계에서 획득한 입자 미세물리 특성값을 이용하여 파장에 따른 광학 특성값을 계산할 수 있다. 화산재입자의 σ_{Ext} , $P(\Theta)$, g 및 ω_0 는 굴절률과 크기분포 함수를 입력변수로 하는 Mie 산란 코드(Bohren and Huffman, 1983)를 사용하여 이론적으로 계산하였다. 화산재입자의 형태에 대해서는 입자의 조성이나 이동 중 성상변화에 의하여 모호한 점이 많으므로 본 연구에서는 구형으로 가정하였다. 화산재입자와 비슷한 황사와 같은 먼지성분의 경우, 비구형성 입자

와 비구형성 입자의 광학 특성값 산출시 5% - 8% 정도의 상대 차이가 발생하는 것으로 보고되었다(Lee *et al.*, 2013). 따라서, 화산재의 비구형도에 따른 영향은 후속 연구를 통하여 분석할 예정이다. 입자의 소산(σ_{Ext}), 산란(σ_{Sca}), 흡수 계수(σ_{Abs})는 다음의 식(4)와 같이 계산된다.

$$\sigma_{Ext, Sca, Abs}(\lambda) = \int_{r=0}^{r=\infty} \pi^2 \cdot Q_{Ext, Sca, Abs}(\lambda, r, m) \cdot \frac{dN}{d \ln r} d \ln r \quad (4)$$

여기서 Q 는 파장 λ , 입자의 크기 r 과 굴절률 m 에 의하여 결정되는 소산 또는 산란 효율함수이며, σ_{Ext} 는 식(5)와 같이 σ_{Sca} 와 σ_{Abs} 의 합으로 정의된다.

$$\sigma_{Ext}(\lambda) = \sigma_{Sca}(\lambda) + \sigma_{Abs}(\lambda) \quad (5)$$

그리고 에어리솔의 광학적 특성을 나타내는 파라미터인 ω_0 , $P(\Theta)$, g 값은 다음의 식(6),(7),(8)과 같이 계산되며, 이 값들은 복사전달모델의 입력값으로 사용된다.

$$\omega_0(\lambda) = \frac{\sigma_{Sca}(\lambda)}{\sigma_{Ext}(\lambda)} \quad (6)$$

$$p(\lambda, \Theta) = \int_{r=0}^{r=\infty} \pi^2 \cdot F(\lambda, r, m, \Theta) \cdot \frac{dN}{d \ln r} d \ln r \quad (7)$$

$$g(\lambda) = \frac{\int \cos \Theta \cdot P(\lambda, \Theta) \cdot d \cos \Theta}{\int (\lambda, \Theta) \cdot d \cos \Theta} \quad (8)$$

여기서 $F(\lambda, r, m, \Theta)$ 는 파장, 입경, 굴절률, 그리고 산란 각 Θ 에 따른 산란강도함수이다. 그리고 g 값은 1에 가까울수록 전방산란, -1에 가까울수록 후방산란이 강한 상태를 의미한다.

화산재입자의 광학 특성값은 복사전달모델의 입력 자료로 사용되며 원격탐사 기기(위성센서 또는 지상관측센서)가 측정하게 되는 복사량을 이론적으로 계산할 수 있다. 본 연구에서는 가시광선에서 적외선 영역까지 복사량을 계산할 수 있는 Santa Barbara Disort Radiative Transfer(SBDART)(Ricchiuzzi *et al.*, 1998)를 적절히 변형하여 사용하였다. SBDART는 복사전달과정을 모의함에 있어 수치해석적 방법 중 하나인 discrete ordinary method를 사용하며, 대기 조성물질에 의한 분광특성을 반영하기 위한 line-by-line 계산을 수행할 수 있는 모델로서 복사량계산에 효과적이다. 복사전달모델의 주요 입력값으로서 대기조성 값은 실제 대기구성 및 연직분포 자료의 획득에 어려움으로 인하여, 일반적으로 널리 사용되는 US 표준대기모델을 사용하였다. 그리고 화산재에 대한 입력자료는 광학 특성값과 함께 화산재입자의

