월면 디지털 영상 분석을 이용한 대기 광학두께 산출

정 명 재[†]

강릉원주대학교 대기환경과학과/자연과학연구소

Retrieval of Atmospheric Optical Thickness from Digital Images of the Moon

Myeong-Jae Jeong[†]

Department of Atmospheric and Environmental Sciences/
Natural Science Research Institute, Gangneung-Wonju National University

Abstract : Atmospheric optical thickness during nighttime was estimated in this study using analysis on the images of the moon taken from commercial digital camera. Basically the Langley Regression method was applied to the observations of the moon for the cloudless and optically stable sky conditions. The spectral response functions for the red(R), green(G), and blue(B) channels were employed to derive effective wavelength centers of each channel for the observations of the moon, and the correspondent Rayleigh optical thickness were also calculated. Aerosol optical thickness (AOT) was calculated by subtracting Rayleigh optical thickness from the atmospheric optical thickness derived from the Langley regression method. As there are only handful of nighttime AOT observations, the AOT from the moon observations was compared with the AOT from sun-photometers and the MODIS satellite sensor, which was taken several hours before the moon observations of this study. As a result, the values of AOT from moon observations agree with those from sun-photometers and MODIS within 0.1 for the R, G, B channels of the digital camera. On the other hand, Ångström Exponent seems to be subject to larger errors due to its sensitiveness to the spectral errors of AOT. Nevertheless, the results of this study indicate that the method reported in this study is promising as it can provide nighttime AOT relatively easily with a low cost instrument like digital camera. More observations and analyses are warranted to attain improved nighttime AOT observations in the future.

Key Words : aerosol optical thickness, Langley regression, digital camera, sun-photometer, moon

요약 : 이 연구에서는 상용 디지털 카메라를 이용하여 야간에 촬영된 월면 영상을 분석하여 야간의 대기 광학두께와 에어로솔 광학두께를 추정하였다. 기본적으로 랑리회귀법을 이용하였으며 구름이 없고 대기의 광학적 특성이 비교적 안정한 날에 관측을 수행하였다. 카메라의 적색(R), 녹색(G), 청색(B) 채널의 파장별 반응함수를 이용하여 월광관측에 대한 유효 중심파장 및 레일리 광학두께를 추정하였으며, 랑리 회귀법에서 유도된

접수일(2013년 9월 14일), 수정일(1차 : 2013년 10월 21일), 게재확정일(2013년 10월 21일).

[†] 교신저자: 정명재(mjeong@gwnu.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

대기광학두께로부터 레일리 광학두께를 제하여 에어로솔 광학 두께를 산출하였다. 야간에는 독립적인 방법으로 산출된 검증자료나 다른 에어로솔 광학두께 자료가 거의 없으므로 월면 관측이 이루어지기 수 시간 전의 주간에 정밀한 태양분광광도계로 측정된 에어로솔 광학두께 자료와 MODIS 위성센서 관측으로부터 산출된 에어로솔 광학두께 자료를 본 연구에서 월면 관측을 통해 산출된 자료와 비교하였다. 비교 결과 R, G, B 채널에서 대략 0.1정도의 오차 범위에서 월면 영상분석을 통해 에어로솔 광학두께의 추정 가능성이 있음을 알 수 있었다. 단, 대기 중의 에어로솔 입자들의 크기를 나타내는 모수인 앙스트롬지수(Ångström Exponent)는 파장별 광학두께의 작은 오차에도 큰 오차를 가질 수 있기 때문에 에어로솔 광학두께의 오차에 비해 비교적 큰 오차를 보일 수 있음이 나타났다. 그럼에도 불구하고, 야간의 에어로솔 광학두께 자료가 많지 않은 현실에서 저비용으로 월면 관측을 통하여 에어로솔 광학두께를 산출할 수 있는 가능성을 찾았다는 점에서 본 연구의 의의가 있으며 앞으로 보다 많은 관측과 분석을 통해 보다 향상된 야간 에어로솔 광학두께 추정이 가능할 것으로 보인다.

1. 서론

에어로솔(Aerosol)은 대기 중에 부유하는 고체 혹은 액체상의 미세한 입자로서 일반적으로 그 크기는 0.001~10마이크로미터 정도의 범위에 분포하며, 그 양은 지표부근에서 1cm³에 적게는 십여 개에서 많게는 수만개 정도가 존재한다. 이러한 에어로솔 입자들은 다양한 자연과정(natural processes) 또는 인간 활동에 의하여 발생하며 그 구성 성분이나 크기 등에 따라서 대기 중에서 각기 다른 체류시간을 가지면서 발생원으로부터 바람을 타고 수송되어 환경 및 기후에 영향을 주고 있다(Seinfeld and Pandis, 2006; IPCC, 2001, 2007). 또한 에어로솔은 태양복사에너지를 흡수하거나 산란하여 지구 시스템 내에서 가장 중요한 에너지원의 하나인 태양복사에너지를 대기와 지표에 분배(disposition)하는 역할을 하며, 다른 한편으로는 구름 방울의 씨앗 역할을 함으로써 구름의 미세물리학 및 광학적 특성에 영향을 줌으로써 강수과정에 영향을 주어 지구 시스템 내의 에너지와 물순환에도 간접적으로 영향을 미치고 있다(예, Lee and Feingold, 2010; IPCC, 2007). 특히 최근 중국의 산업화로 인하여 꾸준히 증가해온 온실기체의 방출과 더불어 증가해온 에어로솔이 극동아시아 지역뿐만 아니라 태평양을 건너 북아메리카지역까지도 수송됨으로써(Fischer *et al.*, 2009) 지구 시스템의 각종 물리 및 화학 과정에 영향을 주어 지역 기후시스템의 변화를 가져오는 것으로 파악되고 있다(IPCC, 2001, 2007).

이러한 에어로솔의 지구 시스템에 미치는 효과를 파악하는 데에는 지상과 항공, 그리고 인공위성 등을 활용한 다양한 관측 자료가 필요하다. 이를 위하여 미국의

NASA나 유럽의 ESA 등의 기관들에서는 주로 지구에 대하여 극궤도 또는 정지궤도를 가지는 기상 또는 환경 위성 등을 활용하여 에어로솔의 시공분포를 관측하고 있으며(King *et al.*, 1999; Kaufman *et al.*, 2002; Levy *et al.*, 2007; Hsu *et al.*, 2013) 우리나라에서는 2010년 하반기부터 운용되고 있는 정지궤도 기상위성인 천리안을 이용하여 에어로솔을 관측하려는 시도를 해오고 있다(예, Lee *et al.*, 2010). 다른 한편으로는 지상에 고정 설치하거나 개인이 휴대/이동하여 관측 가능한 태양분광광도계 등을 사용하여 각 관측지점에서 에어로솔 양의 시간에 따른 변동을 측정하기도 한다(예, Holben *et al.*, 1998; Smirnov *et al.*, 2009; Noh and Lee, 2013). 하지만 이러한 대부분의 관측 방법들은 주간에 상당한 양의 태양복사가 존재할 때 에어로솔에 의해 태양복사가 산란되거나 흡수되는 정도를 위성 또는 지상 관측기기로 측정하여 대기 중의 에어로솔 양을 측정하게 되므로 야간에는 에어로솔을 측정하는 방법이나 기술에 대한 많은 개발이 이루어지지 않았으며 선진 연구자들에 의해 제작된 특수한 태양, 달 및 별 분광광도계(Sun, Moon, and Star photometer) 장비로 실험적인 시도가 이루어져 온 상황이다(예, Herber *et al.*, 2002; Perez-Ramirez *et al.*, 2008; Berkoff *et al.*, 2011). Herber *et al.*(2002)이 노르웨이에서 태양, 달, 별 분광광도계를 함께 이용하여 에어로솔 광학두께를 낮과 밤에 연속적으로 관측한 사례가 있으며, Perez-Ramirez *et al.*(2008)은 Charge-Coupled Device(CCD) 카메라를 기반으로한 별 분광광도계를 개발하였고 랑리회귀법을 활용한 기기 검정(calibration) 방법을 제시하였으며, 야간에 수송되고 있는 스모크(smoke) 에어로솔을 관측하기도 하였다. Berkoff *et al.* (2011)은 주간에

에어로솔을 측정하도록 고안되어 Aerosol Robotic Network (AERONET; Holben *et al.*, 1998)의 주 관측기기로 세계 도처에서 에어로솔을 관측하는데 활용되어온 Cimel-318 태양분광광도계를 이용하여 달을 관측함으로써 기존의 태양분광광도계를 야간에 활용할 수 있는 가능성을 보인 바 있다. 그러나, 이러한 에어로솔 측정기들은 대부분이 고가(高價)의 장비로서 그 개발 및 운영 비용도 적지 않다.

