

광음향 및 네펠로미터 방식을 이용한 에어로졸 흡수 및 산란계수 측정

김지형¹⁾ · 김상우^{1),*} · 허정화¹⁾ · 남지현¹⁾ · 김만해¹⁾ · 유영석²⁾ ·
임한철²⁾ · 이철규²⁾ · 허복행²⁾ · 윤순창¹⁾

¹⁾서울대학교 지구환경과학부, ²⁾기상청 기후변화감시센터

(접수일: 2014년 12월 23일, 수정일: 2014년 12월 23일, 게재확정일: 2015년 2월 8일)

Aerosol Light Absorption and Scattering Coefficient Measurements with a Photoacoustic and Nephelometric Spectrometer

Ji-Hyoung Kim¹⁾, Sang-Woo Kim^{1),*}, Junghwa Heo¹⁾, Jihyun Nam¹⁾, Man-Hae Kim¹⁾,
Yung-Suk Yu²⁾, Han-Chul Lim²⁾, Chulkyu Lee²⁾, Bok-Haeng Heo²⁾, and Soon-Chang Yoon¹⁾

¹⁾School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

²⁾Korea Global Atmosphere Watch Center, Korea Meteorological Administration, Chungcheongnam-do, Korea

(Manuscript received 23 December 2014; revised 23 December 2014; accepted 8 February 2015)

Abstract Ambient measurements of aerosol light absorption (σ_a) and scattering coefficients (σ_s) were done at Gosan climate observatory during summer 2008 using a 3-wavelength photoacoustic soot spectrometer (PASS). PASS was deployed photoacoustic method for light absorption and integrated nephelometry for light scattering measurements. The σ_a and σ_s from PASS were compared with those from co-located aethalometer and nephelometer measurements. The aethalometer measurements of σ_a correlated reasonably well with photoacoustic measurements, but the slope of the linear fitting line indicated the PASS measurement values of σ_a were larger by a factor of 1.53. The nephelometer measurement values of σ_s correlated very well with PASS measurements of σ_s , with a slope of 1.12 and a small offset. Comparing to the aethalometer measurements, the photoacoustic measurements of σ_a didn't exhibit a significant (i.e., the ratio between aethalometer and PASS increased) change with increasing relative humidity (RH). The ratio of σ_s between nephelometer and PASS increased with increasing RH, especially when the RH increased beyond 80%. This apparent increase in σ_s with RH may be due to the contribution of hygroscopic growth of aerosols.

Key words: Aerosol, absorption, scattering, PASS, aethalometer, nephelometer

1. 서 론

대기 중의 에어로졸은 태양 빛을 흡수 및 산란함으로써 직접적으로 지구 대기 복사수지 산정에 큰 영향을 끼치고 있다. 그러나 온실기체에 비해 상대적으로 불균등하게 분포하며 다양한 조성을 가지는 특성으로

인해 에어로졸 기후효과 산정의 불확실성이 더 크다 (IPCC, 2013). 에어로졸 직접 복사효과 산정의 불확실성을 줄이기 위해서는 에어로졸에 의한 태양광의 흡수 및 산란을 보다 정확히 측정할 필요가 있다 (Haywood and Shine, 1995; Russell et al., 2002). 에어로졸의 광흡수 측정에는 필터기반 광학적 기법(filter-based optical method)을 바탕으로 한 aethalometer, Particle Soot Absorption Photometer (PSAP) 등의 관측기기가, 에어로졸의 광산란 측정에는 integrated nephelometry 방식을 바탕으로 하는 관측기기가 널리 사용되어 왔다. 하지만, 필터 위에 에어로졸 입자를 포집하는 방식의 구

*Corresponding Author: Sang-Woo Kim, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-747, Korea.
Phone : +82-2-880-6716, Fax : +82-2-883-4972
E-mail : sangwookim@snu.ac.kr

조적인 문제로 인한 오차는 필터기반 광학적 기법의 문제점으로 지적되고 있으며, 이를 해결하기 위해 필터기반 광학적 기법 관측기기를 보정하거나(Bond et al., 1999; Weingartner et al., 2003; Arnott et al., 2005; Schmid et al., 2006; Coen et al., 2010), 필터를 사용하지 않는 새로운 측정방식의 관측기기 개발(Arnott et al., 1999; Stephens et al., 2003; Slowik et al., 2007; Lewis et al., 2008)하는 등 에어로졸의 광흡수 측정 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 3파장 Photoacoustic Absorption Soot Spectrometer (PASS)는 필터기반 광학적 관측기기와는 달리 광음향학적 방법을 통해 에어로졸 흡수계수를 측정하며, 에어로졸 산란계수의 측정을 함께 수행하여 에어로졸 소산계수 및 단산란 알베도 등의 다양한 에어로졸 광학특성 산출이 가능하다(Arnott et al., 1999; Lack et al., 2006).