상대적 양을 나타내는 에어리솔 광학두께는 0 - 5사이에서 11개의 선택된 값을 이용하였다. 그리고 복사량 계산에 필요한 기하조건은 각각 태양천정각(solar zenith angle, $\theta_0 = 0^\circ - 80^\circ$, $\Delta = 10^\circ$), 센서관측각(sensor view angle, $\theta_s = 0^\circ - 180^\circ$, $\Delta = 5^\circ$), 상대방위각(relative azimuth angle, $\phi = 0^\circ - 180^\circ$, $\Delta = 10^\circ$)를 사용하였다.

3. 결 과

1) 화산재 미세물리 모델

화산재 성분은 화산의 발생원과 대기 중에서 여러 물리·화학적 프로세스에 따라 매우 다양한 물리·화학적 조성을 가지게 된다. 그 결과 조성에 따른 미세물리 특성 또한 매우 다양하게 나타난다. 화산재의 굴절률 값은 실지관측(in-situ)으로부터 획득하는 것이 가장 이상적인 방법이지만, 실지관측의 어려움으로 인하여 본 연구에서는 실제 화산폭발 이후 채집된 화산재 성분에 대한 기존의 문헌 자료를 조사하여 수집하였다. Table 1은 본 연구에서 조사된 화산재입자에 대한 굴절률 자료의 목록이며, 화산재의 원격탐사 시 구름으로 오인될 수 있는 부분이 발생 할 수 있으므로, 기상학적 구름의 주 성분인 물(water)과 얼음(ice)에 대한 파장 별 굴절률 자료도 조사하였다. 화산재입자의 주 성분 중 안산암(andesite)에 관한 굴절률은 파장 0.185 - 0.4 μm 에 해당하는 자외선 영역(Egan *et al.*, 1975)과 파장 0.3 - 50 μm 에 해당하는 자외선 - 적외선 영역(Pollack *et al.*, 1973)에서의 자료가 흔히 사용된다. 실제 화산폭발 이후 채집된 화산재 성분에 대한 굴절률 자료는 Mayon 화산(Patterson, 1975)과, St. Helene 화산(Patterson, 1981), de Fuego 화산(Patterson, 1981)과 El Chichon(Edward, 1983)에 대한 경우의 자료를 획득 할 수 있었다. 그러나 이 자료는 굴절률의 허수부에 대한 정보만 존재하므로, 산란 특성값의 계산에는 사용되지 못하였다. 그리고 Volz(1973)은 화산성 부석(Volcanic Pumice)에 대한 굴절률 분석결과를 제시하였으며, 그 결과는 WCP(1986)에도 인용되고 있다. 안산암은 유색광물이 비교적 적게 포함되어 있어 대체적으로 회백색을 띠지만 부석은 유문암 성분을 포함하고 있어 다소 어두운 색을 가지는 것으로 알려져 있다.

Table 1. List of available wavelength ranges for refractive index for volcanic ash, water, and ice.

Type	Wavelength range for Real part [μm]	Wavelength range for Imaginary part [μm]	Reference
Andesite	0.185-0.4	0.185-0.4	Egan et al. (1975)
Andesite	0.2-50	0.3-50	Pollack et al. (1973)
Ash (Mayon)	NA	1.01-15.98	Patterson (1975)
Ash (St. Helen, de Fuego)	NA	0.3-0.7	Patterson (1981)
Ash (El Chichon)	NA	0.3-0.7	Edward (1983)
Volcanic Pumice	0.2-40	0.2-40	Volz (1973), WCP(1986)
Water	0.2-200	0.2-200	Hale and Querry (1973)
Ice	0.044-2mm	0.044-2mm	Warren and Brandt (2009)

Fig. 2. (a-c) Real parts and (d-f) imaginary parts of the complex refractive index for volcanic ash particles versus liquid water and ice in visible and thermal IR wavelength region.