최근 급속도로 발달해온 CCD 수감부 기술 덕분에 국내외에서 고성능의 디지털 카메라(digital camera)가 대중에 대량으로 공급 되었으며 일반적인 디지털 카메라의 최종 산물인 8비트(bit)의 data depth를 가진 JPEG 포맷을 가진 영상(사진)에 더하여 10비트에서 14비트에 이르는 상당한 data depth를 가진 RAW 포맷으로 저장할 수 있는 디지털 카메라도 사진가가 아닌 일반인들이 구입할 수 있는 가격에 공급되고 있다. 이에 더하여 100만 개가 훌쩍 넘는 화소(pixel)들을 가진 고해상도의 영상을 디지털 자료의 형태로 손쉽게 얻을 수 있게 됨으로써 디지털 카메라는 이제 단순히 사진을 찍는 도구 이상의 작업에 사용할 수 있는 광학기로서 인식되어지고 있다. 국외에서는 Lebourgeois *et al.* (2008)이 Canon[®] 400D 디지털 카메라를 사용 농작물이 자라고 있는 경작지를 원거리에서 촬영하여 JPEG 및 RAW 자료 포맷으로 저장한 후, 이렇게 얻은 적색-녹색-청색(Red-Green-Blue; RGB) 영상들을 각각의 빛의 성분(light-color components, 즉 적색, 녹색 및 청색)으로 분해한 뒤 분석함으로써 디지털 카메라를 다채널(multispectral) 센서로 사용할 수 있는 가능성에 대해 긍정적인 결과를 얻어 내었다. 한편, Baumer *et al.* (2008)은 디지털 파노라마(panorama) 카메라를 이용하여 시정(visibility)를 추정하는 방법을 개발하였다. 이들은 관측 지점으로부터 다양한 거리에 위치해 있는 인공 및 자연 구조물들(예, 건물, 산 등)을 시정이 아주 좋은 맑은 날 촬영하여 각 인공 및 자연 구조물이 각각의 주변 환경과 이루는 경계선(edge)을 찾아내어 JPEG 포맷으로 저장하여 기존 자료로 삼고, 시정이 좋지 않은 경우 먼곳의 구조물들이 그 주변 환경과 이루는 경계선이 모호해지는 현상을 이용하여 경계선을 분명히 찾을 수 없게 되는 위치에 있는 구조물이 관측 장소로부터 떨어진 거리를 시정으로서 산출하는 알고리즘을 개발함으로써 인간의 시각에 의존하는 시정 관측에

비해 객관적이면서도 자동화된 방법으로 시정을 산출할 수 있는 방법을 제시하였다. Xie *et al.* (2008)은 미국의 Pheonix 지역에서 1600x1200 화소 해상도를 지닌 영상을 디지털 카메라로 매 15분 마다 반복 촬영하여 공간영역(spatial domain)과 주파수 영역(frequency domain)에서의 각 영상들의 대비(contrast)의 변화를 통하여 시정과 연관된 변수인 소산 계수(extinction coefficient)를 추정하는 방법을 제시한 바가 있다. 국내에서는 Kim and Kim (2002)이 디지털 영상분석을 통한 시정 추정에 대한 연구를 수행하였고, 아날로그 카메라를 이용하여 필름에 찍힌 영상을 슬라이드로 변환 후 이를 다시 TIFF 포맷을 가진 디지털 영상 파일로 전환하여 이 영상들에 대한 Hue, Saturation, 및 Intensity (HSI)를 분석한 후 이 결과를 지상의 에어로솔 전문 관측 기기들로부터 측정된 소산계수 및 산란계수(scattering coefficient)와 비교하여 대기 중의 연무(haze)가 사진 영상의 hue의 변화에는 큰 영향을 미치지 않으나 saturation의 변화에는 큰 영향을 미치는 것을 보인 연구(Kim and Kim, 2005)도 있다. 하지만 국내외에서 야간의 시정, 대기질(air quality), 혹은 에어로솔 광학 두께 등을 추정할 수 있는 방법에 대해서는 많은 연구가 이루어지지 않은 것으로 파악된다.

본 연구에서는 가장 대중적인 광학 장비라고 할 수 있는 디지털 카메라(digital camera)를 이용하여 저 비용으로 야간에 대기 중의 에어로솔의 양을 파악하는 방법을 개발하고자 한다. 과거 상용 디지털 카메라를 시정(visibility)이나 지표 특성에 대한 원격탐사에 이용하려는 연구들(예, Lebourgeois *et al.*, 2008; Kim and Kim, 2002; Xie *et al.*, 2008; Baumer *et al.*, 2008)이 있었으나 월면 촬영을 이용한 대기광학두께 또는 에어로솔 광학두께 추정에 대한 연구는 거의 이루어진 바가 없다. 따라서 이 연구에서는 저가의 디지털 카메라로 대기 및 에어로솔 광학두께를 계산하는 방법을 제시하고 그 초기 결과를 보고하고자 한다.

2. 자료 획득 및 분석 방법

1) 카메라의 특성

이 연구에서는 월면 관측을 위해 상용 디지털 카메라(Canon EOS 50D)를 사용하였다. 이 연구에 사용된 카

Fig. 1. Spectral response function of Canon EOS 50D Digital Single-Lens Reflex (DSRL) camera[Data taken from Spigulis *et al.* (2010)]. The lines are color-coded: blue, green, and red lines represent the normalized spectral responses of the camera optical systems to create RGB images to the incident spectral irradiance.

메라의 파장별 반응함수(Spigulis *et al.*, 2010)는 Fig. 1에 나타내었다. 디지털 카메라로 월면 관측시 적색(R), 녹색(G), 청색(B) 채널의 유효중심파장(λ_c)은 임의의 적분 구간 $[\lambda_1, \lambda_2]$ 에 대해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\lambda_c = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Psi_{\lambda} F_{0,\lambda}^{\text{sun}} \rho_{\lambda}^{\text{moon}} \lambda d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Psi_{\lambda} F_{0,\lambda}^{\text{sun}} \rho_{\lambda}^{\text{moon}} d\lambda} \quad (1)$$

여기서 Ψ_{λ} , $F_{0,\lambda}^{\text{sun}}$, $\rho_{\lambda}^{\text{moon}}$ 는 각각 카메라의 파장별 반응함수, 대기 밖에서의 파장별 태양복사량, 파장별 월면 반사도를 나타낸다. 파장별 월면 반사도는 Kieffer and Stone(2005)의 RObotic Lunar Observatory(ROLO) 자료를 이용하였다. ROLO 자료는 최근 달 관측 영상을 이용하여 천리안 위성의 기상영상기 가시채널 검출기의 성능 분석에도 사용된 바가 있다(Seo and Jin, 2013). 식 (1)로부터 이 연구에 사용된 카메라 R, G, B 채널의 월면 관측에 대한 유효중심파장은 각각 587.6 nm, 531.9 nm, 479.6 nm로 계산되었다.

