한국대기환경학회지 제 29 권 제 5 호
J. KOSAE Vol. 29, No. 5 (2013) pp. 682~691
Journal of Korean Society for Atmospheric Environment
DOI: http://dx.doi.org/10.5572/KOSAE.2013.29.5.682

2011년 겨울철 서울시 대기 집중 관측 기간 동안 다파장 복사계로 분석된 에어러솔 연직분포와 시정 거리

Visibility Estimated from the Multi-wavelength Sunphotometer during the Winter 2011 Intensive Observation Period at Seoul, Korea

이권호* · 김경원[1] · 김관철[2] · 정 권[3] · 이순희[3]
경일대학교 공간정보공학과, [1]경주대학교 환경에너지학과,
[2]광주과학기술원 환경공학부, [3]서울시 보건환경연구원 대기환경팀

(2013년 6월 7일 접수, 2013년 7월 11일 수정, 2013년 8월 16일 채택)

Kwon-Ho Lee*, Kyung-Won Kim[1], Gwanchul Kim[2],
Kweon Jung[3] and Soon-Hee Lee[3]
Department of Geoinformatics Engineering, Kyungil University
[1]*Department of Environment & Energy Science, Gyeongju University*
[2]*School of Environmental Science & Engineering, Gwangju Institute of Science & Technology*
[3]*Atmospheric Environment Team, Research Institute of Public Health & Environment*

(Received 7 June 2013, revised 11 July 2013, accepted 16 August 2013)

Abstract

The aerosol extinction vertical profile and surface visibility have been derived from the Microtops-II sunphotometer observation during the winter 2011 intensive observation period (IOP) at Seoul, Korea. Using models of degradation of aerosol optical thickness (AOT) and aerosol scale height, we have performed extinction-visibility modulation to determine the height dependent aerosol extinction and visibility. It is shown that the aerosol loading is relatively low during IOP (mean $AOT_{550}=0.22\pm0.08$, Ångström exponent$=1.14\pm0.26$). Modeled extinction by use of Microtops II sunphotometer data shows good agreement with measurements by the Multi-wavelenth Polarization Lidar (MPoLAR), and the derived surface visibility are consistent with data from the transmissometer. These results emphasize the use of a vertically resolved extinction from AOT to predict visibility conditions at ground level.

Key words : Sunphotometer, Aerosol optical thickness, Scale height, Extinction, Visibility

1. 서 론

시정 거리 (Visibility)는 물체가 분명하게 보이는 최대 가시거리의 측정 기준으로, 대기 중의 안개, 먼지 등 부유물질의 혼탁한 정도를 나타내는 척도로 사용된다. 시정 거리의 영향을 미치는 인자인 미세먼지는 지역 대기질 및 인체에 유해한 영향을 미치는 주요한 대기 오염물질로서 전 세계적으로도 주요한 환경지표로 사용되고 있다 (Cho *et al.*, 2007; EPA,

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

1999). 또한 시정 거리는 인공위성을 이용한 원격탐사 영상자료의 분석에 필요한 대기보정에 필수적인 요소로서, 복사전달 모델링 과정에 있어 주요 입력변수로 사용된다(Kaufman *et al*., 1997).

시정 거리의 관측은 오래 전부터 사람의 눈으로 직접 관측하는 방법(목측)이 널리 사용되어왔다. 목측의 장점은 비교적 관측방법이 용이하고 경제적이지만, 관측자의 주관적 판단에 크게 의존하므로 공간적 해상도와 같은 관측단위의 정밀도가 떨어진다. 최근에는 관측기기의 발달로 인하여 광 투과도(light transmission)를 이용하여 시정 거리를 산정할 수 있는 시정계(transmissometer)가 사용된다. 그러나 시정계를 이용한 시정관측 방법은 지상의 한 지점에서 광원(light source)으로부터 송출된 빛을 멀리 떨어진 다른 한 지점에서 광량을 측정하는 방식을 사용하므로, 기기관측에 충분한 거리가 필요하다. 그리고 시공간적으로 불균일한 미세먼지 농도의 특성으로 인하여 목측이나 장거리 시정계 관측에 의한 시정 거리 산정 방법은 제한적일 수 밖에 없기 때문에, 이러한 단점을 극복하기 위하여 입자의 광 산란(light scattering) 특성을 관측할 수 있는 탁도계(nephelometer)와 입자의 광 흡수(light absorption)특성을 관측할 수 있는 광 흡수계(aethalometer)를 이용하여 에어러솔에 의한 시정 거리로 환산하는 방법이 사용되었다(EPA, 1999). 그러나 이러한 지점 관측(point measurement) 방법은 식의 한계로 인하여 공간적인 분해능에 제약이 발생한다.

에어러솔 원격탐사를 통하여 획득된 에어러솔 광학두께(aerosol optical thickness; AOT 또는 τ)값은 전체 대기 컬럼내에 존재하는 모든 입자성 물질의 총 부하량을 상대적으로 표현한 값으로서, 각 고도 별 에어러솔의 소산계수의 합을 의미한다. 그러므로 알려진 에어러솔 연직분포로부터 각 층별 소산 계수를 정할 수 있게 되어 지표 근처에서의 소산계수는 결국 시정 거리의 함수가 된다. 그러므로 최근에는 원격탐사기법을 이용한 대기 에어러솔 광학 특성값으로부터 시정 거리를 산정할 수 있는 방법이 연구되고 있다. 예를 들어, Wong *et al*. (2009)은 홍콩지역에서 sunphotometer로 관측된 AOT 값으로부터 고도 별 광 소산계수를 모델링 하였고, 이 결과를 지리정보시스템으로 가시화 및 데이터 베이스를 구축하였다. Retalis *et al*. (2010)은 Cyprus에서 인공위성과 sunphotometer로 분석된 AOT와 시정 거리와의 상관분석 결과, 상관계수가 0.76~0.84로 높은 상관관계를 보이는 것을 보고하였다.

