

## 별 측광을 통한 야간 에어로졸의 광학적 두께 산출

오영록\*

운암고등학교

(접수일: 2015년 4월 22일, 수정일: 2015년 6월 30일, 게재확정일: 2015년 6월 30일)

### Retrieval of Nighttime Aerosol Optical Thickness from Star Photometry

Young-Lok Oh\*

Unam High School, Osan, Korea

(Manuscript received 22 April 2015; revised 30 June 2015; accepted 30 June 2015)

**Abstract** In this study star photometry was applied to retrieve aerosol optical thickness (AOT) at night. The star photometry system consisted of small refractor, optical filters, CCD camera, and driving mount and was located in Suwon. The calibration constants were retrieved from the astronomical Langley method but standard deviations of these were more than 10% of the mean values. After the calibration the nighttime AOT was retrieved and cloud-screened in clear six days from 25 Nov. 2014 to 17 Jan. 2015. To estimate the quality of the measurements the nighttime AOT was combined with daytime AOT retrieved from sky-radiometer that was located in Seoul and 17 km away from the star photometry system. In spite of the uncertainty of the calibration constants and the spatial difference of two observation systems, the temporal changes of the nighttime AOT coincided with the daytime. The nighttime Ångström exponent was about 20% lower and more variable than the daytime because of the uncertainty of the calibration constants. If the calibration process is more precise, the combination of star and sun or sky photometry system can monitor the air pollution day and night constantly.

**Key words:** Aerosol optical thickness, star photometry, astronomical Langley method, sky-radiometer

## 1. 서 론

에어로졸은 태양복사에너지를 흡수하거나 산란시켜 지구의 복사평형에 직접적인 영향을 주고 있으며, 구름의 씨앗으로도 작용하여 태양복사에너지와 지구복사에너지의 흐름과 물의 순환에 간접적으로 영향을 준다. IPCC (2013) 보고서에 의하면 에어로졸은 전반적으로 지구를 냉각시키는 효과가 있는 것으로 생각되고 있으나 구름과의 상호작용을 통해 기후 시스템에 미치는 영향은 아직까지 불명확한 부분이 많다. 그리고 불균등하게 분포하는 특성 때문에 국지적 기후

에 미치는 영향도 아직까지 불확실하다.

에어로졸 관측은 주로 AERONET, SKYNET과 같은 대규모 지상 관측망을 통해 이루어져 왔으며 최근에는 인공위성을 이용한 관측도 이루어지고 있다. 이런 방법들은 대기 밖 태양복사의 양과 에어로졸에 의해 산란 또는 흡수되는 과정을 거친 태양복사의 양을 비교하는 방식을 통해 에어로졸의 광학적 두께(aerosol optical thickness, AOT)를 산출한다. 따라서 태양복사가 없는 밤에는 이런 방법들을 통해 AOT를 산출하는 것이 불가능하다. 이는 현재의 주된 관측 방법들이 에어로졸의 연속적인 변동을 파악하는 데 한계가 있다는 것을 의미한다(Barreto et al., 2013).

이러한 한계점을 극복하기 위해 태양 대신 달이나 별을 이용해 AOT를 산출하는 방법들이 최근에 제시되었다. 달을 이용하는 경우는 AERONET에서 사용

\*Corresponding Author: Young-Lok Oh, Unam High School, 12 Uncheon-ro, Osan 447-060, Korea.  
Phone : +82-31-370-5322, Fax : +82-31-370-5306  
E-mail : lorasia72@gmail.com

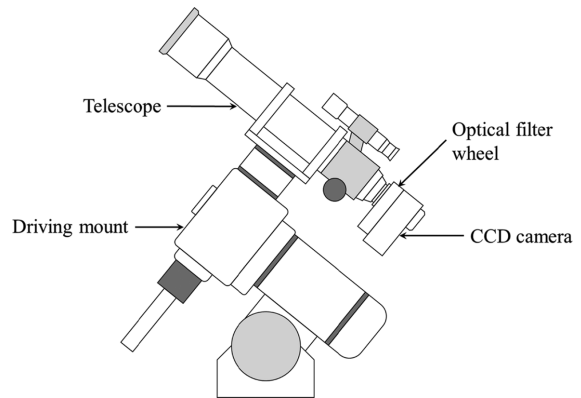
되는 태양광도계(sun photometer)와 흡사한 기기를 사용한다는 장점을 지녔으나 달의 지속적인 위상(phase) 변화로 인해 검정상수(calibration constant)를 구하는 것이 복잡하다는 것이 단점이다(Berkoff et al., 2011; Barreto et al., 2013). 별을 이용하는 경우에는 일반적인 랭글리 회귀법(Langley regression method)을 통해 검정상수를 구할 수 있으나, 천체 관측에 사용되는 망원경과 전하결합소자(charge-coupled device, CCD)가 필요하기에(Herber et al., 2002; Pérez-Ramírez et al., 2008) 대기과학을 전공한 연구자들에게는 매우 생소한 방법이라고 볼 수 있다. 이러한 어려움 때문에 야간 에어로졸 관측이 보편화되지 못하고 있으나 밤이 지속되는 기간이 긴 극지방의 경우 에어로졸의 이동을 감지하기 위해서는 야간 관측이 꼭 필요하다(Herber et al., 2002; Lubin and Vogelmann, 2006). 그리고 태양광도계와 별광도계(star photometer)를 결합하여 사하라 사막의 먼지가 이동하는 것과 산불 시 발생한 연기가 이동하는 것을 주야간 연속적으로 관측한 사례(Alados-Arboledas et al., 2011; Barreto et al., 2013)를 볼 때, 야간의 에어로졸 관측이 상시적인 대기오염 모니터링에 크게 기여할 수 있음을 알 수 있다.