따라서, 본 연구에서는 2008년 8월~9월 Cheju ABC Plume-Asian Monsoon Experiment (CAPMEX) 기간 동안 제주 고산기후관측소에서 측정된 PASS의 에어로졸 흡수계수 및 산란계수 측정 결과를 기존에 널리 사용되고 있는 aethalometer 및 nephelometer의 동시 측정 결과와 비교하고 그 차이를 분석하였다.

2. 관 측

본 연구에 사용된 3파장 Photoacoustic Soot Spectrometer (PASS, Droplet Measurement Technologies, Inc.)는 미국 Desert Research Institute and the University of Nevada, Reno (Lewis et al., 2008)에서 개발된 관측기기로 405, 532 및 781 nm 파장에서 에어로졸의 흡수계수(σ_a)와 산란계수(σ_s)를 측정한다. 필터기반 광학적 기법과 달리, 일정 시간 주기(본 연구에서는 1,500 Hz)의 레이저 주사에 의해 광흡수 에어로졸이 가열되고, 이러한 주기적인 가열은 에어로졸 입자를 둘러싼 주변 기압의 주기적인 변화, 즉 주사된 레이저의 주기와 동일한 파장의 음파(acoustic wave)를 생성한다. 이 음파를 마이크로폰(microphone)으로 측정하고 식 (1)의 관계식을 통해 σ_a 를 산출한다(Arnott et al., 1999, 2003).

$$\sigma_a = P_m \frac{1}{P_L} \frac{A_{res} \pi^2 f_0^2}{\gamma - 1 Q} \quad (1)$$

여기서 P_m 은 측정된 음파의 강도, P_L 은 주사된 레이저의 강도(laser intensity), A_{res} 는 resonator의 단면적, γ 는 공기의 isobaric과 isochoric specific heat의 비율(1.4), f_0 는 공진주파수, 그리고 Q 는 챔버(chamber)의 quality factor(보통 약 80)이다. 본 연구에 사용된 PASS는 캠페인 직전에 Lack et al. (2006)에 제시된 방법에 따라 에어로졸을 제거한 상태(no aerosol)의 대기

를 배경신호로 보고 영점 교정을 한 후, Polystyrene Sphere 등의 에어로졸 입자와 흡수단면적이 알려진 O_3 을 이용하여 보정하였다. 한편 측정 중 에어로졸을 제거한 상태에서 배경 신호 및 레이저 파워에 대한 주기적인 자동 교정 역시 수행되었다. σ_s 의 경우, 본 연구에 사용된 3파장 nephelometer와 거의 유사하게 PASS 챔버에 설치된 photomultiplier tube를 이용하여 측정된 샘플 공기의 σ_s^{raw} 에서 에어로졸이 없는 상태에서 측정된 $\sigma_s^{background}$ 를 빼줌으로써 $\sigma_s (= \sigma_s^{raw} - \sigma_s^{background})$ 를 최종 산출한다. 측정 자료의 경우, 측정 정확도(10분 평균된 자료 기준)는 405 nm 파장의 경우 σ_a 는 1.5 Mm^{-1} , σ_s 는 3.0 Mm^{-1} , 532 nm 파장의 경우 σ_a 는 2.0 Mm^{-1} , σ_s 는 3.0 Mm^{-1} , 그리고 781 nm 파장의 경우 σ_a 는 0.15 Mm^{-1} , σ_s 는 1.0 Mm^{-1} 로 알려져 있다(Cross et al., 2010).

7파장(370, 470, 520, 590, 660, 880, 950 nm) aethalometer (Magee Sci., model AE-31)를 이용해 3.9 L min^{-1} 유량으로 석영 필터에 5분 동안 입자를 채취한 후 감쇄된 빛의 강도를 측정하고 이로부터 σ_a 를 산출하였다(Hansen et al., 1984). 이 때, Schmid et al. (2006)에서 제시한 방법을 이용하여 σ_a 를 산출하였으며, 필터 표면에 채취된 에어로졸에 의한 적산효과나 입자에 의한 다중 산란효과(multiple-scattering effect) 등은 Schmid et al. (2006)에서 제시한 상수를 이용해 보정하였다.