현재까지, 지상에서 복사 관측 센서를 이용한 에어러솔 원격탐사자료는 주로 에어러솔 부하량을 감시하는데 활용되어 왔으나, 지역 대기 중 시정장애 현상과 관련된 연구는 아직 미비한 편이다. 따라서 지표에서 대기 에어러솔 원격탐사자료로부터 시정 거리를 분석하는 것은 다음과 같은 장단점이 존재한다. 장점으로는 첫째, 목측이나 지점관측과는 달리 공간해상도의 제약이 없으며, 둘째, 광학 센서는 에어러솔의 미세물리적, 광학적 특성에 민감도가 높으며, 셋째, 자동화된 원격탐사 시스템을 이용하면 안정된 관측 자료를 생산할 수 있는 점이다. 그러나 단점으로는 원격탐사 센서가 관측하는 자료는 태양광을 대상으로 하므로 구름이 있는 흐린 날에는 관측이 불가능한 점이 있다.

본 연구에서는 서울시에서 2011년 겨울 대기집중관측 기간 동안 측정한 AOT 관측값으로부터 시정 거리를 산출하는 방법을 제안하였다. Microtops-II를 이용한 시정 거리 산정은 고가의 관측기기를 사용하는 것보다 경제적이며, 광학측정결과에 기반한 정밀한 과학적 자료를 생산할 수 있는 장점이 있다. Microtops-II를 이용한 시정 거리 산출 결과는 다른 지상관측자료(시정 거리, 에어러솔 소산계수)와 비교를 통하여 정확도를 검증하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 2011년 겨울 서울시 대기 집중관측실험

본 연구에서 사용된 대기관측자료는 2010년 12월 24일부터 2011년 1월 24일동안 서울시 광진구 구의정수장내의 서울시 대기오염 관측소(북위 37.54도, 동경 127.10도)에서 수행된 대기 집중관측 실험으로부터 획득하였다. 본 연구에서 사용된 관측장비의 운용기간과 장소, 그리고 관측기기와 요소는 표 1과 같이 Microtops-II sunphotometer와 Transmissometer를 이용한 대기 광학 파라미터, 서울시 보건환경연구원에서 운영하고 있는 다파장 편광 라이다(Multi-wavelenth Polarization Lidar; MPoLAR)와 기상청에서 제공되는 목측 시정 거리 및 기상자료이다. Microtops-

Table 1. List of atmospheric measurement instruments and observation parameters used in this study.

Instrument	Period	Location	Altitude	Parameters
Microtops-II sunphotometer	2011/01/05-2011/01/24	N37.54°, E127.10°	98 m	AOT, Ångström exponent
Transmissometer	2010/12/24-2011/01/21	N37.54°, E127.10°	98 m	Extinction at surface, Visibility
Multi-wavelenth Polarization Lidar (MPoLAR)	2010/12/24-2011/01/24	N37.54°, E127.10°	98 m	Extinction, color ratio, and Depolarization ratio profiles
Eye observation (from *KMA)	2010/12/24-2011/01/21	N37.49°, E126.92°	85.8 m	Visibility
AWS	2010/12/24-2011/01/21	N37.49°, E126.92°	85.8 m	Wind speed, Temperature, Rain rate

*Korea Meteorological Administration

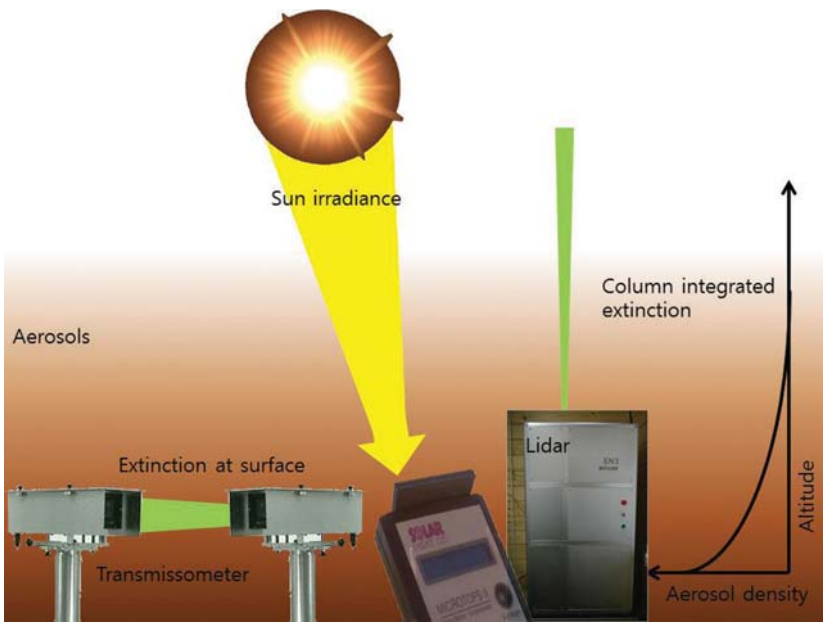

Fig. 1. Scheme of vertical and horizontal observation of aerosol extinction in this study.