Fig. 2는 Table 1에서 언급된 굴절률의 각 파장별 변화를 나타낸다. 가시광선 영역에서 안산암과 부석의 $n_{\text{값}}$ 은 비교적 차이가 많이 나지 않지만(Fig. 2a), 적외선 영역인 7 - 11 μm 범위에서는 다소 많은 차이가 나타나므로(Fig. 2b), 해당 파장 영역에서 두 입자간 산란 특성에 차이가 발생할 수 있음을 알 수 있다. 그리고 앞서 언급한 안산암과 부석의 색의 차이는 Fig. 2c에서 파장별 k 의 차이에서도 나타난다. 즉, 안산암의 k 값은 가시 영역에서 0.001 - 0.002 정도의 매우 적은 값을 가지는데 반하여 부석은 0.008로서 광 흡수가 더 큰 것으로 나타난다. 이러한 차이는 실제 화산사례에서도 나타나며, St. Helen과의 파장별 k 값은 안산암과 비슷한 수준을 보이며, deFuego와 Mayon 화산재는 부석의 파장별 k 값과 비슷하다. 이러한 현상은 적외선 영역에서도 발생하며(Fig. 2d), Mayon 화산재가 부석과 비슷한 변화 양상을 가지고 있는 것으로 나타난다. 따라서, St. Helen의 화산재는 안산암 성분이 주를 이루며, deFuego와 Mayon 화산재는 주로 부석 성분이 많은 것을 증명한다.

Fig. 2에서는 화산재와 기상학적 구름과 비교를 위하여 물과 얼음의 굴절률 변화를 비교할 수 있으며, 가시광선 영역에서 광 흡수특성이 거의 없는(즉, k 값이 0에 가까운) 물과 얼음의 n 은 화산재보다는 약 0.15정도 적은 값을 나타내었으며, 적외선 영역에서는 파장이 10 μm 이후부터 점차 커진다. 이것은 화산재입자성분이 10 μm 이후부터는 굴절률 값이 작아지는 특성과 반대이며, 이러한 특성이 화산재와 기상학적 구름과의 구분을 위하여 흔히 사용되고 있다(Prata, 1989).

2) 화산재 광학특성 모델

화산재입자의 광학적 특성은 원격 탐사에 필요한 복사량에 대한 해석에 있어 필요한 주요 인자로서, 역방향 문제(inverse problem)의 해를 구할 때 오차를 유발하는 원인이 된다. 따라서 화산재입자 특성에 따른 광학적 특성이 복사 전달과정에 미치는 영향을 정량화 하는 것이 필요하며, 대표적 광학 특성 값으로 파장별 σ_{ext} , g , ω_0 가 사용된다.

Fig. 3은 화산재입자에 대한 파장별 σ_{ext} , g 및 ω_0 계산 결과로서, σ_{ext} 는 0.55 μm 에서의 σ_{ext} 로 정규화된 값으로 파장별로 소산되는 복사량을 상대적으로 알 수 있다. 여기서 파장별 소산계수 σ_{ext} 는 가시광선 영역에서는 파장

이 길어질수록 일정하게 증가하지만(Fig. 3a), 적외선 영역에서는 약 8 μm 파장까지는 감소하다가 약 10 μm 에서 최댓값을 나타낸다(Fig. 3b). 이러한 결과는 화산재입자의 굴절률이 8 μm 까지는 작은 값을 보이다가 10 μm 까지는 지속적으로 증가하여 입자에 의한 광 산란과 흡수 효과가 커지기 때문이다(Fig. 2참조). 그리고 적외선 영역에서 화산재입자의 소산계수는 물이나 구름과는 다른 특성을 보이므로 복사과정에 있어 분광학적 특성이 다르게 나타나게 된다.