국내의 경우 디지털 카메라로 달을 관측하여 AOT를 구한 후 Terra와 Aqua 위성에서 주간에 도출된 값과 비교한 사례가 있었다(Jeong, 2013). 그러나 별을 이용한 관측은 없었고 야간 관측 결과를 지상의 주간 관측자료와 연결시키려는 시도도 없었다. 따라서 본 연구에서는 별 관측을 통해 에어로졸의 광학적 두께를 산출하는 방법을 제시하고 그 결과를 주간의 지상 관측 자료와 비교하여 이 방법의 신뢰성을 파악해보고자 한다.

## 2. 자료 획득 및 처리 방법

### 2.1 관측 장소 및 시스템

별을 이용한 에어로졸 관측은 경기도 수원에 있는 경기과학고등학교 천문대(127.0°E, 37.3°N, 해발고도 100 m)에서 수행되었다. 수원은 인구 백만 명 이상의 도시이고 인근에 큰 도시들과 접해 있어 대기오염이 비교적 심한 곳이다. 경기과학고등학교 천문대에는 주간 에어로졸을 관측할 수 있는 장비가 없기 때문에



**Fig. 1.** Schematic diagram of star photometry system. The optical filter wheel consists of 442, 500, and 676 nm filter.

서울대학교(126.9°E, 37.5°N, 해발고도 120 m)에 설치된 스카이라디오미터(sky-radiometer) 자료를 이용하여 야간 관측자료의 신뢰성을 판단하였다. 두 지역의 직선거리는 약 17 km이다.

별을 이용한 에어로졸 관측 시스템은 Fig. 1에 제시된 것과 같이 망원경, 광학 필터 휠, CCD 카메라, 구동 마운트로 구성되어 있다. 각 부분에 대한 구체적인 모델명과 사양은 Table 1에 제시된 것과 같다. 별은 태양에 비해 매우 어둡기 때문에 빛을 모우기 위한 망원경과 희미한 빛도 감지할 수 있는 민감한 검출기가 필수적으로 이용되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 유효 구경(aperture)이 105 mm인 굴절 망원경과 16비트 냉각 CCD 카메라가 사용되었다. 관측에 사용된 광학 필터의 중심 파장은 442, 500, 676 nm이고 각 필터는 10 nm의 반높이 너비(full width at half maximum, FWHM)를 갖고 있어 단일 파장으로 간주하고 자료를 처리하였다. 망원경, 광학 필터 휠, 검출기로 구성된 별광도계는 구동부인 적도의(equatorial mount)의 움직임에 따라 대상 별을 추적하면서 그 밝기의 변화를 관측한다.

한편 서울대학교에 설치된 스카이라디오미터(Predes POM-01)는 400, 500, 675, 870, 1020 nm의 파장 대역에서 태양의 직달광과 산란광을 측정하여 에어로졸의 광학적 두께를 산출한다.

**Table 1.** Technical specification of the star photometry system.

Devices	Model	Specification
CCD camera	SBIG ST-10XME	16 bits cooled CCD
Optical filters	TECHSPEC	442, 500, and 676 nm with 10 nm FWHM
Telescope	Pentax 105-SDHF refractor	105 mm aperture and 700 mm focal length
Driving mount	Takahashi Em-200 Temma2M	Equatorial mount with GOTO system

## 2.2 관측 방법 및 측광(photometry)

CCD 카메라를 이용해 별의 밝기 변화를 측정하기 위해서는 적당한 밝기의 별을 선택하는 것이 중요하다. 너무 어두우면 충분한 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)를 얻기 위해서 노출시간(exposure time)이 길어져야 하는데 그 시간 사이에 대기의 광학적 상태 및 상대 광학 공기 질량(relative air mass)이 변할 가능성이 크다. 한편 너무 밝으면 CCD 카메라가 읽을 수 있는 광량의 한계를 넘어서는 포화(saturation) 현상이 쉽게 나타나므로 노출시간을 짧게 해야 하는데 이런 경우에는 카메라의 셔터가 열리고 닫히는 시간에서 발생하는 오차가 크게 작용할 가능성이 있다(Pérez-Ramírez et al., 2008). 이런 부분들을 고려하여 관측 대상은 천문학 데이터베이스인 SIMBAD 홈페이지(simbad.u-strasbg.fr/simbad)를 통해 3.9등급의 밝기를 가지는 황소자리(α)의 v Tau(SAO 111579)로 선정하였다. 이 별의 노출시간은 상대 광학 공기 질량과 사용한 필터에 따라 2초에서 40초 사이의 값을 조절하여 사용하였다.