σ_s 는 3파장(450, 550, 700 nm) nephelometer (TSI Inc., model 3563)를 이용하여 측정하였으며, 측정 한계는 0.29 Mm^{-1} (450 nm), 0.11 Mm^{-1} (550 nm), 그리고 0.21 Mm^{-1} (700 nm)로 알려져 있다(Anderson et al., 1996). CAPMEX 캠페인 전후에는 CO_2 를 이용한 보정을 수행하였으며, 산란각 오차 보정 등의 측정 자료 후처리 과정은 Anderson and Ogren (1998)의 연구에서 제시한 방법을 따랐다.

에어로졸 흡수 용스트롬 지수(Absorption Ångström Exponent: AÅE)와 산란 용스트롬 지수(Scattering Ångström Exponent: SÅE)는 두 파장에서의 σ_a (σ_s) 값과 파장(λ)의 자연로그 값의 비로 산출하였다.

3. 결과 및 토의

Figure 1은 CAPMEX 기간인 2008년 8월부터 9월 까지 제주 고산기후관측소에서 동시 관측된 532 nm 파장에서의 에어로졸 흡수계수(σ_a), 에어로졸 산란계수(σ_s), 그리고 단산란 알베도[ω ; single scattering albedo; 에어로졸 소산계수($\sigma_a + \sigma_s$)와 σ_s 의 비]의 1시간 평균 자료 시계열을 그린 것이다. 본 그림에서는 aethalometer의 σ_a 와 nephelometer의 산란계수는 각각 7파장과 3파장 관측자료로부터 흡수 용스트롬 지수

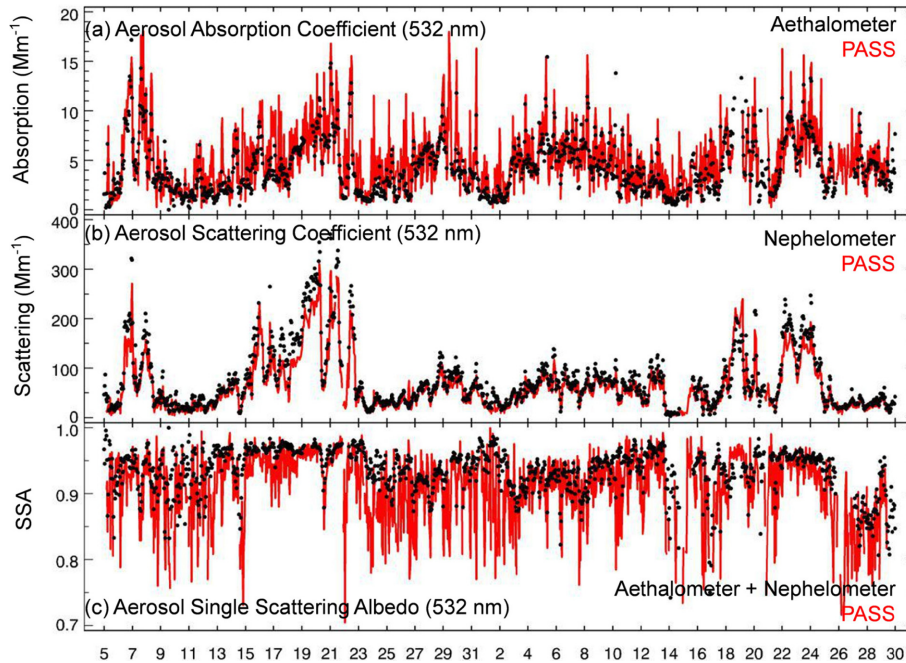


Fig. 1. Time series of aerosol (a) absorption and (b) scattering coefficients and (c) single scattering albedo at 532 nm wavelength measured by aethalometer, nephelometer and PASS at Gosan climate observatory during CAPMEX campaign (August–September, 2008).