ω_0 는 입자에 의한 광 흡수도의 상대적 크기를 나타내며 1의 값을 가지면 광 흡수성이 없는 순수 산란 입자를 의미하며 1보다 작은 값은 광 흡수성이 커짐을 의미하며 입자의 k 의 크기에 반비례한다. 물이나 얼음은 가시광선 영역에서 흡수성이 없기 때문에 거의 1에 가까운 값을 가지지만, 화산재입자는 이보다 낮은 값(안산암: 약 0.93, 부석: 약 0.53 - 0.92)을 나타내고 있다(Fig. 3c). 적외선 영역에서는 파장 약 8 μm 근처에서 강한 광 흡수성으로 인하여 화산재의 ω_0 값은 0.17(안산암), 0.55(부석)까지 작아지며, 이후 다시 증가하는 추세를 보이고 있다. 그러나 물과 얼음은 11 μm 근처에서 최솟값을 나타내며 이후 다시 증가한다(Fig. 3d). Fig 3e - f은 입자의 방향성 광 산란을 나타내는 지수인 g 의 파장 별 변화를 나타내며, 화산재입자는 가시광선영역에서 파장이 길어질수록 전방산란이 적어지고 후방산란이 증가하고 있으며, 적외선 영역인 8 μm 이후에서는 후방산란 효과가 매우 크게 나타나고 있다. 그러나 물과 얼음은 가시광선 영역에서 g 의 변화가 거의 없으나 적외선 영역에서는 점차 감소하면서 11 μm 이후에서 후방산란이 증가하는 것으로 나타나고 있다.

Fig. 4는 산란각(Θ)에 따른 산란강도인 $P(\Theta)$ 를 나타내며, 태양과 원격탐사 센서의 관측 위치에 따라 화산재입자에 의한 복사량의 변화를 설명할 수 있다. $P(\Theta)$ 는 입자의 종류에 상관없이 산란각이 0°인 경우(즉, 최전방산란) 최대이고, 산란각이 증가할수록(즉, 전방산란이 감소하고 후방산란이 증가하는 영역) 감소하여 약 120° - 140° 근처에서 최솟값을 나타내고 120° - 180° 사이의 산란강도는 오히려 증가하고 있다. 그리고 $P(\Theta)$ 는 안산암이 부석보다는 다소 큰 값을 나타내어 전체 산란강도가 큰 것을 알 수 있으며, 이 결과는 Fig. 3의 결과와 일치한다.

Fig. 3. (a, b) Normalized extinction coefficient, (c, d) single scattering albedo, and (e, f) asymmetry factor for volcanic ash versus water and ice of effective radius 3 μm .

Fig. 4. Phase function of the scattering matrix from Mie theory calculations for (a) 0.55 μm and (b) 11 μm .

3) 원격탐사 자료에 대한 민감도 분석

Fig. 5와 6은 가시광선 영역의 원격탐사에서 흔히 사용되는 $0.55\mu\text{m}$ 와 적외선 영역에서 대기의 영향을 최소한으로 받는 대기의 창(atmospheric window) 영역인 $11\mu\text{m}$ 에서의 복사전달 모의 결과로서 인공위성과 지상 복사 관측 센서가 기하조건별로 관측하게 되는 이론적인 복사량 분포도이다. 화산재입자의 광학특성이 이 두 파장대에서의 미치는 영향을 분석하기 위하여, 화산재입자에 의하여 증가 또는 감소되는 복사량($dL(\lambda)$)을 정량화하였다. $dL(\lambda)$ 를 계산하기 위하여 화산재를 고려한 복사량 계산 결과($L_{Ash}(\lambda)$)와 화산재입자가 존재하지 않는 조건(화산재 광학두께 = 0) 하에서의 계산된 복사량($L_{NoAsh}(\lambda)$)을 식(9)와 같이 차감하였다.

$$dL(\lambda) = L_{Ash}(\lambda) - L_{NoAsh}(\lambda) \quad (9)$$

먼저, Fig. 5는 대기 최 상층부(Top-of-atmosphere; TOA)에서 태양 천정각이 40° 인 조건하에, 원격탐사 센서의 기하조건(센서 관측각, 상대 방위각)에 따른 화산재 복사량을 나타낸 결과이다. 이 결과는 이론적으로 인공위성 탑재 센서가 해당 파장을 가지는 채널에서 관측하는