CCD 관측에서 대상 별의 밝기를 정확히 측정하기 위해서는 보정 영상이 필수적이다. CCD 카메라는 보통 수백만 화소(pixel)로 구성되어 있는데 각 화소별 민감도가 일정하지 않기 때문에 바닥 고르기 영상(flat field frame)을 이용해 이를 보정해야 한다. 또한 온도에 의한 암전류(dark current)가 잡음으로 작용하므로 암전류 영상(dark frame)을 촬영해서 보정해야 한다. 이러한 영상들은 관측한 날마다 최소 다섯 번 이상 촬영되었고, 이들의 중간 값(median)을 통해 그 날의 영상을 보정하였다.

별을 촬영한 영상에서 바닥 고르기 영상과 암전류 영상을 보정한 후 대상 별의 밝기를 구경 측광(aperture photometry)으로 측정하였다. 측정하는 구경이 커질수록 밝기가 증가하지만 신호 대 잡음비는 감소한다(Howell, 2006). 따라서 본 연구에서는 별의 영상에서 측정된 반높이 너비의 2배 정도로 구경 반지름을 설정한 후 밝기를 측정하였다. 밝기는 ADU (analog-to-digital units) 단위로 측정되며 이것을 노출시간으로 나누어 밝기 값으로 사용하였다.

별의 영상 촬영, 보정 영상 촬영, 보정 영상 처리, 구경 측광은 모두 상용 소프트웨어인 MaxIm DL Pro ver. 5.24를 통해 이루어졌다. 한편 별의 탐색, 영상에서 나타나는 별의 위치 조정, 상대 광학 공기 질량의 산출 등은 천문학 분야에서 일반적으로 사용되는 적도의 제어 소프트웨어인 TheSkyX Professional Edition을 통해 이루어졌다.

## 2.3 검정상수

상대 광학 공기 질량을  $m$ , 파장  $\lambda$ 에서 나타나는 대

기의 광학적 두께를  $\tau_\lambda$ , CCD 카메라에 검출되는 별의 밝기를  $I_\lambda$ 라고 하면 Beer-Lambert-Bouguer 법칙에 의해 다음의 관계가 성립한다.

$$I_\lambda = I_{\lambda,0} \exp(-\tau_\lambda m),$$

여기서  $I_{\lambda,0}$ 는 대기 밖에서의 별의 밝기를 의미하고 보통 검정상수로 불린다. 위 식의 양변에 자연 로그를 취하면

$$\ln I_\lambda = \ln I_{\lambda,0} - \tau_\lambda m$$

이다. 만일  $\tau_\lambda$ 가 일정하면  $m$ 을  $x$ 축,  $\ln I_\lambda$ 를  $y$ 축으로 하는 그래프를 그릴 때  $\ln I_{\lambda,0}$ 는  $y$ 절편이 되므로 이를 통해 검정상수를 유추할 수 있다. 이렇게 검정상수를 유추하는 방법을 랭글리 회귀법이라고 한다. 그러나 이 방법은 수평적으로 약 50 km 이상에 걸쳐 대기 상태가 균일해야 하고 관측 시간 동안 대기의 광학적 두께가 일정해야 하는 조건이 필요하다(Shaw, 1983). 대륙의 저지대에서 관측이 이루어지는 경우 관측 시간 동안 대기의 광학적 두께가 점진적으로 변할 수 있고, 이런 경우에도 랭글리 회귀법이 만족될 수 있기에 검정상수를 구하는 데 매우 주의를 기울여야 한다(Shaw, 1983; Tanaka et al., 1986).

랭글리 회귀법에서  $m$ 과  $\tau_\lambda$ 가 곱해지기 때문에 만약 대기의 순간적 변동에 의해  $\tau_\lambda$ 에 변화가 생긴다면  $m$ 이 클수록 그 영향이 커지고 이것이 회귀법의 선형성에 큰 영향을 미친다. 따라서 회귀법의 선형성을 높여 검정상수의 불확실성을 줄이기 위해 다음과 같이 개선된 천문학적 랭글리 회귀법(astronomical Langley regression)이 제시되었다(Mitchell and Forgan, 2003; Pérez-Ramírez et al., 2011).

$$\frac{\ln I_\lambda}{m} = \frac{\ln I_{\lambda,0}}{m} - \tau_\lambda,$$

이 방법에서  $1/m$ 을  $x$ 축,  $\ln I_\lambda/m$ 을  $y$ 축으로 그래프를 그리면 기울기가  $\ln I_{\lambda,0}$ 이고  $y$ 절편이  $\tau_\lambda$ 가 된다.

AERONET은  $m$ 이 2에서 5사이 일 때의 관측 값을 사용해 검정상수를 구하도록 권장하지만(Holben et al., 1998) 본 연구에서는 별의  $m$ 이 2에서 6 사이에 관측한 값을 주로 사용하였다. 이것은 별빛이 희미해서 오랫동안 노출을 주어야 하고 이로 인해 전체적인 관측 자료의 수가 줄어들기 때문에 되도록 자료를 더 확보하기 위해서였다. 관측된 영상에서 각종 보정을 마친 후 구경 측광을 통해 밝기 값을 얻고 이를 Harrison and Michalsky (1994)가 제안한 알고리즘으로 처리하여 구름 및 대기 변동의 효과를 제거하였다. 여기서 걸러진 자료를 대상으로 천문학적 랭글리 회귀법을 적용해 최종적으로 검정상수를 산출하였다.