II는 구름이 없는 맑은 날의 AOT와 파장별 AOT의 멱지수인 Ångström 지수(α) 값을 측정할 수 있으며, Transmissometer는 광 경로상의 에어러솔 입자에 대한 광 소산계수 및 시정 거리를 관측하였다. 서울시 보건환경연구원에서 운영하고 있는 MPoLAR는 레이저를 연직 상향으로 발사하여 대기 중 입자에 의한 후방산란(Backward scattering), 532 nm에서의 비편광도(depolarization ratio; DPR), 1064 nm와 532 nm의 파장에 대한 산란신호 비(color ratio)를 연속측정하며 수직 해상도 2.5 m 간격의 에어러솔의 연직분포와 비구형도(non-sphericity)를 측정할 수 있다. 부가적으로 서울시 기상청의 기상관측자료를 제공받아 관측 기간동안의 기상조건을 분석하였다.

그림 1은 본 연구에서 사용된 대기관측장비 운용에 대한 개념적 설명을 위한 것으로서, 시정관측장비인 Transmissometer는 송광부에서 빛을 보내면 수광

부에서 감지된 광량으로서 수평적 광 경로상의 광 소산 효율을 측정하며, 이 물리량을 이용하여 시정 거리로 환산할 수 있다. Microtops-II sunphotometer는 태양의 직달 일사량 측정하여 연직적 광 경로상의 광 소산량을 측정한다. 두 기기간의 차이는 결국, 광원과 광 경로의 방향이다. 따라서, 알려진 대기의 연직구조일 경우, Microtops-II sunphotometer로부터 지표 고도에서의 광소산 및 시정 거리 획득이 가능하다.

2. 2 대기 에어러솔 광학두께

지상에서 AOT 관측을 위하여 가시광선 영역에서 5개의 밴드(중심 파장=380 nm, 440 nm, 500 nm, 675 nm, 870 nm)를 가지는 Solar Light Co.사의 Microtops-II sunphotometer를 이용하여 구름이 없는 맑은 날 주간 동안 약 30분 간격으로 측정하였다. Microtops-II sunphotometer는 5개 파장영역에서 광량의 세기에 따라 전기적 신호를 생산하며, 제작사의 보정계수를 이용하여 전환된 직달 일사량(direct sun irradiance, I)을 측정할 수 있는 수동형 관측장비이다. Microtops-II의 특징은 다음과 같다. 첫째, 안정된 광학 정렬과 잡음이 적은 전자회로와 20 bit의 아날로그/디지털 변환기의 채용으로 비교적 정확도가 높다. 둘째, 사용자가 직접 수동 조작을 통한 관측으로 관측이 용이하며, 컴퓨터와 같은 주변기기가 불필요하고 무게가 약 600 g으로서 휴대성이 높다. 셋째, 관측결과는 빠르게 자체 LCD 창에 표시되어 확인 가능하며, 자체 메모리에 저장된 관측자료는 향후 컴퓨터 통신을 통해 다운이 가능하다. 넷째, 복사관측 장비로서 기존의 자동형 관측장비보다 상대적으로 저렴한 가격으로서 경제적이다. Microtops-II sunphotometer의 관측영역 즉, Field of View (FOV)는 2.5도이며 관측 정밀도는 1～2%이다.

Microtops-II sunphotometer가 관측한 각 시간대별 파장별 직달 일사량은 Langley 보정법을 이용하여 결정된 태양 상수값(I_0)으로부터 다음과 같이 총 광학두께(τ_{Tot})를 구할 수 있다. 이 값으로부터 Rayleigh 산란, 미량기체에 의한 흡수 기여도를 제거하면 AOT 값을 결정할 수 있게 된다.

$$\tau_{Tot}(\lambda)=-\frac{1}{m}\ln\left(\frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)}\right) \quad (1)$$

$$\tau_{Aer}(\lambda)=\tau_{Tot}(\lambda)-\tau_{Ray}(\lambda)-\tau_{Gas}(\lambda) \quad (2)$$

위 식에서 m은 태양광이 수직으로 입사하는 경우를 1로 가정한 상대 광 경로로서 태양 천정각(θ_0)의 함수 $\left(m=\frac{1}{\cos\theta_0}\right)$이다. 본 연구에서는 Rayleigh 산란에 의한 광학두께(τ_{Ray})는 Hansen and Travis (1974)이 제안한 식 (3)을 이용하였다.

$$\tau_{Ray}(\lambda)=0.008569\lambda^{-4}(1+0.0113\lambda^{-2}+0.00013\lambda^{-4}) \quad (3)$$

그리고 미량기체에 의한 광학두께는 대기 중에서 가시광선 영역의 파장대에 흡수선을 가지고 있는 오존(O_3)과 이산화질소(NO_2)에 의한 영향만을 고려하였으며, 고유한 기체 흡수 계수(σ_{Gas})와 대기 중 농도(D_{Gas})로부터 다음의 식 (4)를 이용하여 계산하였다. 오존과 이산화질소에 대한 파장별 흡수계수는 각각 Nicolet (1981)과 Vandaele *et al*. (2002)의 실험실 측정결과값을 이용하였다.

$$\tau_{Gas}(\lambda)=\sigma_{Gas}(\lambda)\times D_{Gas} \quad (4)$$

2. 3 에어러솔 연직분포 모델

Microtops-II sunphotometer로부터 획득한 AOT값은 특정 고도 z km에서의 대기 에어러솔에 의한 광 소산계수(σ_{Ext})를 전체 대기에 대하여 적분한 값으로 정의된다.

$$\tau_{Aer}(\lambda)=\int_{z=0}^{\infty}\sigma_{Ext}(\lambda,z)\,dz \quad (5)$$

일반적으로, 에어러솔의 연직분포는 고도가 높아짐에 따라 지수적으로 감소하는 형태를 보이는 것으로 가정되므로 (Hess *et al*., 1998; McClatchey *et al*., 1972; Elterman, 1968), 고도 z km에서의 광 소산계수($\sigma_{Ext}(z)$)는 다음의 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\sigma_{Ext}(\lambda,z)=\sigma_{Ext}(\lambda,0)\cdot\exp\left(\frac{-z}{H}\right) \quad (6)$$