(AAE) 및 산란 용스트롬 지수(SÅE)를 각각 구하고, 이를 Power law [σ_a (또는 σ_s) = $\lambda^{-\alpha}$]에 적용, PASS의 관측 파장인 532 nm에 대해 계산한 것이다(Kirchstetter et al., 2004). PASS와 aethalometer로부터 관측된 σ_a 의 경우 시간 변동 특성이 잘 일치하나, PASS로부터 측정된 σ_a 의 변동폭이 상대적으로 더 크게 나타남을 볼 수 있다(Fig. 1a). Aethalometer는 필터 위에 포집된 에어로졸에 의한 빛의 감쇄(light attenuation)를 관측 자료로부터 σ_a 를 산정하는데(Hansen et al., 1984; Weingartner et al., 2003), 일정 양 이상의 에어로졸이 필터에 포집되어야 광 감쇄도 측정센서가 감지할 수 있는 측정 한계의 문제로 인해 aethalometer는 상대적으로 짧은 관측 주기에서의 급격한 변화를 감지하기 어렵다(최소 관측 간격 - aethalometer: 2분, PASS: 1초). 하지만, PASS는 1500 Hz의 주기로 음파를 측정하여 σ_a 를 산정하기에 주변 잡음 등의 영향으로 샘플 내 광흡수 에어로졸의 변화가 짧은 샘플링 주기 내에서도 크게 변화하여 나타날 수 있다. Fig. 1a에서 보는 것과 같이 PASS의 관측결과 변동폭이 aethalometer의 것보다 크게 나타난 것은 이러한 관측원리의 차이로 인해 발생한 것으로 사료된다.

Figure 2a에서 보는 것과 같이 전체적으로 PASS의 σ_a (5.0 Mm^{-1})가 aethalometer로부터 관측된 σ_a (4.3

Mm^{-1})보다 약 0.7 Mm^{-1} 정도로 크게 나타났으며, 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error; RMSE)가 약 2.0 Mm^{-1} 로 흡수계수 전 범위에서 크게 나타났다. 에어로졸 흡수계수가 커질수록 PASS의 σ_a 가 커져 약 0.65의 기울기를 보였다. 이러한 차이를 줄이기 위해서는 (1) 필터에 포집된 에어로졸의 양이 증가함에 따른 필터적산효과(filter-loading effect)나 에어로졸 입자 및 필터 자체에 의한 다중 산란효과(multiple-scattering effect) 보정의 개선 (Weingartner et al., 2003; Arnott et al., 2005; Schmid et al., 2006; Coen et al., 2010)과 (2) 에어로졸이 빛을 흡수할 때 발생하는 음파를 측정하는 PASS의 경우 주변 잡음 제거(Lack et al., 2006) 등의 자료 처리 과정 개선을 통해 aethalometer와 PASS를 사용한 σ_a 관측의 정확도 향상이 필요하다.

한편, PASS와 nephelometer는 동일하게 챔버 내에 흡입된 에어로졸에 의한 광산란을 측정하는 integrated nephelometry 방식을 채택하고 있어 σ_s 의 관측결과 역시 두 관측기기의 시간변화 경향이 서로 잘 일치하고 있으며(Figs. 1b와 Fig. 2b; 상관계수 $R=0.97$), 이는 σ_s 의 시간변화 경향성과도 유사한 패턴을 보이며 변화하고 있다. 그러나, PASS(평균값: 63.8 Mm^{-1})와 nephelometer (평균값: 77.4 Mm^{-1}) 간의 σ_s 절대값 차이(bias difference, BD)는 약 13.6 Mm^{-1} 로 나타났다. 이