복사량과 같다. Fig 5a와 5b는 파장 $0.55\mu\text{m}$ 에서 안산암과 부석에 의한 복사량이며 센서의 관측각도와 방향에 따라 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다. 화산재입자의 존재로 인하여 복사량이 증가하는 영역은 태양과 위성 센서가 마주보며 일직선이 되는 상대 방위각 0° 에서부터 약 60° 인 영역과 위성 관측각이 40° 보다 큰 영역(즉, 전방산란이 증가하는 기하 조건)에서 복사량이 커지게 된다. 반대로, 상대방위각과 위성 관측각이 큰 영역(즉, 후방산란이 증가하는 기하 조건)에서는 복사량이 상대적으로 작아지므로 화산재로 인한 민감도가 작아지게 된다. 그러나, 적외선 영역인 파장 $11\mu\text{m}$ 에서는 상대방위각에 따른 차이는 없으며 위성 관측각에 의한 차이가 발생하고 있다. 이것은 이 파장 영역의 복사량이 산란보다는 흡수와 방출에 의한 것이기 때문이다. 그리고 화산재입자 모델 중 안산암과 부석성분은 광 흡수도의 차이로 인하여, 동일한 입자크기와 광학두께인 조건하에서 위성센서가 측정하는 복사량의 절대값에 있어 평균 $0.43 \pm 0.23 \text{ W/m}^2(\lambda = 0.55\mu\text{m})$, $0.008 \pm 0.006 \text{ W/m}^2(\lambda = 11.0\mu\text{m})$ 의 차이가 발생하므로, 가시광선 영역에서 화산재 성분에 대한 민감도가 크게 나타남을 확인할 수

Fig. 5. Radiance distribution at top-of-atmosphere by (a, b) andesite and (c, d) pumice at $0.55\mu\text{m}$ and $11.0\mu\text{m}$ (sun zenith angle = 40° , $\tau_{0.55} = 1.0$, $R_e = 3\mu\text{m}$).

Fig. 6. Radiance distribution at bottom-of-atmosphere by (a, b) andesite and (c, d) pumice at 0.55 μm and 11.0 μm (sun zenith angle = 40° , $\tau_{0.55} = 1.0$, $\text{Re} = 3 \mu\text{m}$).

있다.

Fig. 6은 Fig. 5와 동일한 조건하에 지상(Bottom-of-atmosphere; BOA)에서 관측된 화산재 복사량을 나타낸다. 가시광 영역의 복사량은 센서가 태양과 일직선이 되어 직달 일사량을 관측할 수 있게 되는 조건에서 최대 복사량을 관측할 수 있게 된다. 즉, Fig. 6의 사례에서는 태양 천정각이 40° 인 경우이므로, 센서의 관측각이 140° 이며 상대 방위각이 0° 인 전방산란인 경우에 최대 복사량이 관측된다.

Fig. 7a-7b는 화산재의 상대적인 양으로서 표현되는 광학 두께값과 위성 센서가 관측하는 복사량의 관계를 알아보기 위하여 주어진 기하 조건(태양 천정각 = 40° , 위성 센서 관측각 = 30° , 상대 방위각 = 60°)에서의 두 값의 선형 관계를 나타낸다. 가시광선 영역에서 화산재 성분에 상관없이 위성이 관측하게 되는 복사량은 화산재에 의하여 후방산란되는 복사량으로서 $\tau_{0.55}$ 가 커질수록(화산재의 양이 증가할수록) 증가한다. 이것은 화산재입자 수 농도의 증가로 인하여 입자당 산란되는 복사량이 증가하기 때문이다. τ 에 대한 복사량의 변화율($\Delta dL/\Delta \tau_{0.55}$)의 평균값은 $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$ 인 경우 $0.30 \text{ W/m}^2/\text{sr}$