상업용 디지털 카메라에서 획득된 영상은 일반적으로 R, G, B 채널에서 각각 8비트(=256단계)의 data quantization level을 가지는 JPEG 포맷의 파일로 저장된다. 따라서 월광의 강도 변화를 256단계의 범위 내에서 관측할 수 있도록 카메라의 노출을 적당히 설정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 보름달의 경우 ISO 1600의 감도에서 F5.4에서 1/1600초의 노출을 주는 것이 랑리 회귀법을 적용하여 대기광학두께를 추정하는 데 적합함을 경험적으로 파악하였다. 반달의 경우에는 대기 조건에 따라 1/500초 또는 1/1000초 정도의 노출을 주어

관측할 수 있다. 카메라는 센서에 복사에너지가 도달함에 따라 생성된 전류(또는 전압)의 크기에 검정상수를 적용하여 에너지 단위로 환산하는 분광광도계와는 달리 월광의 광도를 에너지 단위로 환산하기가 어렵다. 그러나 다음 절에 소개되는 랑리 회귀법을 이용하면 검정상수를 따로 구할 필요 없이 대기 밖에서 입사하는 월광의 강도와 지상에서 관측된 월광의 상대적 강도 차이를 이용하여 대기의 투과율을 추정할 수 있는 장점이 있다. 단, 관측시간 동안 노출 시간 및 카메라의 세팅을 동일하게 유지하여 상대적인 월광의 강도 차이를 관측할 수 있도록 하여야 한다. 또한, 카메라로 월면을 촬영할 때, 월면을 항상 촬영범위의 중심에 오도록 하여 카메라 렌즈와 직달 월광의 진행방향이 서로 수직을 유지할 수 있도록 하였다.

2) 랑리 회귀법

랑리 회귀법(Langley regression method; Iqbal, 1983)은 Beer-Lambert-Bouguer의 법칙에 근거하며 시간별로 관측된 복사에너지 자료에 선형 회귀 분석을 하여 대기의 광학적 특성을 분석하는 방법으로서 많은 연구에서 활용되어 왔다(예, Harrison *et al.*, 1994; Cho *et al.*, 2003).

$$I_{\lambda}^m = I_{0,\lambda}^n \exp(-\delta_{\lambda} m) \quad (2)$$

여기서 I_{λ}^m , $I_{0,\lambda}^n$, δ_{λ} , m 은 각각 지표면 부근에서 복사의 진행방향에 대해 수직인 면에 입사하는 파장별 복사량, 대기 밖에서 복사의 진행방향에 수직인 면에 입사하는 파장별 복사량, 파장별 대기광학두께, 그리고 상대광학공기질량을 나타낸다. 식 (2)의 양변에 자연로그를 취하면

$$\ln I_{\lambda}^m = \ln I_{0,\lambda}^n - \delta_{\lambda} m \quad (3)$$

식 (3)에서 주어진 파장에서 관측된 복사에너지는 대기광학두께를 기울기로 하는 상대광학공기질량에 대한 직선의 함수로 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 이때, 대기 밖에서 입사하는 태양복사 또는 달에서 반사되어 지구 대기에 입사하는 복사에너지는 관측이 이루어지는 시간동안 일정한 값을 갖는다고 가정할 수 있다. 상대광학공기질량(m)은 다음과 같이 정의된다.

$$m = \int_0^{\infty} \rho(s) ds / \int_0^{\infty} \rho(z) dz \quad (4)$$

진행하는 복사에너지의 천정각이 작은 때(예, $\theta \leq 60^\circ$)에는 평면 대기를 가정할 경우, $m \approx \sec \theta$ 와 같이 간

단히 계산될 수 있다. 하지만 지구의 대기는 곡면을 이루고 그 밀도의 분포가 고도에 따라 지수함수적으로 감소하므로 천정각이 증가함에 따라 이 근사식은 상당한 오차를 가지게 된다. 레일리 대기(Rayleigh atmosphere)에 대하여 Kasten (1966)은 상대광학공기질량을 식(5)와 같은 천정각의 함수로 나타내었다.

$$m_r = \frac{1}{\cos \theta + 0.15(93.885 - \theta)^{-0.1253}} \quad (5)$$

여기서 θ 는 태양 또는 달의 천정각을 나타낸다. 이 연구에서는 미국 해군관측소(United States Naval Observatory, 2012)의 소프트웨어를 이용하여 강릉원주대학교 상공에서 매 관측시간별 달의 천정각을 구하고, 그 결과를 식(5)에 대입하여 각 관측시간에서의 월광에 대한 대기의 상대광학공기질량을 계산하였다.

랑리 회귀법은 대기 밖에 입사하는 복사에너지의 상대적인 강도를 매 시각 관측되는 복사에너지와 같은 단위로 구할 수 있으므로 태양분광광도계의 검정 또는 대기 밖 태양복사량의 산출에 이용된다(예, Cho *et al.*, 2003). 특히 달은 약 29일 주기로 상변화가 지속적으로 이루어지고 지구와의 거리가 지속적으로 변화하므로 지구대기 밖에서 입사하는 월광의 강도를 정확히 결정하는데 어려움이 있으나 랑리 회귀법의 이러한 장점을 활용하면 달의 상변화나 지구와의 거리변화를 고려하지 않고 관측 시점의 지구 대기 투과율을 비교적 간편하게 계산할 수 있다.

3) 에어로솔 광학두께 산출 방법

일반적으로 대기광학두께는 주어진 파장영역에서 진행되는 복사에너지를 감소시키는 대기의 성분들의 종류 및 그 양에 의존하여 변화하므로 각 대기 조성성분에 의한 광학두께의 합으로서 표현할 수 있다. 가시광선 파장영역에서는 공기분자 산란(레일리 산란) 광학두께(δ_r^s), 오존 광학두께(δ_o^s), 에어로솔 광학두께(δ_a^s), 그리고 수증기 광학두께(δ_w^s)의 합으로서 대기광학두께를 근사적으로 나타낼 수 있다.

$$\delta_\lambda \simeq \delta_r^s + \delta_o^s + \delta_a^s + \delta_w^s \quad (6)$$

보다 엄밀하게는 고도에 따른 각 조성성분의 분포가 다르므로

$$\delta_\lambda m \simeq \delta_r^s m_r + \delta_o^s m_o + \delta_a^s m_a + \delta_w^s m_w \quad (7)$$

여기서 m_r , m_o , m_a , m_w 는 각각 건조 공기분자(예, 질소, 산소, 아르곤), 오존, 에어로솔, 수증기에 대한 상대광학공기질량을 의미한다. 선행 연구들(Robinson, 1966; Kasten, 1966)에 따르면 오존 및 수증기에 대한 상대광학공기질량은

$$m_o = \frac{1 + z_o/r_E}{[\cos^2 \theta + 2(z_o/r_E)]^{0.5}}, \quad (8)$$

$$m_w = \frac{1}{\cos \theta} + 0.0548(92.650 - \theta)^{-1.452} \quad (9)$$

와 같이 각각 나타낼 수 있으며, 여기서 z_o 와 r_E 는 각각 오존농도의 최대값이 나타나는 고도와 지구의 반지름을 나타낸다. 에어로솔은 그 공간분포의 변화가 크므로 모든 경우를 간단한 식으로 나타내는 것이 어렵다. 따라서, 공기분자에 대한 상대광학공기질량을 사용하는 경우가 많으며(예, Iqbal, 1983), 이 연구에서도 같은 방법을 이용하였다. 랑리 회귀법을 이용하여 대기광학두께를 구한 후, 식 (5, 7-9)로부터 에어로솔 광학두께는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\delta_\lambda^s \simeq \delta_\lambda - \delta_r^s - \delta_o^s m_o - \delta_w^s m_w / m_r \quad (10)$$