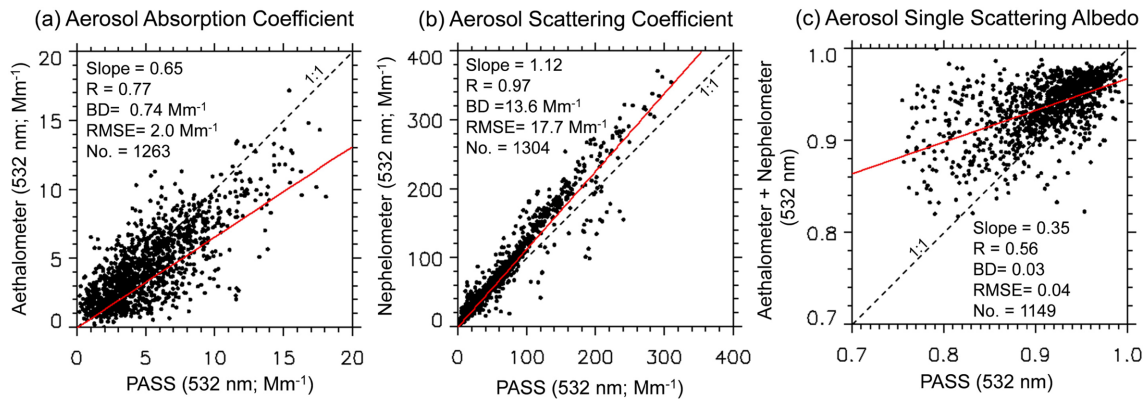


Fig. 2. Scatter plots of aerosol (a) absorption and (b) scattering coefficients and (c) single scattering albedo at 532 nm wavelength.

는 PASS와 nephelometer의 σ_s 평균값을 기준으로 약 21.3%와 17.5%에 해당되는 값으로, 이는 본 연구의 nephelometer 측정 자료에 적용된 보정(산란각 보정 등)에 따른 오차의 범위로 알려진 약 10~15% 정도 (Anderson and Ogren, 1998)에 비해 큰 편이다. 비록 약 100~250 Mm^{-1} 범위에서 일부 PASS 관측 값이 nephelometer 관측 값보다 약 50% 정도 크게 나타나기도 하지만 앞에서 언급한 바와 같이 전반적으로 nephelometer로부터 관측된 σ_s 가 전 범위에 걸쳐 큰 값을 보이며(기울기: 1.12), 평균 제곱근 오차가 약 17.7 Mm^{-1} 로 관측기간 PASS σ_s 의 평균값 77.4 Mm^{-1} 대비 약 27.7%로 PASS σ_s 의 40%에 비하면 낮은 값을 보였다. 550 nm 파장에서 관측된 nephelometer σ_s 를 PASS의 관측 파장인 532 nm로 변경하는 과정에서 발생한 오차(SAE가 1.43일 때, 약 4.7%)도 있었지만, 이보다는 상대습도에 따른 에어로졸의 흡수 성장(hygroscopic growth) 효과가 클 것으로 사료되며, 이를 위해 이러한 두 기기간의 관측 결과 차이를 줄이기 위해 기기 보정뿐만 아니라 에어로졸 샘플 습도 등의 동일조건에서의 비교 관측 실험이 필요하다.

Figure 3은 σ_a 와 σ_s 의 비율과 대기 상대습도(ambient relative humidity)에 대해 그린 것으로, σ_a 의 경우 상대습도가 증가하더라도 aethalometer와 PASS 관측 사이의 비율은 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 이는 주요 광흡수 에어로졸인 블랙카본이 전반적으로 소수성(hydrophilic)을 띠기 때문이다(Andreae and Gelencsér, 2006; Petzold et al., 2013). Nephelometer와 PASS로부터 관측된 σ_s 의 비율은 앞에서 언급하였듯이 nephelometer σ_s 값이 상대습도와 상관없이 모든 구간에서 1보다 큰 값을 보였으며, 특히 σ_a 와 달리 상대습도가 70% 또는 80%를 넘어선 경우 비율이 크게 증가함을 볼 수 있다. CAMPEX 기간 동안 PASS와

한국기상학회 대기 제25권 1호 (2015)

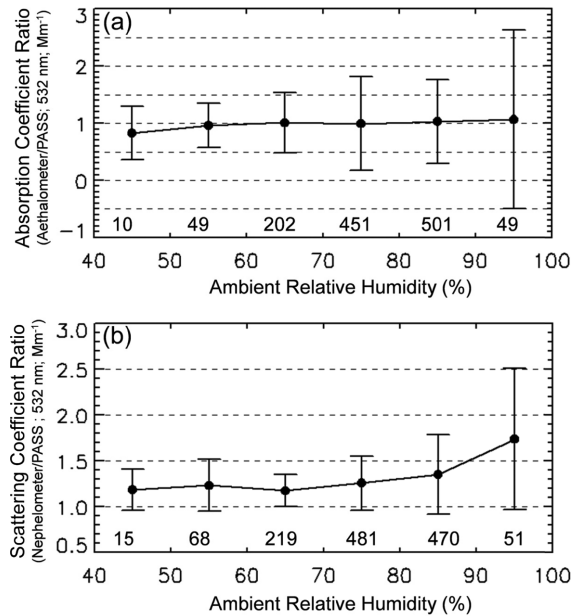


Fig. 3. The ratio of (a) aerosol absorption coefficient (aethalometer divided by PASS) and (b) aerosol scattering coefficient (nephelometer divided by PASS) plotted against ambient relative humidity. The number appeared at the bottom inside of the figure is data points averaged for every 10% RH interval.