(안산암)과 $0.05 \text{ W/m}^2/\text{sr}$ (부석)으로 나타났다. Fig. 7a에서 $\Delta dL/\Delta \tau_{0.55}$ 이 안산암과 부석이 다르게 나타나는 이유는 이전 장에서 설명된 화산재입자의 고유한 광학 특성 중 광 흡수/광 소산 비율인 ω_0 가 다르기 때문이다. 즉, 대기 중 존재하는 화산재입자 수가 증가할수록 후방산란되는 복사량이 증가하여 위성 센서가 관측하는 복사 관측값이 증가하지만, 동시에 그 증가율은 화산재입자의 광 흡수성에 따라 다르게 나타나므로 가시광선 영역의 위성 원격탐사에 있어서 화산재입자 성분에 따른 간섭 효과가 복잡해짐을 알 수 있다. 그러나 적외선 영역($\lambda = 11 \mu\text{m}$)인 경우는 $\Delta dL/\Delta \tau_{0.55}$ 의 평균값이 $-0.50 \text{ W/m}^2/\text{sr}$ 와 $-0.50 \text{ W/m}^2/\text{sr}$ 으로서, 안산암과 부석으로 인한 변화량의 차이는 매우 적게 나타났다.

Fig. 7c-7d는 지상 관측 센서가 태양을 향하는 기하 조건(태양 천정각 = 40° , 센서 관측각 = 140° , 상대 방위각 = 0°)에서의 두 값의 선형 관계를 나타낸다. 위성센서와는 달리 지상센서는 태양 복사가 화산재에 의하여 전방산란과 흡수되는 양에 영향을 받으므로 가시광선 영역에서는 τ 가 커질수록(즉, 화산재의 양이 증가할수록) 증가와 감소를 병행한다. 특히, Fig. 7c에서는 $\Delta dL/\Delta \tau_{0.55}$ 의 평

Fig. 7. Aerosol radiance change as a function of AOT at (a, b) TOA (sun zenith angle = 40°, relative azimuth angle = 60°, satellite view angle = 30°) and (c, d) BOA (sun zenith angle = 40°, relative azimuth angle = 0°, sensor view angle = 140°) at 0.55 μm and 11.0 μm .

Fig. 8. Difference between aerosol radiance for andesite and that for pumice at (a, b) TOA and (c, d) BOA. Polynomial fitting results for 0.55 μm are overlaid. Red lines represent polynomial regression fitting results.

균값은 $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$ 에서 $\tau < 1$ 인 경우 $58.49 \text{ W/m}^2/\text{sr}$ (안산암)과 $78.11 \text{ W/m}^2/\text{sr}$ (부석)이지만, $\tau > 1$ 인 경우 $-9.83 \text{ W/m}^2/\text{sr}$ (안산암), $-14.25 \text{ W/m}^2/\text{sr}$ (부석)으로 나타났다. 화산재의 광학두께가 1이 될 때까지 복사량이 일정하게 증가하는 것은 화산재에 의하여 산란되는 복사량이 많아지게 되어 dL값이 커지기 때문이다. 화산재의 광학두께가 1보다 커지면 광 흡수가 지배적이므로 dL값은 작아지게 된다. 그리고 이러한 차이는 적외선 영역에서 매우 적게 나타나며, $\Delta dL/\Delta \tau_{0.55}$ 의 평균값이 $0.81 \text{ W/m}^2/\text{sr}$ 와 $0.80 \text{ W/m}^2/\text{sr}$ 으로서, 안산암과 부석으로 인한 변화량의 차이는 매우 적게 나타났다.

Fig. 8은 안산암과 부석에 의한 복사량의 차이를 $AOT_{0.55}$ 의 함수로 나타낸 그림이다. Fig. 8a의 결과에 의하면, 파장 $0.55 \mu\text{m}$ 에서 두 모델별 차이는 $AOT_{0.55}$ 의 증가와 함께 계속적으로 증가하고 있으며, 동일한 $AOT_{0.55}$ 조건인 경우에 화산재 성분 별 복사량의 차이는 2차 회귀 함수인 $y = 0.347x - 0.023x^2 - 0.031$ ($R = 0.99$)로 표현될 수 있다. 이러한 결과를 통하여 같은 수 농도의 화산재는 타입별 복사량이 매우 다르게 나타남을 반영한다. 이것은 광 산란이 흡수보다 적기 때문에 나타나며 위성영상 분석에서 이러한 특성을 고려하지 않으면 매우 큰 오차를 유발할 가능성이 있다. 동일한 방법에 의하여 지상에서 관측되는 복사량 차이는 5차 이상의 다항 회귀 함수로 표현할 수 있으며, 대표적으로 Fig. 8c의 경우는 $y = -40.16x + 42.28x^2 - 17.05x^3 + 3.09x^4 - 0.21x^5 - 0.28$ ($R = 0.99$)과 같다.

