

DA2) 대기 에어로졸 광학 특성 중 구름 효과 제거 분석

Analysis of Aerosol Optical Properties through Cloud Screening and Quality Control Algorithm

민희경 · 오성남 · 김지영

기상연구소 응용기상연구실(국가지정연구실)

1. 서론

대기 중 에어로졸은 지구표면에 도달하는 태양복사에너지를 흡수 또는 산란시키는 직접 효과 및 대기물리작용에 의한 구름의 형성 및 구름 수명에 영향을 미치는 간접 효과를 통해 지구복사 평형에 불균형을 초래함으로써 전지구적인 기후변화에 영향을 미친다(Toon, 1995). 이들 에어로졸은 온실기체와는 달리 $-0.4 \sim -3.0 \text{ W/m}^2$ 의 지구 평균 복사강제력을 나타내면서(IPCC, 1995) 대기 중에 냉각 효과(whitehouse effect)를 일으킨다(Schwartz, 1996). 또한 지구 평균 복사강제력의 산출에 있어 대기 에어로졸은 상당한 불확실성을 가지므로 이들에 대한 지속적인 관측과 특성의 규명이 요구된다. 항공기, 선박 및 위성관측 등에 의한 관측과는 달리 지상관측은 에어로졸의 장기간의 지속적 관측을 통한 특성 파악 및 정량적 규명이 용이하다. ACE-Asia 등과 같은 국제적인 지상관측 프로그램에서 에어로졸 광학 특성 및 대기 복사관측에 쟁점이 되는 항목들 중 대표적인 것이 구름 효과의 제거(Cloud screening) 기술이다(표 1, Richard Arimoto, 2000).

본 연구에서는 지상관측 Sunphotometer 자료를 이용한 에어로졸의 광학 특성 분석에 대하여 미 항공우주국의 AERONET(AEROSOL ROBOTIC NETWORK) 프로그램에서 개발된 구름 효과 제거 알고리즘을 적용해 보고 그 특성을 파악하고자 한다.

Table 1. Aerosol optics and radiation measurements recommended for the ACE-Asia network sites.

Parameter	Instrument	Issues	Parameter	Instrument	Issues
Aerosol spectral optical depth	Sunphotometers	Operating wavelengths;	Aerosol light Scattering Coefficient	Nephelometers	Operating wavelengths;
		Correction for Rayleigh scattering & Gaseous absorption;			Control relative humidity & temperature;
		Cloud screening.			Control size-cut;
Direct solar Radiation	Cavity radiometers; Pyrheliometers	Cloud screening;	Aerosol light Absorption Coefficient	Aethalometers, Absorption Photometers	Control flow rate
			Solar-tracking accuracy;		
Global solar Radiation	Pyranometers	Poor weather protection;	Long-wave radiation	Pyrgeometers Pyrradiometer	Operating wavelengths;
		Body temperature			Control size-cut;
Diffuse solar Radiation	Shaded pyranometers		Sun and sky Radiance	Sun/sky radiometers	Control flow rate
					Cloud screening
					Dome heating control
					Cloud screening.

2. 관측기기 및 자료의 수집

사용된 복사관측 기기는 Sunphotometer(MS-110, EKO)로서 서울시 송월동에 위치한 기상청 서울관측소 옥상(37° 29' N, 126° 55' E, 평균해면고도 33.51m)에서 1998년 4월 이래로 관측되어오고 있다. 본 연구에서는 1999년 자료를 사용하였고, 2월까지의 자료는 매 10분 자료이며, 이후 매 1분 자료로 전환되었다. Sunphotometer는 파장별 직달 일사량을 측정하고 대기 중의 감쇄 정도를 계산함으로써 에어로졸 광학 깊이를 산출하기 위한 기기이다. 측정 파장은 368, 500, 675, 778, 862, 938nm의 6개 채널 영역을 가지며, 이 중 675nm와 938nm 채널은 각각 오존 및 수증기의 흡수영역이고, 368, 500, 778, 862nm 파장역이 대기 중의 수증기나 오존 등 기체분자에 의한 흡수밴드를 피하여 선택된 에어로졸 분석에 이용되는 채

널이다(WMO, 1993; Dutton *et al.*, 1994). 자료의 출력단위는 mV 이다.