## 2.4 에어로졸 광학적 두께 및 옹스트롬 지수 (Ångström exponent)

검정상수  $I_{\lambda,0}$ 를 결정한 후 관측 값  $I_{\lambda}$ 와 상대 광학 공기 질량  $m$ 을 이용해 대기의 광학적 두께  $\tau_{\lambda}$ 를 Beer-Lambert-Bouguer 법칙으로부터 구했다.  $\tau_{\lambda}$ 는 공기분자의 레일리 산란에 의한 광학적 두께  $\tau_{\lambda}^R$ , 오존의 광학적 두께  $\tau_{\lambda}^O$ , 에어로졸의 광학적 두께  $\tau_{\lambda}^A$ 의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\tau_{\lambda} = \tau_{\lambda}^R + \tau_{\lambda}^O + \tau_{\lambda}^A,$$

$\tau_{\lambda}^R$ 와  $\tau_{\lambda}^O$ 은 다음과 같이 구했다(Liou, 2002).

$$\tau_{\lambda}^R = \frac{(a + bH)\lambda^{-c}}{p_s} e^{-d\lambda^{-e}},$$

$$\tau_{\lambda}^O = k_{O_3, \lambda} C(O_3),$$

여기서  $a = 0.00864$ ,  $b = 6.5 \times 10^{-6}$ ,  $c = 3.916$ ,  $d = 0.074$ ,  $e = 0.05$ 이다.  $H$ 는 km 단위로 나타낸 관측 장소의 높이,  $p$ 는 기압,  $p_s$ 는 1013.25 hPa이다.  $\tau_{\lambda}$ 에서 레일리 산란이 차지하는 광학적 두께가 상당히 크므로 이를 정확히 구하는 것이 중요하다. 그러나 관측 장소에서는 양질의 기압 값을 구할 수 없어서 기상청 홈페이지에서 제공하는 수원의 AWS자료(www.kma.go.kr/weather/observation/aws\_table\_popup.jsp)를 이용하였다.  $k_{O_3, \lambda}$ 는 오존의 흡수 계수로 Iqbal (1983)의 자료를 사용하였고 오존의 농도  $C(O_3)$ 는 Aura 위성의 자료(disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni#maincontent)를 이용하였다.

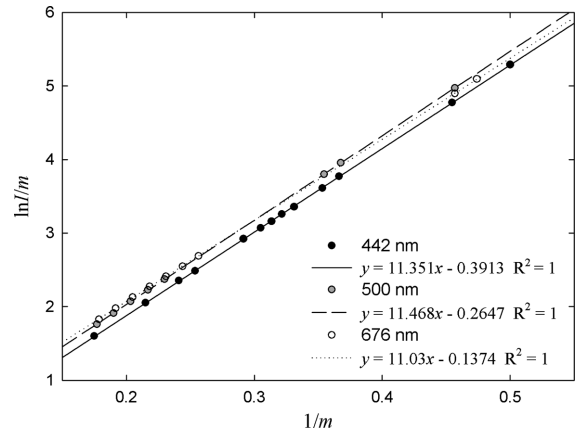
이러한 과정을 통해 얻어진 파장별  $\tau_{\lambda}^A$  값은 구름의 영향을 받았을 가능성이 있기에 그 효과를 제거해야 한다. AERONET에서 사용하는 알고리즘(Smirnov et al., 2000)이나 서울대학교의 스카이라디오미터에 적용되는 알고리즘(Song et al., 2014) 등은 관측방식이나 관측 간격의 차이가 있어 그대로 적용할 수 없다. 대신 별 측광을 위해 개발된 알고리즘(Pérez-Ramírez et al., 2012b)을 적용하여 구름 효과를 제거하였다.

마지막으로 옹스트롬 지수  $\alpha$ 를 구했는데, 이 값은 에어로졸의 크기에 대한 정보를 담고 있으며 일반적으로 이 값이 클수록 상대적으로 작은 에어로졸이 많이 분포함을 의미한다.  $\alpha$ 는 두 파장에서의 광학적 두께를 비교하여 구할 수 있는데, 본 연구에서는 세 파장을 모두 사용하고 최소 제곱법을 이용하여 구하였다.