nephelometer는 제습 장치나 희석 장치(dilution system) 없는 동일한 에어로졸 흡입 시스템을 통해 관측이 되었기 때문에 이러한 차이에 대해서는 앞에서 언급하였듯이 추후 동일한 상대습도 조건하에서 비교 관측 실험 등 추가적인 분석이 요구된다.

Figures 1c와 2c는 각 관측기기의 에어로졸 흡수/산

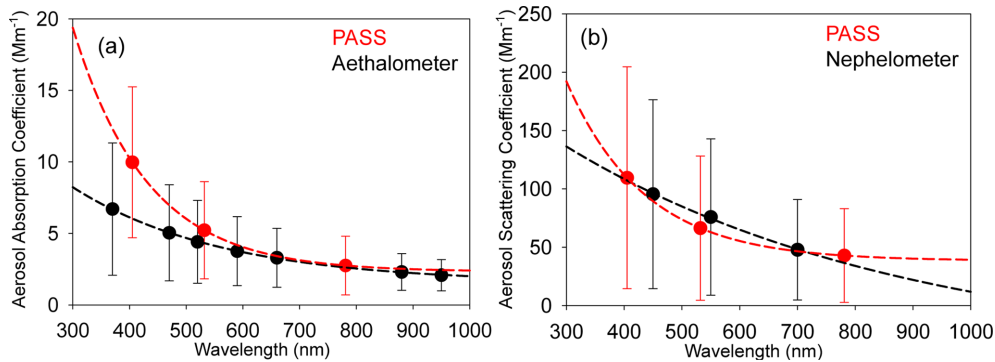


Fig. 4. Aerosol (a) absorption and (b) scattering coefficients with standard deviations as a function of wavelength.

관계수를 통해 산출된 ω 를 비교한 것이다. Fig. 1c에서 aethalometer와 nephelometer로부터 계산된 ω 에 비해 PASS의 ω 값이 큰 폭의 변화를 보이고 있으며, 특히, PASS ω 가 낮을 때 ω 가 낮아지는 경향성을 보였는데, 이는 σ_a 의 측정 오차와 관련된 것으로 사료된다. 또한, Fig. 2c의 PASS ω (평균: 0.91)가 전반적으로 aethalometer와 nephelometer로부터 계산된 ω (평균: 0.94)에 비해 낮은 값을 보였다. 이는 앞의 Fig. 1a에서 언급하였듯이, PASS에서 관측된 σ_a 의 시간 변동폭이 aethalometer의 σ_a 보다 크게 나타나기 때문으로 설명 가능하다. PASS의 σ_s 가 대략 50 Mm^{-1} 보다 낮은 경우, PASS와 nephelometer로부터 측정된 σ_s 는 잘 일치하나 aethalometer의 σ_a 에 비해 PASS의 σ_a 가 상대적으로 크게 관측되기 때문에 결과적으로 PASS의 ω 가 0.75에 가까운 낮은 값을 보였다. 상대적으로 높은 σ_a 및 σ_s 가 관측된 날짜들의 경우 ω 가 대부분 0.03 이내에서 일치하였다. Fig. 2c에서 보이는 ω 의 큰 차이를 줄이기 위해서는 상대적으로 측정 정확도가 높은 σ_s 보다는 에어로졸 농도가 낮을 때 σ_a 의 측정 정확도 향상이 필요하다.

Figure 4는 3파장 PASS, 7파장 aethalometer, 3파장 nephelometer로부터 관측된 σ_a 및 σ_s 를 power law fitting한 결과로, 블랙카본이나 황사와 같은 광흡수에 에어로졸의 특징을 구별하기 위해 사용되는 에어로졸 흡수 용스트롬 지수(Absorption Ångström Exponent: AÅE)와 에어로졸의 상대적인 크기 정보를 알려주는 산란 용스트롬 지수(Scattering Ångström Exponent: SÅE)를 설명하고 있다. 선행 연구들에서 보고된 바와 같이(Ajtai et al., 2011) 405 nm 파장에서 측정된 PASS의 σ_a 는 과대 모의하는 경향이 동일하게 나타났으며 (Fig. 4a), Figs. 1a와 2a에서 언급한 결과와 동일하게 532 nm 파장에서의 PASS σ_a 가 520 nm 파장에서의 aethalometer σ_a 보다 큰 값을 보였다. 이와 같은 이유로 532 nm와 781 nm로부터 구한 PASS의 AÅE (1.66)

Table 1. Absorption and Scattering Ångström Exponent calculated from PASS, aethalometer and nephelometer measurements during the 2008 CAPMEX field campaign.