여기서 레일리 광학두께는 Leckner (1978)의 식 $\delta_r^s = 0.008735\lambda^{-4.08}$ 을 이용하거나 Bucholtz (1995)의 식을 이용하여 계산할 수 있다. 본 연구에서는 중위도 여름의 대기조건에 대해 후자의 식을 사용하였다. 한편, 에어로솔 광학두께를 계산할 때 필요한 야간의 오존 및 수증기의 광학두께 값들의 경우에는 본 연구에서 활용할 수 있는 관측 자료가 없으므로 기후값을 사용하였다. 가시광선 파장영역에서 오존 및 수증기의 광학두께는 레일리 또는 에어로솔 광학두께 값에 비해 상대적으로 작으므로 큰 오차를 야기하지는 않을 것으로 판단된다.

4) 월면 영상의 획득 및 자료 처리

랑리 회귀법을 이용하여 대기광학두께를 산출하기 위해서는 월출(태양의 경우에는 일출) 후부터 달의 남중 무렵까지 또는 남중 무렵부터 월몰 때까지 여러 번의 반복 관측이 이루어져야 한다. 반복 관측은 등 천정각(또는 등 고도각) 시간간격 보다는 등 상대광학공기질량 간격으로 이루어지는 것이 효과적이다. 월출 직후부터 1-2시간 동안에는 상대광학공기질량 값의 변화가 남중 시간 무렵에 비해 상당히 크므로 달의 고도각이 낮은 시간(고도각 < 30°, 또는 달의 천정각 > 60°) 동안 비교적

많은 횟수의 관측이 이루어지게 된다. 대기광학두께를 산출하기 위해서는 관측이 이루어지는 수 시간 동안 대기의 광학적 특성이 비교적 적은 변화를 보이며 안정한 조건을 유지하여야 한다. 이론적으로는 다른 상대광학 공기질량 조건에서 관측된 두 개의 자료만 있으면 대기 광학두께를 추정할 수 있으나 보다 안정된 광학두께의 도출을 위하여 상대광학공기질량의 값이 1.5~6.0사이에서 4회 이상의 관측이 있을 때에 한하여 대기광학두께의 산출을 시도하였다.

3. 결과 및 토의

1) 월면 탐지 및 월광 강도의 결정

Fig. 2는 2013년 4월 27일 강릉원주대학교 생명과학1호관 옥상에서 22시10분부터 23시 40분까지의 1시간 30분 동안 디지털 카메라로 촬영한 9개의 영상을 나타낸 것이다. 카메라촬영 시 ISO 값은 1600으로 노출 시간은 1/1600초로 세팅하여 촬영하였다. 이날 월출은 21:00에 이루어 졌으며, 그림에서 첫 번째 달의 영상이 촬영된 22:10에는 달의 고도각이 11° (달의 천정각 79°)였고, 그림의 마지막 영상이 촬영된 23:40에는 달의 고도각이 23.1° 였다. 이 때의 월령은 보름에 근접하여 달의 밝은 부분의 면적이 보름의 경우의 96%에 해당하였다. 그림에 나타난 바와 같이 시간이 경과함에 따라 달의 고도각이 높아지면서 달의 밝기가 점차 밝아지는 것을 확인할 수 있다. 이것은 월광이 대기를 투과하는 거리가 시간에 따라 점차 짧아지면서 대기 중에서 소산(산란+흡수)되는 광량이 점차 감소하기 때문이다. 그림으로부터 정성적으로 랑리 회귀법이 적용될 수 있음을 추정할 수 있다.

디지털 카메라로 촬영된 영상에서 월면의 밝기는 달의 지역에 따라 다른 것을 쉽게 확인할 수 있다(예, Fig. 2, Fig. 3). 디지털 카메라의 영상은 각 채널에서 8비트로 저장이 되는데 이는 일반적으로 에어로솔 광학두께의 산출에 이용되는 측기들이 가지는 10비트-14비트에 비해 비교적 낮은 수치이다. 그러나 월면 영상 전체의 밝기를 평균화게 되면 월면 영상 중 일부 화소만을 택하여 이를 달의 밝기로 하여 사용하는 것 보다는 보다 안정적으로 각기 다른 시간에 획득된 달의 밝기와 상대적인 비

Fig. 2. Images of the moon taken from a digital camera at the roof of Life Science building #1, Gangneung-Wonju National University on 27 April 2013. The numbers next to each moon image stands for the local time of each observation.

Fig. 3. Images of the moon (left panel) and the corresponding moon mask derived from image analysis on the digital images of the moon.

교를 할 수 있다. 따라서 이 연구에서는 촬영된 영상에서 월면에 해당하는 화소들의 위치를 찾아내어 이러한 월면 화소들의 밝기의 평균을 구하여 각 관측시점의 달의 밝기로 결정하였다. 이를 위해 R, G, B 각 채널의 밝기와 각 채널의 밝기 비로부터 월면 화소를 정하였고 그 결과(moon mask)를 Fig. 3의 오른쪽에 나타내었다. 그림에서 보이는 바와 같이 달이 밝은 경우에는 월면 화소를 잘 찾아 낼 수 있으나, 달이 아주 어두운 경우에는 월면 영상에서 어두운 부분인 달의 바다 부분의 일부가 잘 탐

지되지 않는 문제점이 있다. 이러한 경우 달의 밝기의 평균값을 구하는데 사용되는 화소의 수가 달라지면서 랑리 회귀법을 이용하여 대기광학두께를 구하는 데 오차를 야기할 수 있다. 이렇게 달이 너무 어두운 경우에는 이 시각에 관측된 자료를 제거할 필요가 있다. 탐지해내지 못하는 월면 화소의 수가 적은 경우에는 많은 수의 화소에 대한 밝기를 평균하므로 그 오차가 크지 않은 것으로 보인다.

2) 랑리 회귀법을 이용한 대기광학두께 및 에어로솔 광학두께의 산출

2013년 4월 27일, 강릉원주대학교 강릉캠퍼스의 생명과학1호관 옥상에서 디지털 카메라로 촬영한 영상으로부터 월면 화소를 탐지하여 월면 화소에서의 각 채널의 밝기를 평균한 값을 Y축의 값으로 하고, 각각의 월면 영상이 촬영된 시각으로부터 계산된 달의 천정각으로부터 구한 상대광학공기질량 값을 X축으로 하여 그림을 그린 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 각각의 관측점들이 각 채널별로 거의 일직선상에 위치함을 알 수 있다. 랑리 회귀법에 따르면 이러한 점들에 대해 최소제곱법을 이용하여 선형 회귀분석으로부터 얻은 직선의 식에서 기울기(식 3에서 δ)는 대기의 총 광학두께에 해당하며, 절편(즉, 상대광학공기질량의 값이 0이 되는 점)은 대기가 없을 경우의 달의 밝기, 즉 대기 밖에서 입사하는 월광 강도에 해당하는 값이 된다. 그림에서 세 개의 채널 모두에서 결정계수(R^2) 0.99이상의 값을 보여, 이날 월면 촬영이 이루어진 1시간 반에 걸쳐 대기 광학두께가 거의 변화하지 않았음을 알 수 있으며, 이러한

Fig. 4. Langley regression analysis applied to the images of the moon taken from a digital camera. Red, green, and blue symbols represent the measurements at red (R), green (G) and blue (B) channels of the digital images. Dotted lines are the regression lines. The unit of I_{moon} is digital count of the images of the camera.