## 3. 결과 및 해석

### 3.1 검정상수 산출

v Tau의 검정상수를 구하기 위해 2014년 10월 27일부터 12월 13일까지 맑은 날만을 골라 총 여덟 번



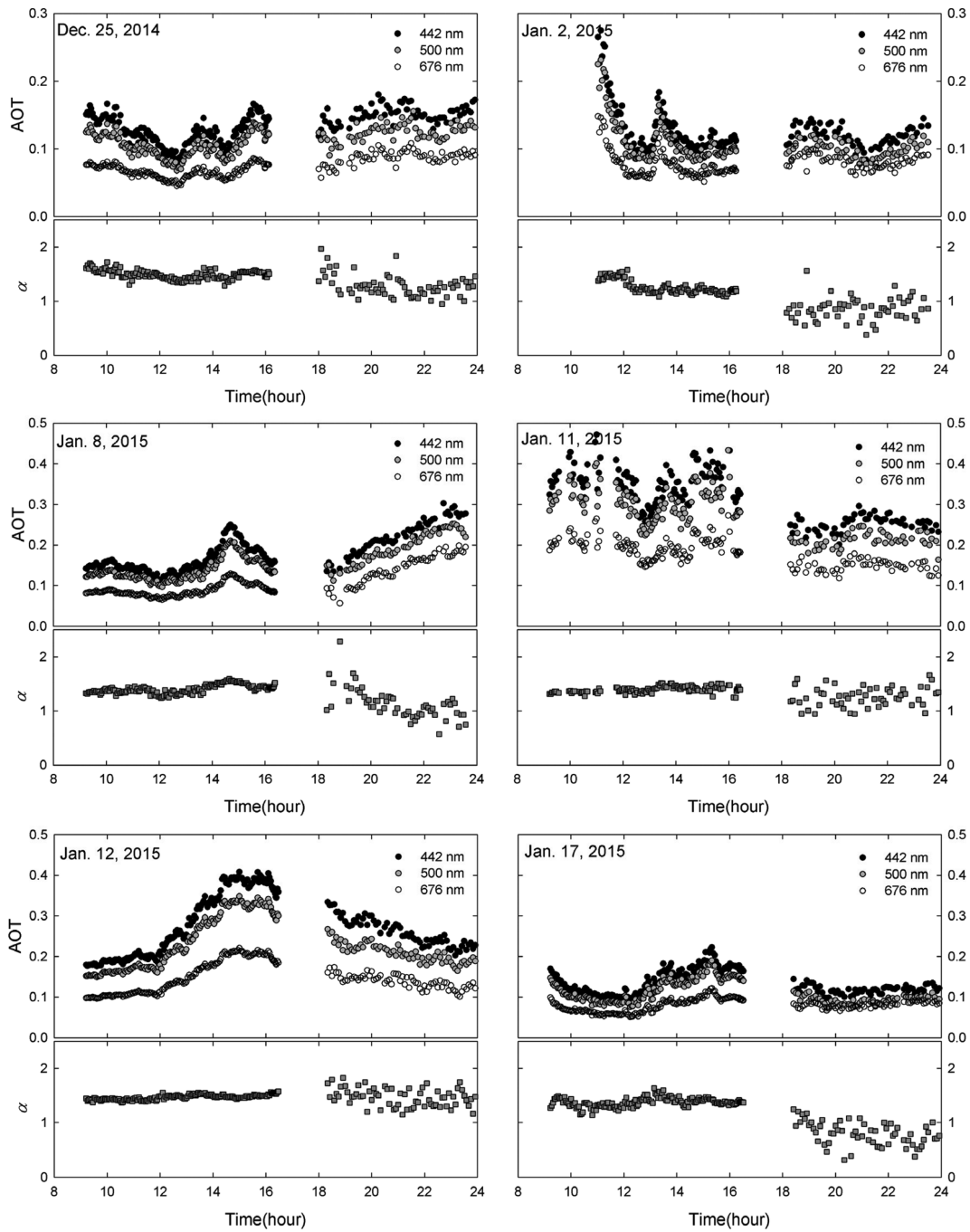
**Fig. 2.** Astronomical Langley regression plot for the star v Tau on 2 Nov. 2014. The slope is the natural logarithm of extraterrestrial intensity and the ordinate intercept is the atmospheric optical thickness on each wavelength.

의 관측을 수행하였다. 관측된 초기 자료는 Harrison and Michalsky (1994)가 제안한 알고리즘을 통해 구름 효과와 대기의 순간적인 변동 효과를 제거하였다. 이후 천문학적 랭글리 회귀법(Mitchell and Forgan, 2003; Pérez-Ramírez et al., 2011)을 적용해 검정상수를 산출하였다. Figure 2은 2014년 11월 2일의 자료에 천문학적 랭글리 회귀법을 적용한 것으로 세 파장에서 회귀선의 결정계수  $R^2$ 이 모두 1로 완벽한 선형임을 알 수 있다. 이 랭글리 회귀법을 적용하면 결정계수가 대부분 0.999 이상을 나타내어 회귀법에 의한 오차를 줄일 수 있다.

Table 2는 이렇게 구한 파장별 검정상수를 ADU 단위로 나타낸 것이다. 검정상수가 없는 날은 앞에서 언급한 알고리즘으로 처리 후 남은 자료가 원래의 1/3보다 적은 경우로, 오류의 가능성이 높아 제거되었다.

**Table 2.** Calibration constants of the star v Tau SAO 111579. The constants are expressed in ADU (analog-to-digital units).

Date	442 nm	500 nm	676 nm
Oct. 27, 2014	96278	-	71254
Oct. 28, 2014	79301	96568	60234
Nov. 2, 2014	85050	95607	61698
Nov. 3, 2014	110304	114462	74013
Nov. 4, 2014	81308	100408	-
Nov. 10, 2014	78042	103673	-
Nov. 14, 2014	70193	86509	48874
Dec. 13, 2014	76115	99708	-
Average	84574	99562	63215
Standard Deviation	12866	8511	9976



**Fig. 3.** Daily evolutions of aerosol optical thickness AOT and Ångström exponent  $\alpha$  using the combination of sky-radiometer in the daytime with star photometer at night. Note that the star photometer is separated from the sky-radiometer 17 km away.