4. 결 론

원격탐사 기법을 이용한 화산재 모니터링은 화산재의 시공간적 분포 정보를 준 실시간으로 획득할 수 있으므로, 화산재로 인한 재해 예방 및 경감을 위하여 필수적이다. 그러나 화산재입자의 원격탐사에 필수적인 화산재입자에 대한 고유 광학 특성값에 대한 정보는 매우 제한적이었다. 따라서, 본 연구에서는 기존의 문헌 연구를 통하여 화산재입자에 대한 파장별 굴절률 특성 자료를 조사하였으며, 주요 화산재 성분에 따른 광학적·복사적 특성을 비교 분석 하였다. 그 결과, 화산재의 주요 성분으로서 안산암과 부석 입자의 광학 특성이 원격 탐사에

있어서 관측 파장영역과 기하 조건에 따라 매우 다양하게 나타남을 알 수 있었다. 이러한 결과는 대기중에서 화산재 구름에 의한 복사전달과정 및 원격 탐사 센서가 측정하는 복사량을 미리 모수화 하는데 이용 할 수 있다. 복사전달모델 결과를 통하여 계산된 복사량과 화산재 입자 특성과의 관계는 화산재 타입과 광학두께의 범위에 따라 서로 다르게 나타나고 있음을 밝혔다. 특히, 가시광선 영역에서 인공위성이 관측하게 되는 복사량은 화산재입자 광학두께에 따라 민감하게 변하며, 안산암 모델을 사용하게 되는 경우 부석 모델을 사용하는 경우보다 약 6배의 복사량 변화가 발생하였다. 그리고 지상 관측의 경우, 입자 광학두께값이 1보다 작은 경우는 복사량과 광학두께의 변화량은 양의 변화 관계를 가지지만, 1보다 크게 되면 오히려 복사량이 줄어드는 경향이 발생하였다. 가시광선 영역의 원격탐사 센서에 의한 관측값 분석에 있어서 잘못된 광학 특성값이 사용되는 경우 큰 오차를 유발할 수 있다. 따라서 원격 탐사 관측 자료의 분석에 있어서 정확한 화산재입자의 광학특성을 고려해야 한다. 이러한 결과는 화산재의 원격탐사 및 화산재로 인한 복사효과에 관한 기초 자료로서 유용할 것이다.

사 사

이 연구는 기상청 지진개발사업(CATER 2012-5080)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Bohren, C.F., and D. Huffman, 1983. *Absorption and scattering of light by small particles*, Wiley, New York.
- Campanelli, M., V. Estelles, T. Smyth, C. Tomasi, M.P. Martinez-Lozano, B. Claxton, Nakajima, T., Campanelli, M. Estelles, V. Smyth, T. Tomasi, C. Martinez-Lozano, MP; Claxton, B. Muller, P. Pappalardo, G. Pietruczuk, A. Shanklin, J. Colwell, S; Wrench, C. Lupi, A.