결과로부터 이날의 관측이 랑리 회귀법으로 대기광학두께를 구하는데 있어서 일차적으로 요구되는 가정을 잘 만족함을 알 수 있다.

위에서 분석된 4월 27일의 경우와 같은 방식으로 랑리 회귀법을 이용하여 3회의 관측이 더 이루어졌으며, 그 결과는 Table 1에 요약하여 나타내었다. 표에서 R, G, B (유효 중심 파장 각각 587.6 nm, 531.9 nm, 479.6 nm) 채널에서의 총 대기광학두께는 청색 파장의 경우 0.29에서 0.64 정도 사이의 값을 보이고 있다. 이 광학두께의 값들은 월광이 천정방향에서 비추다고 했을 때 대기 밖의 월광 중 각각 약 75%와 53% 정도가 지표까지 직접 도달할 수 있음을 의미한다.

Table 1. Total atmospheric optical thickness (TOT; $\tau_{\lambda}^{\text{Atm}}$), ozone optical thickness (OOT; $\tau_{\lambda}^{\text{Ozo}}$), and aerosol optical thickness (AOT; $\tau_{\lambda}^{\text{Aer}}$) derived from the images of the moon taken from a digital camera by using the Langley regression technique

Channel	Optical Thicknesses	Date			
		2011-11-15	2011-12-10	2013-03-29	2013-04-27
Red (R)	τ_R^{Atm}	0.211	0.130	0.347	0.340
	τ_R^{Ozo}	0.028	0.031	0.031	0.033
	τ_R^{Aer}	0.110	0.026	0.243	0.234
Green (G)	τ_G^{Atm}	0.486	0.146	0.391	0.428
	τ_G^{Ozo}	0.019	0.021	0.021	0.022
	τ_G^{Aer}	0.358	0.015	0.261	0.297
Blue (B)	τ_B^{Atm}	0.644	0.292	0.406	0.611
	τ_B^{Ozo}	0.007	0.008	0.008	0.008
	τ_B^{Aer}	0.470	0.117	0.231	0.436

식 (10)에 나타난 방법을 이용하여 계산된 에어로솔 광학두께는 Table 1의 오른쪽 열에 제시하였다. 총 대기 광학두께 중 에어로솔 광학두께를 제외하고 가장 중요한 역할은 공기분자의 산란에 의한 레일리 광학두께이다. 1기압에서 각 채널의 유효중심파장에 대한 레일리 광학두께는 R, G, B채널에 대해 각각 0.0729, 0.1094, 그리고 0.1673이다. 일반적으로 지표 기압의 변화에 따라 레일리 광학두께도 달라지지만 이 연구에서는 지표 기압변화의 효과는 다른 관측 요소에 비해 작은 영향을 주는 것으로 판단하여 고려하지 않았다. Table 1에 나타난 것과 같이 에어로솔 광학두께는 일반적으로 파장이 짧아짐에 따라 점차 그 값이 커지는 것을 알 수 있다.

3) 산출된 에어로솔 광학두께의 검증

대기 광학두께 (혹은 에어로솔 광학두께)는 지상으로 부터 대기 상한에 이르기까지 존재하는 대기 조성 성분 (혹은 에어로솔)의 양과 복사적 특성에 따라 파장의 함수로서 변화하는 양으로서 일반적으로 대기밖에 입사하는 태양복사 에너지가 대기를 통과하여 얼마만큼의 에너지가 지표에 도달하는 지(즉, 투과율)를 측정함으로써 산출될 수 있다. 지구 대기 밖에서 입사하는 태양의 파장별 복사강도는 비교적 안정하여 지구-태양간의 거리인자 등만을 고려하면 비교적 높은 정확도로 추정할 수 있다. 따라서, 주간에는 자동 또는 수동으로 작동하는 태양분광광도계를 사용하여 대기 광학두께 및 에어로솔 광학두께를 ± 0.02 정도의 상당히 높은 정밀도로 측정할 수 있다(예, Eck *et al.*, 1999). 반면에 야간에는 대기의 투과율을 측정하는 데 필요한 안정되기도 잘 알려진 광원이 많지 않다. 달의 경우는 위상이 약 29일의 주기로 변화하는데다가 지구-달 사이의 거리가 변화하고 달-태양 사이의 거리도 각기 다른 주기로 변화하므로 태양에 비해 대기 밖에서 입사하는 정밀한 광도의 추정에 어려움이 있다. 또한 달을 정밀하게 추적하는 로봇 또한 고도의 정밀도가 요구되는 고가의 장비로서 여러 장소에서 관측할 수 있는 많은 장비를 구축하는 데에도 경제적으로 어려움이 많다. 따라서 야간에는 일부 고가의 라이더(Lidar) 장비가 있는 장소를 제외하고는 거의 광학두께에 대한 관측이 없는 실정이다. 그러므로 비교적 저가의 간단한 측정 방법들이 연구될 필요가 있다고 하겠다. 다른 한편으로는 이러한 이유로 야간에 산출되

Fig. 5. Spectral aerosol optical thickness (AOT) derived from the moon observations (red symbol and line) and that observed from the Aerosol Robotic Network (AERONET; Holben *et al.*, 1998; data shown in blue and green symbols and lines). The AERONET AOT data are averages of the available data acquired during the daytime for about the three hours closest to the moon observations. Error bars show the corresponding standard deviations. The AOT based on the images of the moon was taken on the night of 27 April 2013.

는 광학두께의 정확도를 검증할 자료가 거의 없다는 문제점이 있다. 이 연구에서는 주간에 관측된 그 정확도가 많은 연구에 의해 검증된 에어로솔 광학두께 자료와 비교함으로써 본 연구의 결과를 간접적으로 검증하는 방법을 취하고자 한다. 이 방법은 에어로솔의 시간변동이 큰 경우, 예를 들어 황사가 수송되거나 산발등에 의한 스모크, 또는 고농도의 오염물질이 수송되는 경우에는 사용할 수 없으나, 랑리 회귀법을 적용해 볼 수 있는 대기 조건과 같이 에어로솔의 변동성이 비교적 작은 경우에는 적용될 수 있을 것이다. 4월 27일 밤에 랑리 회귀법을 이용한 월면 관측으로부터 세 채널에서 구한 에어로솔 광학두께를 이 관측과 가장 근접한 3시간 동안의 당일(4/27) 낮시간과 다음 날(4/28) 오전에 강릉원주대에 위치한 AERONET에서 측정된 에어로솔 광학 두께와 비교한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 각 3시간 동안의 에어로솔 광학두께의 표준편차를 error bar로 표현하였다. 이 error bar는 에어로솔 광학두께의 시간적 변동성을 나타낸다고 볼 수 있다. 그림에 나타난 바와 같이 월면 영상분석을 통하여 추정된 에어로솔 광학두께는 그 파장별 값의 변화 유형이 AERONET의 파장별 에어로솔 광학두께와 유사하며 약 0.1 정도의 차이를 보이고 있지만 AERONET 광학두께의 시간변동성 범위 내에서 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 이 날의

월면 영상 분석을 통하여 추정된 에어로솔 광학두께는 관측시간의 차이와 해당 일 주변 에어로솔의 시간 변동성을 고려할 때 실제 값과 큰 오차없이 일치한다고 추정할 수 있다. 대기의 총 광학두께(TOT)의 경우에는 주어진 채널들에서 레일리 광학두께와 에어로솔 광학두께의 합이 대기의 총 광학두께값과 거의 일치하므로 에어로솔 광학두께가 잘 일치하는 경우에는 정확하게 산출된 것으로 판단할 수 있다. 따라서 이 이후의 분석에서 대기의 총 광학두께에 대한 언급은 따로 하지 않고 에어로솔 광학두께에 대한 토의만 하기로 하였다.