관측한 날에 따라 검정상수의 변동이 크게 나타나 442 nm에서는 표준편차가 평균의 약 15%, 500 nm에서는 약 9%, 676 nm에서는 약 16%로 나타났다.  $\alpha$ 를 구하

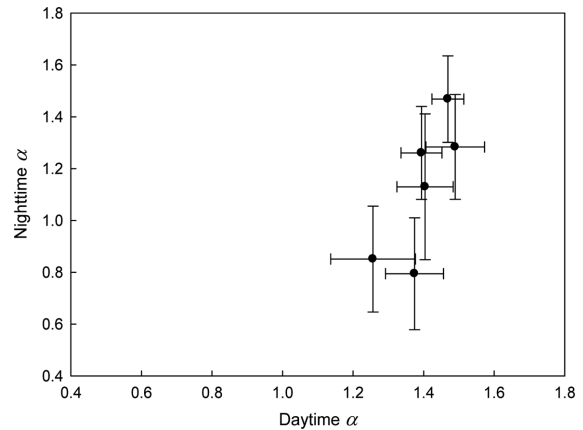
기 위해서는 검정상수의 자연로그 값이 사용되는데 각 파장의 평균과 표준편차에 이것을 적용하면 442 nm에서  $11.345 \pm 0.153$ , 500 nm에서  $11.509 \pm 0.086$ ,

676 nm에서  $11.054 \pm 0.159$ 이다. 관측한 별의 상대 광학 공기 질량  $m$ 의 최솟값이 1.17 정도인 것을 감안하면 AOT의 최대 불확실성은 442 nm에서  $\pm 0.131$ , 500 nm에서  $\pm 0.074$ , 676 nm에서  $\pm 0.136$  정도이다.

### 3.2 에어로졸 광학적 두께와 옹스트롬 지수 산출

검정상수를 구한 후 2014년 12월 25일부터 2015년 1월 17일 사이에 맑은 날을 골라 6일 동안 관측하였다. 관측은 442, 500, 676 nm 순으로 모두 5초의 노출시간으로 촬영하면서 진행되었고, 5분에 한 번씩 진행되었다. 관측은 보통 18시 30분부터 24시까지 이루어졌다. 이렇게 얻어진 초기 AOT 자료에서 Pérez-Ramírez et al. (2012b)의 알고리즘으로 구름 효과를 제거하였다. 비교 자료로 사용된 서울대학교 스카이라디오미터의 AOT 자료는 관측파장이 500 nm만 일치하고 나머지는 달라 옹스트롬 지수를 이용해 442 nm와 676 nm의 값을 추정하였다. 이렇게 비교한 것이 Fig. 3이다.

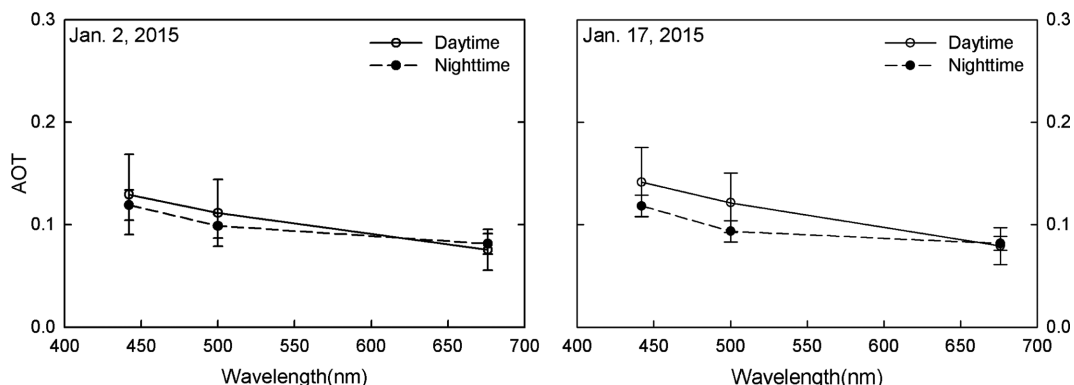
Figure 3에서 관측한 모든 날마다 약 16시 30분에서 18시 30분 사이의 2시간 자료가 없는데 이는 해가 지고 하늘이 어두워져 별이 나타날 때까지 걸리는 시간이다. Figure 3을 보면 두 관측자료에서 시간적, 공간적인 차이가 있음에도 불구하고 관측이 이루어진 기간 동안 주간과 야간의 AOT 값과 옹스트롬 지수에서 연속성이 있다는 것을 알 수 있다. 2014년 12월 25일은 주간과 야간의 AOT가 큰 차이가 없으나 2015년 1월 2일은 주간에 AOT가 감소하는 경향을 보이다가 야간에는 어느 정도 일정한 경향성을 보인다. 1월 8일은 15시 부근에 AOT가 최고점에 이른 후 감소하다가 다시 야간에 증가하는 양상을 보였고, 1월 11일은 주간의 큰 폭으로 움직이던 AOT가 야간에는 그 변동폭이 줄어든 모습을 보여주었다. 한편 1월 12일과 17일은 모두 오전부터 AOT가 증가하다가 15시



**Fig. 4.** Scatter plot between the mean daytime and nighttime Ångström exponent  $\alpha$  on six days. Error bars represent one standard deviation.

부근에서 최고점에 이른 후 다시 감소하는 양상을 보인다. 이러한 양상은 도시 지역에서 나타나는 전형적인 일변화이며(Liu et al., 2008; Gerasopoulos et al., 2011; Zhang et al., 2012) 인간활동이 AOT 변화에 주된 영향을 미쳤다고 판단할 수 있다.