위 식에서 H는 에어러솔 입자 개수(또는 농도)의 지수적 감소 정도를 결정하는 척도 고도(scale height)이다. 식 (6)을 식 (5)에 대입하여 적분하면 지수항은 0에 근접하는 매우 작은 값이 되므로 식 (7)처럼 간단히 변형된다.

$$\tau_{Aer}(\lambda)=\sigma_{Ext}(\lambda,0)\cdot H\cdot\left\{1-\exp\left(\frac{-\infty}{H}\right)\right\}\cong\sigma_{Ext}(\lambda,0)\cdot H \quad (7)$$

여기서 H는 에어러솔의 지수적 분포를 결정하는 파라미터로서, H값이 작아질수록 고도 별 감소율이 커지게 되며, 동일한 $\sigma_{Ext}(\lambda,0)$조건에서 AOT값은 작아지게 된다. 그리고 이러한 대기 조건에서 에어러솔은 주로 지표면과 가까운 저층에 주로 존재하는 것을 의미한다.

H값을 결정하기 위하여 식 (7)에서 필요한 것은 AOT와 $\sigma_{Ext}(\lambda,0)$인데, AOT는 sunphotometer 또는 인공위성으로부터 획득 가능하다. $\sigma_{Ext}(\lambda,0)$는 지상에서 직접 입자에 대한 광학 관측 자료를 사용해야 하나, 간접적으로 지상에서 목측으로 관측된 시정 거리로부터 식 (8)과 같은 Koshemieder 방정식 (Middleton, 1952)을 이용하여 계산된 $\sigma_{Ext}(550\,nm,0)$를 이용하기도 한다 (Nicole *et al*., 2010; Wong *et al*., 2009; Qiu *et al*., 2005).

$$Vis=\frac{3.912}{\sigma_{Ext}(550\,nm)} \quad (8)$$

본 연구에서는, 동 시간에 관측된 Microtops AOT와 Transmissometer 소산계수 자료를 이용하여 식 (7)의 관계로부터 H의 값을 결정하였다. 그런 다음 식 (6)으로부터 각 고도 별 소산계수와 시정 거리가 결정된다. 이상과 같이, AOT로부터 계산된 시정 거리 값은, 서울시 대기 집중 관측기간 동안 Transmissometer를 이용하여 측정된 광 소산계수와 시정 거리, 그리고 서울 기상청에서 관측된 목측 자료를 수집하여 상호 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 에어러솔 광학두께와 척도 고도의 결정

서울시에서 수행된 대기 집중 관측기간 동안의 Microtops-II sunphotometer로 관측된 일 평균 AOT 값의 변화는 그림 2와 같다. 집중 관측 기간 동안 서울시의 평균 AOT는 약 0.34±0.09 (λ=380 nm), 0.29±0.08 (λ=440 nm), 0.26±0.07 (λ=500 nm), 0.18±0.06 (λ=675 nm), 0.14±0.05 (λ=870 nm)로서, 비교적 낮은 값과 함께 적은 변화량을 나타내었다. 그리고

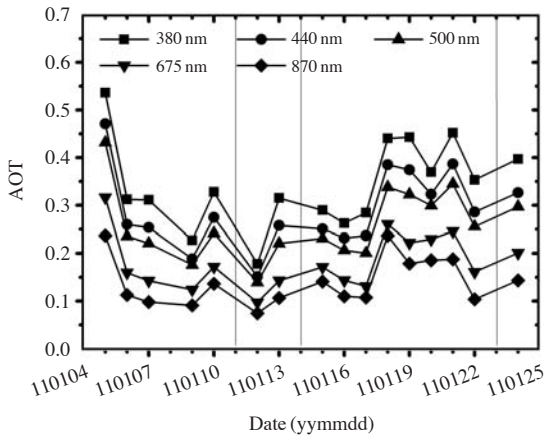

Fig. 2. Time series of daily mean AOTs during the intensive observation period. Vertical solid lines mean snow days.

식 (9)에서 시정 거리 산정을 위하여 필요한 550 nm에서의 AOT (AOT_{550})는 식 (10)의 α (Ångström, 1961)를 이용하여 식 (11)과 같이 계산하였다. 여기서 α값은 에어러솔 입자의 크기와 관련이 있으며, 큰 값을 가질수록 대기중에 미세입자가 우세하게 존재함을 의미한다.

$$\alpha=\frac{\sum_{i=1}^{5}\left[\left(\ln\tau_{Aer}(\lambda_i)-\overline{\ln\tau_{Aer}}\right)\cdot\left(\ln\lambda_i-\overline{\ln\lambda}\right)\right]}{\sum_{i=1}^{5}\left[\left(\ln\lambda_i-\overline{\ln\lambda}\right)^2\right]} \quad (9)$$

$$\tau(550\,nm)=\tau(500\,nm)\left(\frac{550}{500}\right)^{-\alpha} \quad (10)$$

전체 기간 동안의 평균 AOT_{550}과 α값은 각각 0.22±0.08, 1.14±0.26로 관측되었다. 서울의 AERONET sunphotometer 관측 DB 자료 중 2012년 2월부터 2013년 7월까지 서울대에서 관측된 평균 AOT_{550}값이 0.44±0.17이고 α값은 1.24±0.12인 것과 비교할 때 하면, 이렇게 비교적 낮은 AOT_{550}과 큰 α값은 주로 미세입자 성분이 대기 중에 약하게 존재하는 것으로 판단할 수 있다. 또한, 이러한 결과는 대기 에어러솔의 농도가 상대적으로 낮았으며, 관측기간 동안의 급격한 변화를 나타낼 수 있는 이벤트성 사례가 포함되지 않은 것을 의미한다. Xin *et al*. (2007)은 중국 각 지역별 AOT 관측결과를 통하여 에어러솔의 영향이 비교적 적고 청명한 대기 상태에서 AOT가 약