3. 연구방법

에어로졸 광학 깊이 산출을 위해 Bouguer-Lambert-Beer의 법칙을 사용한다.

$$I(\lambda) = E_0 I_0(\lambda) e^{(-\tau(\lambda) m_r)} \quad (1)$$

여기서, $I(\lambda)$ 는 파장 λ 에서 관측된 직달일사량이고, E_0 는 지구 공전궤도 이심률 보정계수, $I_0(\lambda)$ 는 대기의 일사량, $\tau(\lambda)$ 는 파장별 광학깊이, m_r 은 태양고도에 따른 상대광학 공기질량(relative optical airmass, $m_r = \sec \theta$, θ 는 천정각)이다. 식 (1)에서 $I_0(\lambda)$ 값을 맑은 날에 대하여 Langley 방법을 이용하여 얻은 값을 사용하였다. 따라서, 식 (1)로부터 $\tau(\lambda) m_r$ 값이 얻어진다.

태양복사는 지표에 도달하기까지 여러 가지 대기성분에 의해 감쇄되는데, 파장별 광학 깊이 $\tau(\lambda)$ 는 다음과 같이 각 대기 성분의 합으로 표현된다.

$$\tau(\lambda) m_r = \sum \tau_i(\lambda) m_{r,i} \quad (2)$$

여기서, i 는 각 대기성분, 즉 에어로졸(a), 공기분자에 의한 레일리 산란(R), 오존(o) 및 수증기(w) 등에 의한 효과를 나타낸다. 식 (2)의 우변에서 에어로졸을 제외한 대기성분에 의한 값이 계산되거나 가정된 후 에어로졸 광학깊이 τ_a 값이 결정 될 수 있다. 각 대기성분 중 공기분자의 레일리 산란에 의한 광학 깊이(τ_R)은 Leckner(1978)에 의하여 다음과 같이 구하였다.

$$\tau_R = \frac{p}{p_0} 0.008735 \lambda^{-4.08} \quad (3)$$

여기서, p 는 관측소 기압, $p_0(=1013.25\text{hPa})$ 는 평균해면기압이다. 그리고 500nm에서의 오존 광학깊이는 Dutton 등(1994)의 방법에 따라 오존 전량값을 기준값인 330 돌슨 단위(DU)로 나눈 후 0.0087을 곱하여 계산하였으며, 오존 전량값은 연세대 대기과학과 옥상에서 돌슨분광광도계로 관측된 1999년 일자료를 사용하였다. 또한 수증기에 의한 효과나 500nm 이외의 파장영역에 대한 오존 광학 깊이는 그 값이 작아 무시하였다(Dutton *et al.*, 1994, 민희경, 2000).

옹스트롬 혼탁도(Ångström turbidity) 식에 따르면 에어로졸 광학 깊이는 다음의 식 (4)와 같이 옹스트롬 혼탁계수(β)와 파장지수(α)로 표현할 수 있다. 본 연구에서는 정확한 α 값의 산출을 위해 4개의 에어로졸 채널(368, 500, 778, 862nm)에서 구한 τ_a 값을 사용하여 최소사승법으로 식(4)의 양변에 상용대수를 취한 후 선형회귀식을 구하는 방법으로 α 값을 산출하였다.

$$\tau_a(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (4)$$

β 는 대기 중에 존재하는 에어로졸의 양 혹은 혼탁정도를 나타내며 보통 0.0에서 0.5까지의 값을 가진다. 그리고, α 는 에어로졸 입자의 크기분포와 관련된 값으로서 α 값이 클수록 대기의 칼럼 내에 크기가 작은 입자들이 큰 입자보다 많이 존재함을 의미한다. 일반적으로 α 값은 0.5와 2.5사이에 분포하며,

약 1.3 정도의 평균값을 가지는 것으로 알려져 있다(Iqbal, 1980).

NASA의 AERONET 프로그램에서 개발된 구름효과 제거 및 자료 질 검증 알고리즘은 자료질의 검정, triplet 안정도 기준 적용, 주간 안정도 평가, 평탄화 기준 적용 및 삼 표준편차(3σ) 기준 적용 과정들을 포함한다(Smirnov, *et al.*, 2000). 자료질의 검정은 에어로졸 광학 깊이가 음의 값일 때의 자료를 제거하는 과정($\tau_a(\lambda) > 0$)이고, triplet 안정도 기준은 연속된 세 값 중 최고, 최소값의 편차가 0.02 보다 적거나 또는 에어로졸 광학 깊이의 0.03배보다 적을 때의 자료만을 선택하는 과정($(\tau_{max} - \tau_{min}) < 0.02$ or $(\tau_{max} - \tau_{min}) < 0.03 * \tau$)이다. 또한 주간 안정도 평가는 500nm의 일 표준편차값이 0.015이하일 때의 자료만을 선정하여 구름이 없는 날로 간주하고, 그 이상이 될 때는 평탄화 기준($D < 16$)을 적용하여 만족하는 자료들을 다시 삼 표준 편차 기준을 적용($\tau(500nm) \pm 3\sigma$ and $\alpha \pm 3\sigma$)함으로 구름 효과를 제거하는 과정이다. 여기서 $D > 16$ 일 때는 D의 식에서 최대가 되는 항을 찾아 이와 관련된 에어로졸 광학 깊이 값을 제거한 후 주간안정도 평가를 거친다. 그림 1은 AERONET에서 개발된 구름효과 제거 알고리즘의 순서도를 보여준다.