Figure 4는 주간과 야간의 옹스트롬 지수  $\alpha$ 의 평균과 표준편차를 비교하여 나타낸 것이다. 주간과 야간의  $\alpha$ 는 비례관계가 있으나 평균적으로 야간의 값이 주간의 약 80% 정도로 낮게 나타났으며 표준편차가 주간에 비해 야간이 약 2.5배 정도 크다. 야간의 평균  $\alpha$ 가 주간의 그것보다 작은 것을 에어로졸 입자크기의 변화로 판단할 수도 있지만 검정상수가 잘못 산출되어도 이런 현상이 나타날 수 있다. Figure 5는 야간의 평균  $\alpha$ 가 주간의 약 60% 정도로 낮은 2015년 1월 2일과 17일의 파장별 AOT를 나타낸 것이다. 1월 2일



**Fig. 5.** Spectral aerosol optical thickness AOT of daytime and nighttime on 2 Jan. and 17 Jan. 2015. Error bars represent one standard deviation.

과 17일 모두 442 nm와 500 nm의 AOT는 주간보다 야간이 낮는데, 676 nm에서는 오히려 주간보다 약간 높음을 알 수 있다. 이것은 676 nm의 검정상수가 실제보다 크게 측정되었을 가능성이 있다는 것을 암시한다. 따라서 전체적으로 야간의  $\alpha$ 가 낮게 나온 것은 676 nm에서의 검정상수의 오류라고 판단된다. 한편, 야간의  $\alpha$ 의 표준편차가 크게 나타난 이유는 관측을 5분에 한 번씩 진행해서 대기의 순간적인 변동에 영향을 받았거나 또는 구름 제거 방법이 불완전하기 때문일 것으로 추정된다.

#### 4. 결론 및 토의

본 연구에서는 별광도계로 별의 밝기를 측정하고 이것에 천문학적 랭글리 회귀법을 적용하여 검정상수를 산출하였다. 그리고 검정상수를 통해 야간 에어로졸의 광학적 두께 AOT와 옹스트롬 지수  $\alpha$ 를 산출하였고 이를 주간에 운영되는 서울대학교의 스카이라디오미터 자료와 비교하였다.

결정된 검정상수는 세 파장에서 모두 약 10% 이상의 표준편차를 가질 만큼 불확실성이 컸다. 이것은 검정상수를 산출하기 위해 2시간 이내의 관측을 했음에도 불구하고 그 사이에 대기의 광학적 두께가 변했다는 것을 의미하며, 대륙의 저지대에서 관측할 때 나타날 수 있는 현상이다(Shaw, 1983; Tanaka et al., 1986). 따라서 검정상수 산출을 위해서는 고지대 관측이 필요하나 이는 시간적, 경제적으로 매우 비효율적이라고 볼 수 있다. 그러므로 육지의 저지대에서 관측을 하면서도 대기의 광학적 두께가 변하는지를 판단하고 이를 보정하거나 또는 이런 자료를 제거할 수 있는 검정상수 산출 방법이 연구되어야 할 것이다.

검정상수의 불확실성, 측정의 시간적 및 공간적 차이에도 불구하고 야간에 산출된 AOT는 주간에 산출된 값과 매우 큰 연속성을 보였으나 야간의  $\alpha$ 는 주간의 그것보다 낮게 나왔고 표준편차도 크게 나타났다. 태양광도계와 별광도계를 이용해서 장기적인 관측을 수행한 Pérez-Ramírez et al. (2012a)에 의하면 주간과 야간 사이의 AOT와  $\alpha$ 는 통계적으로 유의미한 차이가 없다. 따라서 야간의  $\alpha$ 에 문제점이 있다고 판단되며  $\alpha$ 가 낮게 추정된 것은 676 nm의 검정상수가 실제보다 높게 결정되었을 가능성에서 그 원인을 찾을 수 있다. Table 1에서 볼 수 있듯이 검정상수를 구하기 위해 총 여덟 번의 관측이 있었는데 676 nm에서는 유효한 자료가 다섯 번 밖에 나타나지 않아 불확실성이 다른 파장보다 크다고 볼 수 있다. 한편,  $\alpha$ 의 표준편차가 크게 나타난 것은 5분이라는 관측 간격, 파장별 AOT에 대한  $\alpha$ 의 민감성, 구름효과 제거의 불완전성과 관련이 깊다고 판단된다. Pérez-Ramírez

et al. (2012b)은 대기의 순간적인 변동으로 인한 AOT의 변화가  $\alpha$ 의 큰 변동폭을 가져온다는 것을 지적하면서 30분 간격으로 야간 관측자료를 평균할 것을 권장하였다. 그리고 AERONET에서 너무 낮거나 높은  $\alpha$ 가 구름의 영향이라고 판단하는 것을 볼 때(Smimov et al., 2000), 구름효과 제거가 불완전하다고 판단할 수도 있다.