Fig. 6은 2013년 3월 29일 촬영된 4장의 월면 영상을 바탕으로 바탕으로 에어로솔 광학두께를 구한 결과를 당일 낮시간 동안의 AERONET 광학두께와 비교한 결과를 나타낸다. 이날의 경우 주간의 에어로솔 광학두께는 상당히 낮은 아주 맑은 날씨였으며 야간까지 비슷한 조건이 이어진 상황이었다. AERONET 에어로솔 광학두께의 3시간 동안의 시간 변동성을 나타내주는 error bar의 크기가 매우 작아 이날의 에어로솔 시간 변동성이 작았음을 보여주고 있다. 그림에서 이날 밤에 월면 영상분석을 통해 산출된 에어로솔 광학두께 중 청색(B) 채널의 경우 AERONET과 상당히 잘 일치하는 것을 볼 수 있으나, 녹색(G) 및 적색(R) 채널에서는 약 0.1 정도의 차이가 있는 것을 알 수 있다. 이는 이날의 월면 촬영 시, 디지털 카메라의 세팅이 최적화 되지 못한 데에 그 원인이 있는 것으로 파악된다. 즉 카메라의 감도 범위에 비해서 피사체가 너무 어둡거나 너무 밝을 때 적은 밝기 변화에 대해 센서가 선형적으로 반응하지 못하게 되면 이러한 영상들에 랑리 회귀법을 적용하는 경우 오차가 발생할 수 있다. 실제로 이날의 경우 카메라의 ISO 세팅을 100으로 작게 맞추어 놓은 상태에서 노출 시간을 1/500초로 동일하게 주어 4회 촬영된 월면 영상을 분석하였는데 그림 안에 삽입되어 있는 월면 영상에서 볼 수 있듯이 관측에 이용된 첫 영상과 마지막 영상의 밝기 차이가 그리 크지 않고 상당히 어두움을 알 수 있다. 따라서 이날 에어로솔 광학두께값이 적어 에어로솔에 의한 신호가 작았던 데다가 카메라 세팅이 최적화 되지 않은 것이 Fig. 6에서 나타낸 것과 같은 파장별 에어로솔 광학두께 변화 모양이 AERONET의 경우와 잘 일치하지 않은 원인으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 산출된 에어로솔 광학두께 값은 AERONET과 0.1정도의 오차 범위에

Fig. 6. Spectral aerosol optical thickness (AOT) derived from the moon observations (red symbol and line) and that observed from AERONET (data shown in blue symbols and line). The AERONET AOT data are averages of the available data acquired during the daytime for about the three hours closest to the moon observations. Error bars show the corresponding standard deviations. The AOT based on the images of the moon was taken on the night of 29 March 2013. The inserted images of the moon are the first and the last one of the moon images used to derive the spectral AOT (red symbols+line) shown in this figure.

서 일치하는 것으로 나타났다.

Table 1에 제시된 4개의 월면 영상 관측사례 중 2011년의 두 사례는 이 기간 동안 강릉원주대에 AERONET의 태양분광광도계가 설치되기 이전이어서 검증에 이용할 지상 자료를 구할 수 없었다. 따라서 지상 관측자료보다는 정확도가 떨어지기는 하지만 수 많은 지상자료를 이용하여 그 정확도 및 오차 범위가 통계적으로 검증된 MODIS 에어로솔 자료(Remer *et al.*, 2005; Levy *et al.*, 2007)와 본 연구의 2011년에 관측된 두 사례를 비교하였다. Fig. 7의 왼쪽 영상은 2011년 12월 10일 NASA의 Terra위성에 탑재된 MODIS센서에서 주간에 관측된 한반도 부근의 영상이다. 내륙 지방과 강원 영서지방에는 구름이 끼어 있으나 강릉에 인접한 해안선을 따라 동해안에서는 구름이 전혀 없는 맑은 지역이 있음을 선명히 볼 수 있다. MODIS 에어로솔 광학두께(550 nm) 자료를 보면 동해안 부근에서 광학두께의 값이 0.05~0.15의 범위를 보이면서 상당히 적은 에어로솔이 있었음을 보인다. 이날 야간에 월면 영상 분석을 통해 계산된 파장별 광학두께 값들을 내삽하여 550 nm에서의 광학두께 값을 추정하고 이를 강릉지점을 표시하는 흰색 원안에 MODIS 에어로솔 광학두께와 같은 color scale로 표시하였다. 그림에서 거의 MODIS자료와 본 연구결과와 자

Fig. 7. An RGB image for a granule taken from Terra/MODIS sensor over Korea on 10 December 2011 (left panel), and a map of MODIS AOT at 550nm for the same granule (right panel). AOT based on the moon observation is presented in a small circle at Gangneung, Korea with the same color scale as that for MODIS AOT. The AOT on this figure is interpolated to the value at 550nm from the spectral AOT from the moon observations.

Fig. 8. Aqua/MODIS AOT at 550nm (15 November 2011; left panel) and Terra/MODIS AOT at 550nm (16 November 2011; right panel). AOT at 550nm from the moon observation (nighttime on 15 November 2013) is presented in a small circle located at Gangneung, Korea. The identical AOT data from the moon observation is provided in both panels for comparison with MODIS aerosol data obtained from before and after the moon observation.

료간의 차이가 나지 않는 것으로 보아 본 연구를 통하여 산출된 에어로솔 광학두께가 MODIS 자료와 0.1보다 작은 차이를 가지고 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8에는 2011년 11월 15일 밤에 계산된 에어로솔 광학두께를 같은 날 주간 오후에 NASA의 Aqua위성에 탑재된 MODIS 관측으로부터 산출된 에어로솔 광학두께와 다음날 오전 Terra/MODIS 관측으로부터 산출된 자료와 비교해 보았다. Aqua/MODIS 자료는 본 연구 결과 산출된 에어로솔 광학두께 자료와 0.05 범위 내에서 상당히 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 그러나 다음 날의 Terra/MODIS 에어로솔 자료와 비교해 보면, 가장 근접한 위치에서 산출된 자료와 약 0.1 정도의 광학두께 차이가 있음을 알 수 있다. 한편 다른 시점에 산출된 이 두 MODIS 자료로 미루어 오후와 야간을 거치면서 에어로

솔의 시공간적 변동이 있었음을 추정할 수 있으며, 이로부터 야간 동안의 에어로솔 광학두께는 이 두 MODIS 자료에서 나타난 에어로솔 광학두께 값의 어느 중간 정도 값을 가졌을 가능성이 높음을 파악할 수 있다. 본 연구에서 월면 영상 분석을 통하여 계산된 에어로솔 광학두께 값이 시간적으로 전후에 관측된 이 두 MODIS 산출값의 중간 정도에 해당하는 것으로 보아 이 사례에서도 본 연구에서 야간에 산출된 에어로솔 광학두께 값이 대략 0.1정도의 오차 범위에서 실제값을 추정하고 있을 가능성이 높음을 알 수 있다. 하지만, 향후 보다 정확한 검증과 평가를 위하여 이 연구 방법으로 야간에 산출된 에어로솔 광학두께의 값을 같은 시간에 관측되었다고 간주할 수 있는 라이다 등에 의한 에어로솔 관측 자료와 비교할 필요가 있을 것이다. 이를 위해 앞으로 보다 많

은 관측 자료가 수집되어야 할 것이다.