- Mazzola, M. Lanconelli, C. Vitale, V. Congeduti, F. Dionisi, D. Cardillo, F. Cacciani, M. Casasanta, G. Nakajima, T., 2012. Monitoring of Eyjafjallajökull volcanic aerosol by the new European Skynet Radiometers(ESR) network, *Atmos. Environ.*, 48: 33-45, 10.1016/j.atmosenv.2011.09.070.
- Derimian, Y., O. Dubovik, D. Tanré, P. Goloub, T. Lapyonok, and A. Mortier, 2012. Optical properties and radiative forcing of the Eyjafjallajökull volcanic ash layer observed over Lille, France, in 2010, *J. Geophys. Res.*, 117: D00U25, doi:10.1029/2011JD016815.
- Egan, W.G., T. Hilgeman, and K. Pang, 1975. Ultraviolet complex refractive index of martian dusts: laboratory measurements of terrestrial analogs, *ICARUS*, 25: 344-355.
- Ellrod, G.P., B.H. Connell, and D.W. Hillger, 2003. Improved detection of airborne volcanic ash using multi-spectral infrared satellite data. *J. Geophys. Res.*, 108(D12), doi:10.1029/2002JD002802.
- Francis, P.N., M.C. Cooke, and Saunders, R.W., 2012. Retrieval of physical properties of volcanic ash using Meteosat: A case study from the 2010 Eyjafjallajull eruption, *J. Geophys. Res.*, 117: D00U09, doi:10.1029/2011JD016788.
- Gasteiger, J., S. Groß, V. Freudenthaler, and M. Wiegner, 2011. Volcanic ash from Iceland over Munich: mass concentration retrieved from ground-based remote sensing measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 11: 2209-2223, doi:10.5194/acp-11-2209-2011.
- Lee, D.H., K.H. Lee, and Y.J. Kim, 2006a. Application of MODIS Aerosol Data for Aerosol Type Classification, *Korean J. of Remote Sensing*, 22(6): 495-505 (in Korean with English abstract).
- Lee, D.H., K.H. Lee, and Y.J. Kim, 2006b. Atmospheric aerosol detection and its removal for satellite data, *Korean J. of Remote Sensing*, 22(5): 1-5.
- Lee, K.H. and Y.J. Kim, 2008. Sensitivity of COMS/GOCI measured top-of-atmosphere reflectances to atmospheric aerosol properties, *Korean J. of Remote Sensing*, 24(6): 559-569 (in Korean with English abstract).
- Lee, K.H., 2013. Role of the scattering phase function in the remote sensing of non-spherical dust aerosols, *J. of the Korean Physical Society*, 62(6): 966-974.
- Lee, K.H., C.S. Hong, and Y.J. Kim, 2004. Atmospheric Aerosol Monitoring Over Northeast Asia During 2001 from MODIS and TOMS data, *Korean J. of Remote Sensing*, 20(2): 77-89 (in Korean with English abstract).
- 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.
- Mishchenko, M.I., I.V. Geogdzhayev, W.B. Rossow, B. Cairns, B.E. Carlson, A.A. Lacis, L. Liu, and L.D. Travis, 2007. Long-term satellite record reveals likely recent aerosol trend, *Science*, 315(1543), doi:10.1126/science.1136709.
- Patterson, E., 1981. Measurement of the imaginary refractive index between 300 and 700nm of Mount St. Helens ash, *Science*, 211.
- Patterson, E.M. and C.O. Pollard, 1983. Optical properties of the ash from El Chicho'n volcano, *Geophys. Res. Lett.*, 10(4): 317-320.
- Patterson, E.M., 1975. Optical absorption coefficients of soil aerosol particles and volcanic ash between 1 and 16um, The 2nd Conference on Atmospheric Radiation, *American Meteorological Society*, 177-180.
- Pollack, J.B., O.B. Toon, and B.N. Khare, 1973. Optical properties of some terrestrial rocks and glasses, *Icarus*, 19: 372-389.

- Prata, A.J, 1989. Observations of volcanic ash clouds in the 10-12-micron window using AVHRR/2 Data, *Int. J. Remote Sens.*, 10: 751-761.
- Ricchiazzi, P., S. Yang, C. Gautier, and D. Sowle, 1998. SBDART: A research and teaching software tool for plane parallel radiative transfer in the earth's atmosphere, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79: 2101-2114.
- Volz, F.E., 1973. Infrared optical constants of ammonium sulfate, Sahara dust, volcanic pumice and fly ash, *Appl. Opt.*, 12: 564-568.
- Warren, S.G. and Brandt, R.E., 2009. Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave: A revised compilation, *J. Geophys. Res.*, 113(D14), DOI: 10.1029/2007JD009744.
- World Meteorological Organization(WMO), 1986. *A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation, WCP-112 ~World Climate Research Program*, CAS, Radiation Commission of IAMAP, Boulder, Colo., 1986.