검정상수의 불확실성과 옹스트롬 지수의 문제점에도 불구하고 본 연구를 통해 야간 에어로졸 관측에 충분히 별이 이용될 수 있다는 것을 알 수 있다. 국내의 경우 황사를 조기에 감지하기 위해 스카이라디오미터 관측망(Korean Skyradiometer NETWORK, KSNET, metsat.snu.ac.kr/ksnet)을 운영하고 있는데 모두 주간에만 운영되고 있다. 따라서 본 연구와 같은 야간 관측 시스템을 같이 운영한다면 황사 조기 감지와 대기 오염 감시에 많은 도움이 될 것이라고 판단된다.

#### 감사의 글

스카이라디오미터 관측자료를 제공해 주시고 좋은 조언을 해 주신 서울대학교 손병주 교수님과 송환진 학생께 감사를 드립니다.

#### REFERENCES

- Alados-Arboledas, L., D. Müller, J. L. Guerrero-Rascado, F. Navas-Guzmán, D. Pérez-Ramírez, and F. J. Olmo, 2011: Optical and microphysical properties of fresh biomass burning aerosol retrieved by Raman lidar, and star-and sun-photometry. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L01807.
- Barreto, A., E. Cuevas, B. Damiri, C. Guirado, T. Berkoff, A. J. Berjón, Y. Hernández, F. Almansa, and M. Gil, 2013: A new method for nocturnal aerosol measurements with a lunar photometer prototype. *Atmos. Meas. Tech.*, **6**, 585-598.
- Berkoff, T. A., M. Sorokin, T. Stone, T. F. Eck, R. Hoff, E. Welton, and B. Holben, 2011: Nocturnal aerosol optical depth measurements with a small-aperture automated photometer using the moon as a light source. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, **28**, 1297-1306.
- Gerasopoulos, E., V. Amiridis, S. Kazadzis, P. Kokkalis, K. Eleftheratos, M. O. Andreae, T. W. Andreae, H. El-Askary, and C. S. Zerefos, 2011: Three-year ground based measurements of aerosol optical depth over the Eastern Mediterranean: the urban environment of Athens. *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 2145-2159.
- Harrison, L., and J. Michalsky, 1994: Objective algorithms for the retrieval of optical depths from ground-based

- measurements. *Appl. Opt.*, **33**, 5126-5132.
- Holben, B. N., and Coauthors, 1998: AERONET-A federation instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sens. Environ.*, **66**, 1-16.
- 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. *J. Geophys. Res.*, **107**, AAC 6-1-AAC 6-13.
- Howell, S. B., 2006: *Handbook of CCD Astronomy*. Cambridge University Press, 208 pp.
- Iqbal, M., 1983: *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press, 390 pp.
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 1535 pp.
- Jeong, M.-J., 2013: Retrieval of atmospheric optical thickness from digital images of the moon. *Korean J. Remote Sens.*, **29**, 555-568.
- Liou, K. N., 2002: *An Introduction to Atmospheric Radiation 2nd Ed.*, Academic Press, 583 pp.
- Liu, J., Y. Zheng, Z. Li, and R. Wu, 2008: Ground-based remote sensing of aerosol optical properties in one city in Northwest China. *Atmos. Res.*, **89**, 194-205.
- Lubin, D., and A. M. Vogelmann, 2006: A climatologically significant aerosol longwave indirect effect in the Arctic. *Nature*, **439**, 453-356.
- Mitcell, R. M., and B. W. Forgan, 2003: Aerosol measurement in the Australian outback: Intercomparison of sun photometers. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, **20**, 54-66.
- Pérez-Ramírez, D., H. Lyamani, F. J. Olmo, and L. Alados-Arboledas, 2011, Improvements in star photometry for aerosol characterizations. *J. Aerosol Sci.*, **42**, 737-745.
- \_\_\_\_\_, B. Ruiz, J. Aceituno, F. J. Olmo, and L. Alados-Arboledas, 2008: Application of sun/star photometry to derive the aerosol optical depth. *Int. J. Remote Sens.*, **29**, 5113-5132.
- \_\_\_\_\_, H. Lyamani, F. J. Olmo, D. N. Whiteman, and L. Alados-Arboledas, 2012a: Columnar aerosol properties from sun-and-star photometry: statistical comparisons and day-to-night dynamic. *Atmos. Chem. Phys.*, **12**, 9719-9738.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, F. Navas-Guzmán, and L. Alados-Arboledas, 2012b: Cloud screening and quality control algorithm for star photometer data: assessment with lidar measurements and with all-sky images. *Atmos. Meas. Tech.*, **5**, 1585-1599.
- Shaw, G. E., 1983: Sun photometry. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **64**, 4-10.
- Song, H.-J., B.-J. Sohn, H.-W. Chun, Y. Chun, and S.-S. Lee, 2014: Improved cloud screening method for the analysis of sky radiometer measurements and application to Asian dust detection. *J. Meteor. Soc. Japan*, **92A**, 167-183.
- Smirnov, A., B. N. Holben, T. F. Eck, O. Dubovik, and I. Slutsker, 2000: Cloud-screening and quality control algorithms for the AERONET database. *Remote Sens. Environ.*, **73**, 337-349.
- Tanaka, M., T. Nakajima, and M. Shiobara, 1986: Calibration of a sunphotometer by simultaneous measurements of direct-solar and circumsolar radiations. *Appl. Opt.*, **25**, 1170-1176.
- Zhang, Y., and Coauthors, 2012: Aerosol daytime variations over North and South America derived from multiyear AERONET measurements. *J. Geophys. Res.*, **117**, D05211.