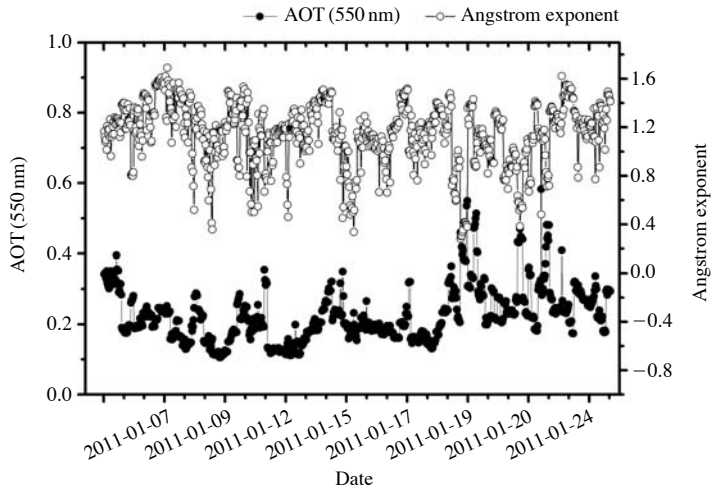

Fig. 3. Time series of instantaneous AOT at 550 nm and angstrom exponent during the intensive observation period.

0.15 정도의 값을 나타내는 것으로 보고하였다. 그리고 국내 AOT의 경향을 보고한 기존의 연구결과와 비교했을 때, 겨울철 저온 건조한 기상조건의 영향으로 대기 중 에어러솔의 농도가 비교적 낮게 관측되는 양상을 보이는 결과와 비교할만하다. 관측기간 동안의 서울시 기상특성은 평균기온 약 −7.15±2.78 ℃, 평균 풍속 2.90±0.75 m/sec, 평균 상대습도 57.0 ±12.5%로 비교적 건조하고 안정된 대기 상태였으며, 2011년 1월 11일과 14일, 23일에는 강설이 기록된 기간은 결측이 되었다.

식(9)에서는 시정 거리를 구하기 위하여 에어러솔의 척도 고도가 결정되어야 한다. 척도 고도를 결정하는 방법으로는 첫째, 기존의 문헌 값을 사용하는 방법과 둘째, 라이다(Lidar)와 같이 대기 연직구조를 측정결과를 활용하는 방법, 마지막으로 식(9)를 이용하여 관측된 시정 거리와 광학두께 값으로 결정하는 방법을 제시할 수 있다. 척도 고도의 개념은 고도에 따른 대기 에어러솔 농도의 지수적 감소를 의미하므로, 높은 고도에서 장거리 이동하는 황사와 같은 에어러솔의 경우는 에어러솔의 연직분포가 지수적 분포와는 다르기 때문에 (Lee, 2013; Shin *et al.*, 2012; Noh *et al.*, 2011) 적용 불가능한 단점이 존재한다. 그러나 본 연구에서 사용된 관측기간 동안에는 황사 현상이 발생하지 않았으며, 풍속이 크지 않았으므로,

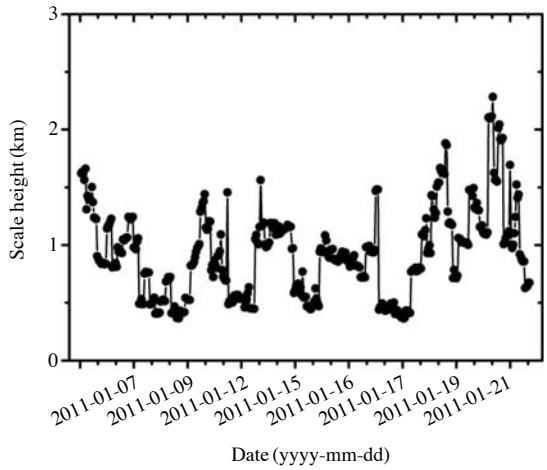

Fig. 4. Time series of aerosol scale heights during the intensive observation period.

대기 경계층 이상의 고도에서 장거리 이동 에어러솔이 존재하지 않는다는 가정하에 지수적 에어러솔 분포를 척도 고도 산출에 적용하였다.

그림 4는 2011년 1월 한달 동안의 Microtops-II sunphotometer와 Transmissometer가 동시간 대의 관측한 자료로부터 계산된 에어러솔 척도 고도 결과로서 평균 0.92±0.38 km의 결과값을 보였다. 표 2는

Table 2. Scale heights from other studies.