Instrument	Wavelength (λ)		Absorption Ångström Exponent
	λ_1	λ_2	
PASS	532	781	1.66
Aethalometer	520	880	1.23
Aethalometer	370	880	1.24
Scattering Ångström Exponent			
PASS	405	781	1.43
Nephelometer	450	700	1.14
PASS	532	781	1.14
Nephelometer	550	700	1.91

가 서로 다른 파장으로부터 계산된 aethalometer의 AÅE (1.23과 1.24)보다 다소 큰 값을 보였다(Table 1). 한편, nephelometer의 σ_s 와 비교하여 PASS의 σ_s 는 532 nm에서는 작게, 781 nm에서는 크게 모의됨을 nephelometer의 power law fitting line (Fig. 4b)으로부터 유추할 수 있다. 이와 같이 이유로, Table 1에 제시되어 있는 SÅE가 1.14, 1.43 그리고 1.91로 AÅE와 마찬가지로 큰 차이를 보이고 있다.

4. 요약

고산기후관측소에서 2008년 8월과 9월의 Cheju ABC Plume Monsoon Experiment (CAPMEX) 기간 동안 3파장 photoacoustic soot spectrometer (PASS)로 측정된 에어로졸 흡수계수(σ_a)와 에어로졸 산란계수(σ_s)를 기존의 연구에서 널리 사용되고 있는 aethalometer 및 nephelometer의 동시관측 결과와 비교하였다.

PASS σ_a 의 관측결과는 aethalometer σ_a 와 시간 변화 경향성이 매우 잘 일치했으나, 532 nm의 경우 절대값 면에서 PASS σ_a 가 약 53% 큰 값을 보여 다소 차이가 있음을 알 수 있었다. PASS σ_s 의 관측결과는 nephelometer σ_s 와 비교했을 때, 근소한 차이로 매우 잘 일치함을 확인하였다(Bias Difference: 13.6 Mm⁻¹).

대기 중의 상대습도(RH)가 증가함에 따라 σ_a 보다는 σ_s 에 대한 영향이 큰 것으로 사료된다. Nephelometer σ_s 와 PASS σ_s 의 비율은 상대습도가 증가할수록 명확히 증가하는 경향성을 보였다. 이는 RH가 증가함에 따라서 PASS의 σ_s 가 nephelometer σ_s 에 비해서 상대적으로 감소하였음을 의미하며, 이러한 경향성은 RH가 70~80%를 넘어서면서 차이가 더욱 두드러지게 나타났다.

Nephelometer와 aethalometer의 σ_a 및 σ_s 관측 결과보다 PASS의 측정 결과로부터 산출한 AÅE와 SÅE가 더 크게 나타났다.

감사의 글

본 연구는 기상청 기후변화 감시·예측 및 국가 정책지원 강화사업(CATER 2012-3020)의 지원으로 수행되었습니다. 본 연구에 사용된 PASS 자료를 제공하여 준 Dr. M. K. Dubey (Los Alamos National Laboratory)에게 감사 드립니다.