4) 토의

앞절의 결과로부터 본 연구에서 디지털 카메라로 촬영된 일련의 월면 영상 분석을 통하여 계산된 파장별 에어로솔 및 대기 총 광학두께 값이 약 0.1 정도의 오차 범위에서 실제 값을 추정할 수 있음을 보였다. 따라서 이 결과는 일반 상용 디지털 카메라를 활용하여 저비용으로 여러 지역에서 야간에 에어로솔 광학두께를 추정하는 일의 성공 가능성을 상당히 긍정적으로 보여 준다고 할 수 있다. 반면에 관측자의 다양한 경험을 통하여 카메라의 세팅을 관측일의 대기 및 월광 조건에 적절하게 하여야 오차를 줄일 수 있음은 본 연구 결과의 한 사례에서도 분명히 나타나 있음을 간과해서는 안될 것이다. 또한 월광이 상당히 어두운 경우의 관측에서 월면 화소의 탐지에 있어서의 오류 또한 최종적으로 에어로솔 광학두께를 산출하는 데 있어 랑리 회귀법을 이용한 기율기에 오차를 가져올 수 있으므로 중요한 오차 원인이 될 수 있음을 알 수 있다. 또한 이러한 카메라 세팅 및 월면 화소 탐지의 오차가 각 채널별로 미치는 영향이 다른 점에 주의할 필요가 있을 것으로 보인다. 일반적으로 태양 분광광도계 관측에서 여러 파장에서의 에어로솔 광학두께를 산출한 경우 이 값들로부터 앙스트롬 지수 (Ångström Exponent, α)를 산출할 수 있는데 이는 일반적으로 다음 식과 같이 정의 된다.

$$\alpha = -\log(\tau_{\lambda_1}^{\text{Aer}}/\tau_{\lambda_2}^{\text{Aer}})/\log(\lambda_1/\lambda_2) \quad (11)$$

여기서 $\tau_{\lambda}^{\text{Aer}}$ 는 주어진 파장에서의 에어로솔 광학두께를 나타내며, 따라서 앙스트롬 지수는 로그공간에서 파장의 변화에 대한 에어로솔 광학두께의 파장별 변화의 기울기를 나타낸다. 이 앙스트롬 지수는 대기 중의 에어로솔의 크기에 대한 긍정적인 정보를 담고 있어서 이 값의 변화에 따라 대기중에 입자크기가 작은 오염물질이 많은 지, 아니면 황사나 해염입자와 같이 입자크기가 큰 에어로솔이 많은 지 등을 파악하는데 큰 도움이 된다 (예, Jeong and Li, 2005; Jeong and Hsu, 2008). 파장별 에어로솔 광학두께가 같은 부호의 계통오차를 갖는 경우에는 앙스트롬 지수의 오차가 크지 않지만 Fig. 6에서 나타난 것과 같이 파장별로 다른 크기의 오차를 갖는 경우에는 그 오차가 상당히 증폭될 수 있다. 예를 들어, 2013

년 4월 27일의 사례에서 적색 및 청색 채널에서의 에어로솔 광학두께 값을 앙스트롬 지수 산출에 이용하였을 때 그 값이 약 2.50정도 이고 AERONET에서 측정된 값은 500 nm와 870 nm 채널 이용시 약 1.81 정도로 약 0.69 정도의 차이가 있었으나, 2013년 3월 29일의 사례처럼 카메라 세팅에 문제가 있을 경우에는 결과값이 -0.69였고, AERONET 자료의 앙스트롬 지수 값 1.07과는 1.76 정도의 큰 차이를 보였으며, 이 정도의 차이는 입자크기의 크고 작은 여부를 판정하는데 오류를 가져올 수 있는 큰 차이가 된다. 참고로 황사의 경우 발원지 부근에서 0 또는 음의 앙스트롬 지수 값을 가질 수 있는 반면, 산불로 인해 발생하는 스모크에서는 1.8정도 전후의 앙스트롬 지수값이 보고된 경우가 있다. 이러한 점을 고려해 볼 때, 일반 상용 디지털 카메라를 사용하는 경우, 그 결과로 얻어진 파장별 에어로솔 광학두께값들을 이용하여 에어로솔의 크기를 추정하는 데에는 긍정적인 접근을 하더라도 관측 조건에 따라 큰 오차를 가질 수 있어 분석에 상당한 주의를 기울여야 할 것이다.

다른 한편으로는 본 연구에서는 월령이 보름에서 하현사이일 때 관측을 수행하였는데 이를 다른 월령에 적용해 보는 것도 후속 연구로서 시도되어야 할 부분으로 판단된다. 관측 시간 도중 대기 조건 및 에어로솔 양이나 특성이 변화하는 경우에도 에어로솔 산출이 가능토록 하는 방법 또한 후속 연구의 중요부분의 하나가 될 것으로 보인다.

4. 결론

이 연구에서는 상용 디지털 카메라를 사용하여 월면 영상을 획득하고 이들 영상에 랑리 회귀법을 적용하여 대기 총 광학두께 및 에어로솔 광학두께를 산출하는 방법을 제시하였다. 이러한 방법을 실제 관측된 4개의 사례에 적용하여 에어로솔 광학두께를 산출하였으며 그 결과를 주간에 태양분광광도계를 사용하여 에어로솔 광학두께를 높은 정확도로 측정하는 AERONET 자료와 비교하였고 AERONET 자료가 없는 경우에는 그 정확도가 잘 알려진 위성자료인 MODIS 에어로솔 자료와 비교하여 검증을 시도하였다. 그 결과 모든 사례에서 본 연구에서 야간에 산출된 에어로솔 광학두께 값이 다른

관측 값과 비교하여 0.1의 범위 내에서 일치함을 확인하였다. 단, 카메라의 세팅이 최적화 되지 못한 상황에서 월면 영상을 촬영하거나 월면 화소 탐지에 오류가 있을 경우 파장별로 산출된 에어로솔의 광학두께가 각기 다른 정도의 오차를 가지게 될 수 있어 에어로솔의 크기를 나타내는 모수인 옹스트롬 지수를 산출하는 데에는 큰 오차를 야기할 수 있어 분석에 상당한 주의가 필요함을 파악하였다. 이러한 결과로부터 상용 디지털 카메라를 사용하여 촬영된 월면 영상으로부터 에어로솔 광학두께를 산출하는 것이 가능함을 보였으며, 따라서 이 방법을 사용하여 기존의 부족한 야간 에어로솔 자료의 획득에 적지 않은 기여를 할 수 있을 것으로 사료된다. 단, 본 연구 방법을 통해 향후 보다 많은 관측을 수행하고 이렇게 추정된 에어로솔 광학두께 값들을 라이다(Lidar) 등의 관측 결과와 지속적인 상호비교를 통하여 검증할 필요가 있을 것이다.

사사

이 연구는 기상청 기상기술개발사업(CATER 2012-2064)과 2012년도 강릉원주대학교 학술연구조성비 지원으로 수행되었습니다.