References	Period	Location	AOT_{550}	Scale height [km]
Wong *et al.* (2009)	2007/02/01, 2007/02/03	Hong Kong	0.60±0.12	1.48±0.33
Qiu *et al.* (2005)	Winter, 1994~2001	11 cities of China	0.61±0.06	1.96±0.54
Hess *et al.* (1998)		*OPAC model	0.064~0.643 (for Continentral, urban)	2
Ricchiazzi *et al.* (1998)		**SBDART model	Vis=5 km, 23 km	0.99, 1.45
This study	2011/01/05~2011/01/24	Seoul	0.22±0.08	0.92±0.38

* The Optical Properties of Aerosols and Clouds
** The Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer

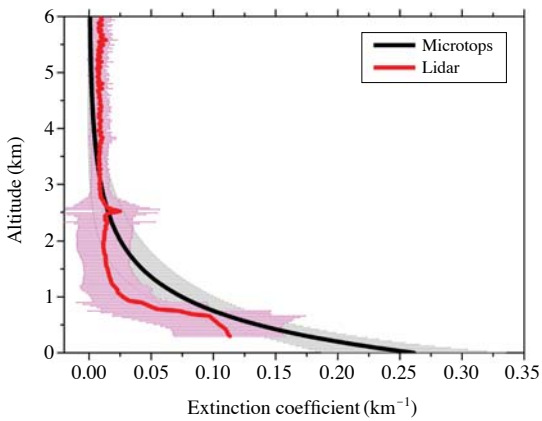

Fig. 5. Microtops retrieved and Lidar observed aerosol extinction profiles during the Seoul winter IOP 2011.

다른 지역에서 관측된 결과값과 에어러솔 모델에서 널리 사용되고 있는 결과로서, 서울지역의 척도 고도보다 비교적 높은 값을 나타냈다.

3. 2 Microtops-II 에어러솔 연직분포와 시정 거리

Microtops-II sunphotometer로부터 측정된 AOT값은 2.3절에서 설명한 소산계수 연직분포 및 시정 거리 산출을 위한 모델식을 이용하여 각 고도 별 에어러솔 소산계수와 시정 거리로 환산되었다. 그림 5는 집중관측기간 동안의 Microtops-II 분석된 에어러솔 소산계수와 MPoLAR로 관측된 에어러솔 소산계수의 연직분포도이다. MPoLAR 소산계수는 자료 분석에 있어 후방산란신호를 소산계수로 전환하기 위하여 가정된 라이바 비(Lidar Ratio)를 사용한 점과 라이다 시스템의 구조적 한계인 지표 근처에서의 후방산란신호를 측정하지 못하는 점으로 인하여 절대적 비교에는 한계가 있다. 그럼에도 불구하고, 두 결과에 대한 에어로솔 소산계수에 대한 상대차이는 0.009±0.01 km^{-1}로서 매우 적은 값을 나타내고 있다.

그림 6은 Microtops-II로 분석된 시정 거리와 Transmissometer로 관측된 시정 거리, 그리고 기상청에서 제공된 목측 시정 거리와의 상호 비교결과이다. Microtops-II 시정 거리에 사용된 H 값은 식(7)로부터 구하는 방법, 표 2에서 서울시 집중 관측 기간 동안의 평균값인 0.92 km, 그리고 OPAC 모델에서 사용되는 2 km를 각각 사용하여 계산하였다. 상관분석에 사용된 표본의 개수는 (Microtops-II vs. Transmissometer)와 (목측 vs. Transmissometer)의 관계에서 각각 356개와 84개이다. 상관분석 결과 (Microtops-II vs. Transmissometer)의 1차 선형회귀 방정식은 Microtops-II =1.0×Transmissometer−0.11로서 두 자료 간의 높은 상관계수(R=0.99)를 보였다. 그리고 두 자료간의 상대오차인 RMSD (Relative mean standard difference) 값도 0.11 km로 적은 수치를 나타내었다. 그림 6b와 6c에서는 H값이 커질수록 두 관측기기 간의 상대오차 값이 2.7 km에서 5.87 km로 커지기 때문에 가능하면 모델에서 사용되는 값을 이용하는 것보다는 실제 관측값 또는 기후학적 자료를 사용하는 것이 효과적임을 알 수 있다. 그러나, 목측과 Transmissometer 관계에서는 1차 선형회귀 방정식 목측=0.03 Transmissometer+15.69로서 매우 낮은 상관계수(R=0.03)을 나타내었다. 이러한 결과는 목측의 시공간적 해상도가 다르기 때문인 것으로 판단된다.