REFERENCES

- Ajtai, T., Á. Filep, N. Utry, M. Schnaiter, C. Linke, Z. Bozóki, G. Szabó, and T. Leisner, 2011: Inter-comparison of optical absorption coefficients of atmospheric aerosols determined by a multi-wavelength photoacoustic spectrometer and an aethalometer under sub-urban wintry conditions. *J. Aerosol Sci.*, **42**, 859-866, doi:10.1016/j.jaerosci.2011.07.008.
- Anderson, T. L., and Coauthors, 1996: Performance characteristics of a high-sensitivity, three-wavelength, total scatter/backscatter nephelometer. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **13**, 967-986.
- _____, and J. A. Ogren, 1998: Determining aerosol radiative properties using the TSI 3563 integrating Nephelometer. *Aerosol Sci. Technol.*, **29**, 57-69.
- Andreae, M. O., and A. Gelencsér, 2006: Black carbon or brown carbon? The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols. *Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 3131-3148, doi:10.5194/acp-6-3131-2006.
- Arnott, W. P., H. Moosmüller, C. F. Rogers, T. Jin, and R. Bruch, 1999: Photoacoustic spectrometer for measuring light absorption by aerosol: instrument description. *Atmos. Environ.*, **33**, 2845-2852.
- _____, K. Hamasha, H. Moosmüller, P. J. Sheridan, and J. A. Ogren, 2005: Towards aerosol light-absorption measurements with a 7-wavelength aethalometer: Evaluation with a photoacoustic instrument and 3-wavelength nephelometer. *Aerosol Sci. Technol.*, **39**, 17-29, doi:10.1080/027868290901972.
- Bond, T. C., T. L. Anderson, and D. Campbell, 1999: Calibration and intercomparison of filter-based measurements of visible light absorption by aerosols. *Aerosol Sci. Technol.*, **30**, 582-600, doi:10.1080/027868299304435.
- Coen, M. C., and Coauthors, 2010: Minimizing light absorption measurement artifacts of the Aethalometer: evaluation of five correction algorithms. *Atmos. Meas. Tech.*, **3**, 457-474.
- Cross, E. S., and Coauthors, 2010: Soot particle studies – instrument inter-comparison - project overview. *Aerosol Sci. Technol.*, **44**, 592-611.
- Hansen, A. D. A., H. Rosen, and T. Novakov, 1984: The aethalometer - an instrument for the real-time measurement of optical absorption by aerosol particles. *Sci. Total Environ.*, **36**, 191-196.
- Haywood, J. M., and K. P. Shine, 1995: The effect of anthropogenic sulfate and soot aerosol on the clear sky planetary radiation budget. *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 603-606.
- 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, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.
- Kirchstetter, T. W., and T. Novakov, 2004: Evidence that the spectral dependence of light absorption by aerosols is affected by organic carbon. *J. Geophys. Res.*, **109**, D21208, doi:10.1029/2004JD004999.
- Lack, D. A., E. R. Lovejoy, T. Baynard, A. Pettersson, and A. R. Ravishankara, 2006: Aerosol absorption measurement using photoacoustic spectroscopy: sensitivity, calibration, and uncertainty developments. *Aerosol Sci. Technol.*, **40**, 697-708, doi:10.1080/02786820600803917.
- Lewis, K., W. P. Arnott, H. Moosmüller, and C. E. Wold, 2008: Strong spectral variation of biomass smoke light absorption and single scattering albedo observed with a novel dual-wavelength photoacoustic instrument. *J. Geophys. Res.*, **113**, D16203, doi:10.1029/

- 2007JD009699.
- Petzold, A., and Coauthors, 2013: Recommendations for reporting “black carbon” measurements. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 8365-8379, doi:10.5194/acp-13-8365-2013.
- Russell, P. B., and Coauthors, 2002: Comparison of aerosol single scattering albedos derived by diverse techniques in two North Atlantic experiments. *J. Atmos. Sci.*, **59**, 609-619, doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469\(2002\)059<0609:COASSA>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(2002)059<0609:COASSA>2.0.CO;2).
- Schmid, O., P. Artaxo, W. P. Arnott, D. Chand, L. V. Gatti, G. P. Frank, A. Hoffer, M. Schnaiter, and M. O. Andreae, 2006: Spectral light absorption by ambient aerosols influenced by biomass burning in the Amazon Basin. I: Comparison and field calibration of absorption measurement techniques. *Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 3443-3462.
- Slowik, J. G., and Coauthors, 2007: An inter-comparison of instruments measuring black carbon content of soot particles. *Aerosol Sci. Technol.*, **41**, 295-314.
- Stephens, M., N. Turner, and J. Sandberg, 2003: Particle identification by laser-induced incandescence in a solid-state laser cavity. *Appl. Opt.*, **42**, 3726-3736.
- Weingartner E., H. Saathoff, M. Schnaiter, N. Streit, B. Bitnar, and U. Baltensperger, 2003: Absorption of light by soot particles: determination of the absorption coefficient by means of aethalometers. *J. Aerosol Sci.*, **34**, 1445-1463.