References

- Baumer, D., S. Versick, B. Vogel, 2008. Determination of the visibility using a digital panorama camera, *Atmospheric Environment*, 42: 2593-2602, doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.06.024.
- Berkoff, Timothy A., Mikail Sorokin, Tom Stone, Thomas F. Eck, Raymond Hoff, Ellsworth Welton, Brent Holben, 2011. Nocturnal Aerosol Optical Depth Measurements with a Small-Aperture Automated Photometer Using the Moon as a Light Source, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 28: 1297-1306.
- Bucholtz, A., 1995. Rayleigh-scattering calculations for the terrestrial atmosphere, *Applied Optics*, 34: 2765-2773.
- Cho, H.K., M.-J. Jeong, J. Kim, and Y.J. Kim, 2003. Dependence of diffuse photosynthetically active solar irradiance on total optical depth, *Journal of Geophysical Research*, 108(D9), 4267, doi: 10.1029/2002JD002175.
- Eck, T.F., B.N. Holben, J.S. Reid, O. Dubovik, A. Smirnov, N.T. O'Neill, I. Slutsker, and S. Kinne, 1999. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols, *Journal of Geophysical Research*, 104: 31,333-31,349.
- Fischer, E.V., N.C. Hsu, D.A. Jaffe, M.-J. Jeong, and S.L. Gong, 2009. A decade of dust: Asian dust and springtime aerosol load in the U.S. Pacific Northwest, *Geophysical Research Letters*, 36, L03821, doi:10.1029/2008GL036467.
- Harrison, L., J. Michalsky, and J. Berndt, 1994. Automated multifilter rotating shadow-band radiometer: An instrument for optical depth and radiation measurement, *Applied Optics*, 33: 5118-5125.
- Herber, A., L.W. Thomason, H. Gernandt, U. Leiterer, D. Nagel, K-H Schulz, J. Kaptur, T. Albrecht, and J. Notholt, 2002. Continuous day and night aerosol optical depth observations in the Arctic between 1991 and 1999. *Journal of Geophysical Research*, 107, 4097, doi:10.1029/2001JD000536.
- Holben, B.N., T.F. Eck, I. Slutsker, D. Tanre, J.P. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J.A. Reagan, Y.J. Kaufman, T. Nakajima, F. Lacenu, I. Jankowiak, and A. Smirnov, 1998. AERONET-A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sensing of Environment*, 66: 1-16.
- Hsu, N.C., M.-J. Jeong, C. Bettenhausen, A.M. Sayer, R. Hansell, C. Seftor, J. Huang, and S.-C. Tsay, 2013. Enhanced Deep Blue Aerosol Retrieval Algorithm: The second Generation, *Journal of Geophysical Research*, 118, doi:10.1002/jgrd.50712.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007. *Climate change 2007: the scientific basis*, In: Solomon, S. (Ed.), Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, New York.
- Iqbal, M., 1983. *An Introduction to Solar Radiation*, Academic Press, San Diego, CA, USA.
- Jeong, M.-J. and Z. Li, 2005. Quality, compatibility and synergy analyses of global aerosol products derived from the advanced very high resolution radiometer and total ozone mapping spectrometer, *Journal of Geophysical Research*, 110, D10S08, doi:10.1029/2004JD004647.
- Jeong, M.-J., and N.C. Hsu, 2008. Retrievals of aerosol single-scattering albedo and effective aerosol layer height for biomass-burning smoke: Synergy derived from “A-Train” sensors, *Geophysical Research Letters*, 35, L24801, doi:10.1029/2008GL036279.
- Kasten, F., 1966. A new table and approximate formula for relative optical air mass, *Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol.*, Ser. B, 14: 206-223.
- Kaufman, Y.J., D. Tanré, and O. Boucher, 2002. A satellite view of aerosols in the climate system, *Nature*, 419: 215-223.
- Kieffer, H.H. and T.C. Stone, 2005. The spectral irradiance of the moon, *The Astronomical Journal*, 129: 2887-2901.
- Kim, K.W. and Y.J. Kim, 2005. Perceived visibility measurement using the HSI color difference method, *J. Korean Physical Society*, 46(5): 1243-1250.
- Kim, K.W. and Y.J. Kim, 2002. Visibility observations using remote digital vision visibility monitor, *Atmosphere*, 12(3): 80-81.
- King, M.D., Y. Kaufman, D. Tanré, and T. Nakajima, 1999. Remote sensing of tropospheric aerosols from space: Past, present, and future, *Bulletine of American Meteorological Society*, 11: 2229-2259.
- Lebourgeois, V., A. Begue, S. Labbe, B. Mallavan, L. Prevot, and B. Roux, 2008. Can Commercial Digital Cameras Be Used as Multispectral Sensors- A Crop Monitoring Test, *Sensors*, 8: 7300-7322, doi:10.3390/s8117300.
- Leckner, B. 1978. The spectral distribution of solar radiation at the earth's surface - elements of a model, *Solar Energy*, 20(2): 143-150.
- Lee, J.H., J. Kim, C.H. Song, J.-H. Ryu, Y.-H. Ahn, and C.K. Song, 2010. Algorithm for Retrieval of Aerosol Optical Properties over the Ocean from the Geostationary Ocean Color Imager, *Remote Sensing of Environment*, 114: 1077-1088, 10.1016/j.rse.2009.12.021.
- Lee, S.-S., and G. Feingold, 2010. Precipitating cloud-system response to aerosol perturbations, *Geophysical Research Letters*, 37, doi:10.1029/2010GL045596.
- 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, *Journal of Geophysical Research*, 112(D13211), doi:10.1029/2006JD007811.
- Noh, Y. and K.-H. Lee, 2013. Characterization of Optical Properties of Long-range Transported Asian Dust in NorthEast Asia, *Korean J. of Remote Sensing*, 29(2): 243-251 (in Korean with English abstract).

- Perez-Ramirez, D., J. Aceituno, B. Ruiz, F.J. Olmo, L. Alados-Arboledas, 2008. Development and calibration of a star photometer to measure the aerosol optical depth Smoke observations at a high mountain site. *Atmospheric Environment*, 42(11): 2733-2738.
- Remer, L.A., Y.J. Kaufman, D. Tanre, 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. Atmospheric Science*, 62(4): 947-973.
- Robinson, N. (ed.), 1966. *Solar Radiation*, American Elsevier, New York.
- Seinfeld, J.H. and S.N. Pandis, 2006. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, 2nd ed. Wiley-Interscience, New Jersey, p1232.
- Seo, S.-B. and K.-W. Jin, 2013. Degradation Monitoring of Visible Channel Detectors on COMS MI Using Moon Observation Images, *Korean J. of Remote Sensing*, 29(1): 115-121 (in Korean with English abstract).
- Smimov, A., B.N. Holben, I. Slutsker, D.M. Giles, C.R. McClain, T.F. Eck, S.M. Sakerin, A. Macke, P. Croot, G. Zibordi, P.K. Quinn, J. Sciare, S. Kinne, M. Harvey, T.J. Smyth, S. Piketh, T. Zielinski, A. Proshutinsky, J.I. Goes, N.B. Nelson, P. Larouche, V.F. Radionov, P. Goloub, K. Krishna Moorthy, R. Matarrese, E.J. Robertson, and F. Jourdin, 2009. Maritime Aerosol Network as a component of Aerosol Robotic Network, *Journal of Geophysical Research*, 114, D06204, doi:10.1029/2008JD011257.
- Spigulis, J.D. Jakovels, and U. Rubins, 2010. Multi-spectral skin imaging by a consumer photo-camera, Multimodal Biomedical Imaging V, edited by Fred S. Azar, Xavier Intes, *Proc. of SPIE*, 7557(75570M): 1-9, doi:10.1117/12.845492.
- United States Naval Observatory, 2012. *Multiyear Interactive Computer Almanac 1800-2050*, Version 2.2.2. Willmann-Bell, Inc., Richmond, VA, USA.
- Xie, L., A. Chiu, and S. Newsam, 2008. Estimating atmospheric visibility using general-purpose cameras, *G. Bebis et al.(Eds.): ISVC 2008, Part II, LNCS 5359, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg*: pp. 356-367.