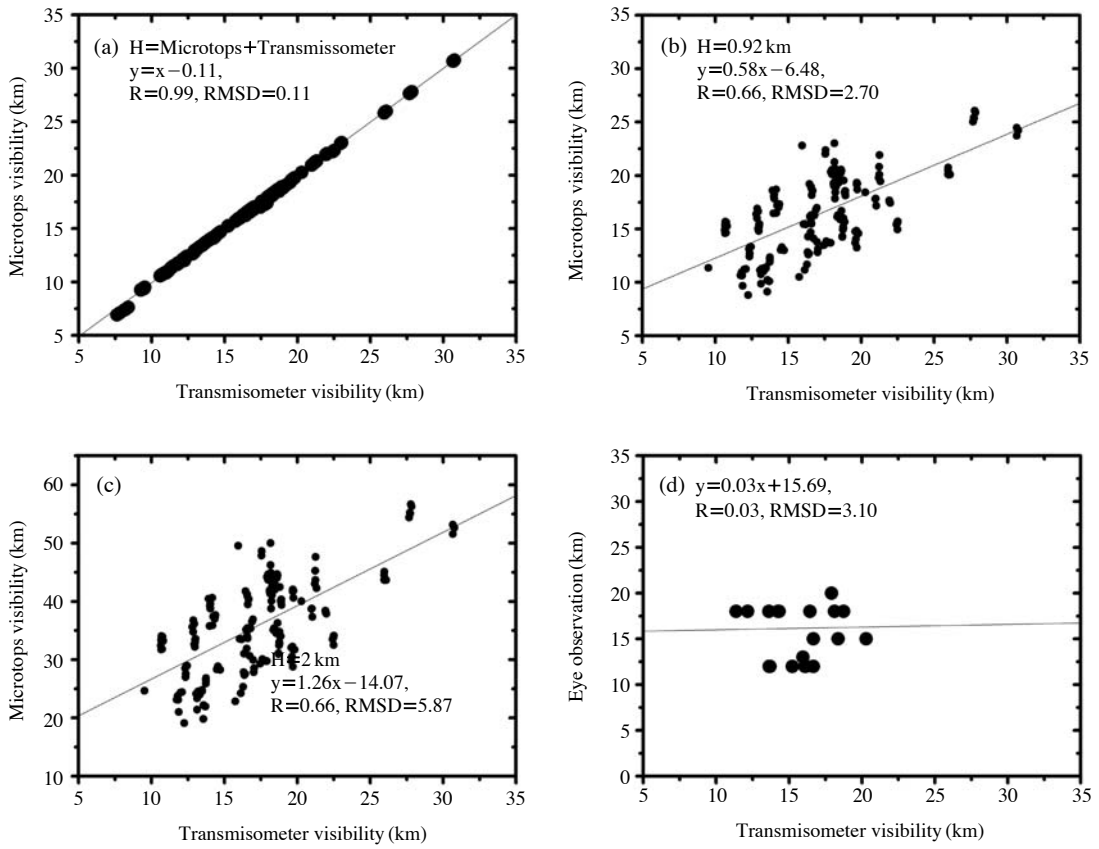

Fig. 6. Scatter plots for visibility values from Microtops and Transmissometer for (a) dynamic H values, fixed H values of 0.92 km (b) and 2.0 km (c), and (d) Eye observations versus Transmissometer visibility.

그림 7은 Microtops-II, Transmissometer, 목측을 통하여 획득한 시정 거리의 시계열 분석결과이다. 총 관측 기간 동안 세 관측기기로부터의 시정 거리의 평균값은 16.17±4.45 (Microtops-II), 16.24±4.43 (Transmissometer), 16.15±3.07 (목측)으로서 차이가 적었으나, 목측의 경우는 시간적 관측 한계로 인하여 동일 관측 시간대의 관측차가 큰 경우가 발견된다.

시정 거리와 AOT는 관측 방향이 서로 다른 조건에서 관측된 물리량이다. 이러한 차이점이 AOT로부터 생산된 시정 거리가 가지는 오차를 설명할 수 있지만, 두 가지 모두 대기중 에어러솔의 부하량의 함수이므로 안정적인 대기조건 하에서 대기질 감시에 있어 공간적인 한계를 극복할 수 있다. 특히 시정 거리는 광 경로가 길어질수록 시정 거리가 적용되는 대상영역이 넓어지게 된다. 그러나 광 경로상에 존재하는 에어러솔 입자로 인한 광 투과도는 에어러솔의 농도 변화에 따라 지역적 편차가 생길 수 있으므로, 광 경로의 방향에 따라 다른 시정 거리 값이 산출될 수 있다. 따라서, 어떠한 지역의 시정 거리는 단순히 한 방향을 위주로 관측한 결과를 사용하기 보다는 다양한 지점에서의 관측 결과를 통합한 결과를 제시하는 것이 효율적이다. 이러한 관점에서 본 연구결과는 다양한 지점에서 관측된 AOT 값으로부터 시정 거리를 산출할 수 있는 장점이 있다. 반면에 AOT 측정시 대기 연직구조가 다양하게 변화하는 경우에 이를 고려하지 않는 경우에는 분석 민감도가 약해지는 단점이 있다.

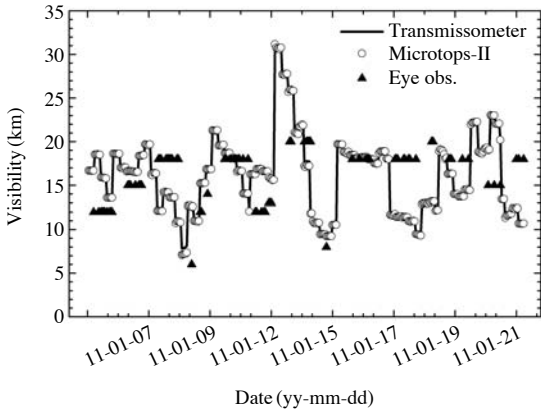

Fig. 7. Time series of visibility observed from Transmissometer, Microtops-II, and Eye observation, respectively.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 2011년 겨울철 서울에서 수행된 대기 집중 관측 기간 동안에 이동형 복사관측기기인 Microtops-II sunphotometer를 이용한 파장별 복사량 자료로부터 5개 밴드의 파장별 AOT 자료를 산출하였다. 그리고 지상에서 Microtops-II로부터 산출된 AOT는 연직 대기를 대표하는 물리량이지만, 물리적 방정식을 이용한 시정 거리 모델링 기법을 이용하여 고도 별 소산계수 및 지표 고도 수준의 시정 거리로 전환할 수 있다. Microtops II를 이용한 시정 거리 모델링에 대한 주요 연구결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 집중 관측 기간 동안의 서울시 대기 중 에어러솔의 광학 특성은 $AOT_{550}=0.22\pm0.08$, $\alpha=1.14\pm0.26$ 로서 비교적 낮은 농도 수준의 미세입자가 존재하였다.

(2) 집중 관측 기간 동안의 서울시의 에어러솔 척도 고도는 0.92±0.38 km로서, 기존의 중국 도시지역에서 관측된 값 및 널리 사용되고 있는 에어러솔 모델링의 자료들과는 다소 낮은 값을 나타났다. 척도 고도에 대한 결과는 국내에서는 최초 사례이며, 국내 대기 에어러솔의 모델링에 필요한 기본 자료로서 척도 고도에 대한 추가연구의 필요성이 있다.

(3) Microtops-II sunphotometer로 산출한 시정 거리는 Transmissometer로 측정한 시정 거리와 높은 상관관계 결과 (1차 선형회귀직선 기울기=0.94, R= 0.82)를 보였으며, 기존의 지점 관측 방법의 한계를 극복하고 할 수 있는 가능성을 보였다.

본 연구의 단점으로는 시정 거리 산출을 위한 모델링에서 사용된 대기 연직분포를 지수적으로 가정하였기 때문에, 실제 대기 에어러솔의 연직구조가 다른 양상을 보이게 되면 오차가 커진다는 점이다. 그러나 비교적 안정된 대기조건하에서 시정 거리산출을 위한 결과가 충분히 활용 가능함을 증명하였다. 본 연구결과는 척도 고도에 대한 정확도가 보장될 경우, AOT를 관측할 수 있는 다른 관측 기기 (복사계, 인공위성 등)로부터 시정 거리 및 대기 연직구조에 대한 정보를 제공할 수 있으므로, 향후 연구에서는 지리정보시스템과 연계하여 대기 에어러솔의 3차원적 구조를 가시화하는 연구에 수행될 것이다.

감사의 글

이 논문은 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2010-0025871).

References

Ångström, A. (1961) The parameters of atmospheric turbidity, Tellus XVI pp. 214-223.

Cho, Y.-S., C.-H. Jung, J.-Y. Son, Y. Chun, and J.-T. Lee (2007) A Time-series study on relationship between visibility as an indicator of air pollution and daily respiratory mortality, Korean J. of Atmos. Environ., 27(3), 326-336. (in Korean with English abstract)

Elterman, L. (1968) UV, visible, and IR attenuation for altitudes to 50 km, Technical Report AFCRL-68-0153, Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom Air Force Base, Bedford, MA, USA.

EPA (1999) Visibility monitoring guidance, EPA-454/R-99-003.

Hansen, J.E. and L.D. Travis. (1974) Light Scattering in Plane-

tary Atmospheres, Space Sci. Rev. 16, 527.

Hess, M., P. Koepke, and I. Schult (1998) Optical Properties of Aerosols and clouds: The software package OPAC, Bull Am. Meteorol. Soc., 79, 831-844.

Kaufman, Y.J., D. Tanré, H.R. Gordon, T. Nakajima, J. Lenoble, R. Frouin, H. Grassl, B.M. Herman, M.D. King, and P.M. Teillet (1997) Passive remote sensing of tropospheric aerosol and atmospheric correction for the aerosol effect, J. of Geophys. Res., 102, 16815-16830.

Lee, K.H. (2013) Three dimensional monitoring of the Asian dust by the COMS/GOCI and CALIPSO satellites observation data, Korean J. of Atmos. Environ., 29 (2), 199-210. (in Korean with English abstract)

McClatchey, R.A., R.W. Fenn, J.E.A. Selby, F.E. Volz, and J. S. Garin (1972) Optical properties of the atmosphere. 3rd ed. AFCRL Environ. Res. Papers No. 411, 108 pp.

Middleton, W. (1952) Vision through the atmosphere. University of Toronto Press.

Nicole, J.E., M.S. Wong, and J. Wang (2010) A 3D aerosol and visibility information system for urban areas using remote sensing and GIS, Atmos. Environ., 44, 2501-2506.

Nicolet, M. (1981) The solar spectral irradiance and its action in the atmopsheric photo dissociation processes, Planet. Space Sci., 29, 951-974.

Noh, Y.M., K.H. Lee, and H. Lee (2011) A retrieval of vertically-resolved Asian dust concentration from quartz channel measurements of Raman lidar, Korean J. of Atmos. Environ., 27(3), 326-336. (in Korean with English abstract)

Qiu, J., X.M. Zong, and X.Y. Zhang (2005) A study of the scaling height of the tropospheric aerosol and its extinction coefficient profile, J. Aerosol Sci., 36, 361-371.

Retalis, A., D.G. Hadjimitsis, S. Michaelides, F. Tymvios, N. Chrysoulakis, C.R.I. Clayton, and K. Themistocleous (2010) Comparison of aerosol optical thickness with in situ visibility data over Cyprus, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 10, 421-428, doi:10.5194/nhess-10-421-2010.

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, B. Am. Meteorol. Soc., 79(10), 2101-2114.

Shin, S., D. Shin, K. Lee, and Y. Noh (2012) Classification of dust/non-dust particle from the Asian dust plumes and retrieval of microphysical properties using Raman Lidar System, Korean J. of Atmos. Environ., 28(6), 688-696. (in Korean with English abstract)

Vandaele, A.C., C. Hermans, S. Fally, M. Carleer, R. Colin, M.-F. Merienne, A. Jenouvrier, and B. Coquart (2002) High-resolution Fourier transform measurement of the NO_2 visible and near-infrared absorption cross sections: Temperature and pressure effects, J. Geophys. Res., 107(D18), 4348, doi:10.1029/2001JD000971.

Wong, M.S., J. Nichol, and K.H. Lee (2009) Modeling of arosol vertical profiles using GIS and remote sensing, Sensors, 9(6), 4380-4389, doi:10.3390/s90604380.

Xin, J., Y. Wang, Z. Li, P. Wang, W.M. Hao, B.L. Nordgren, S. Wang, G. Liu, L. Wang, T. Wen, Y. Sun, and B. Hu (2007) Aerosol optical depth (AOD) and Angstrom exponent of aerosols observed by the Chinese Sun Hazemeter Network from August 2004 to September 2005, J. Geophys. Res., 112, D05203, doi:10.1029/2006JD007075.