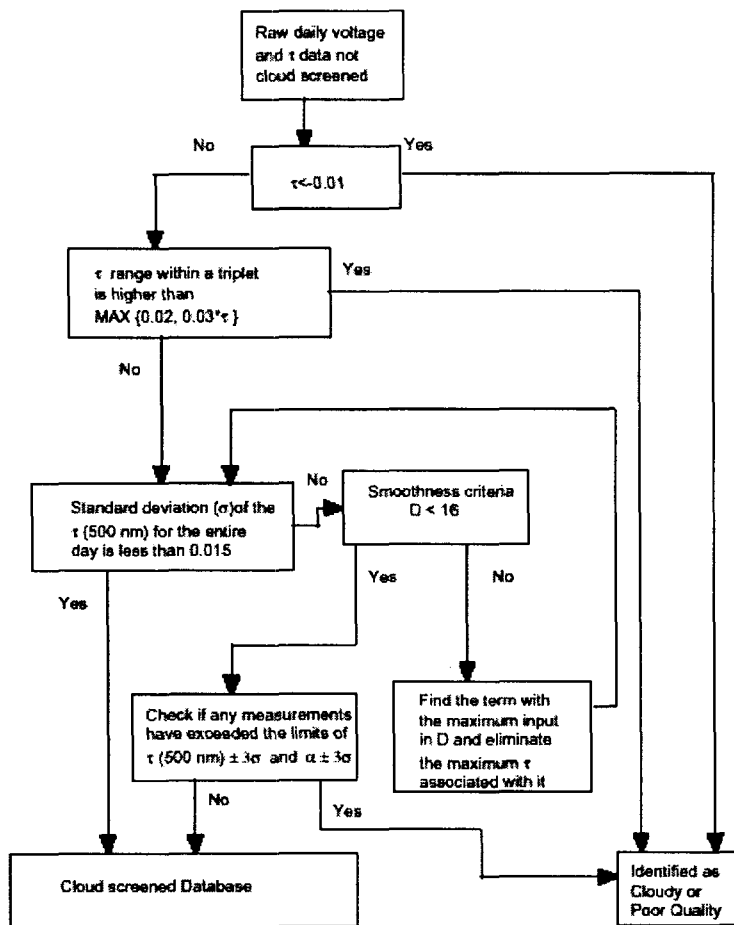


Fig. 1. Flow diagram describing the cloud screening algorithm for the AERONET aerosol optical depth database (Smirnov, *et al.*, 2000)

4. 결과 및 고찰

1999년 복사자료를 이용한 에어로졸 광학 특성자료 분석에서 구름효과 제거 알고리즘을 적용했을 때 구름의 영향들이 많이 제거되는 것으로 나타났다. 그림 2는 1999년 4월 15일에 Sunphotometer에서 측정된 초기 복사관측자료(Fig. 2-a)와 구름제거 알고리즘을 적용하기 전(Fig. 2-b)과 후(Fig. 2-c)의 에어로졸 광학 깊이의 주간 변화를 나타낸다. 368, 500, 778, 862nm에서의 각 파장별 에어로졸 일 평균값은 알고리즘 적용 전일 때 0.833, 0.583, 0.464, 0.336 이었으며, 알고리즘 적용 후 0.674, 0.412, 0.335, 0.206 이었다. 그림 2-a와 b에서 나타난 바와 같이 15시가 지나면서 구름효과가 나타나는 것을 알 수 있으며, 알고리즘 적용 후 구름의 효과가 제거되었음을 그림 2-c에서 확인할 수 있다. 그림 3-a에 나타나는 옹스트롬 파장지수(α)의 시간 변화를 통해 15시 이후에 구름입자로 추정되는 큰 입자의 에어로졸이 출현하고, 알고리즘의 적용 후 구름에 의한 영향이 제거되는 것을 볼 수 있다. 이는 기상청 서울 관측소의 기상자료에서 얻어진 같은 날 06시, 09시, 12시, 15시, 18시에 각각 0, 0, 0, 1, 8 로 나타나는 전운량의 변화와도 일치하였다.

알고리즘 적용 전의 1999년의 연평균 에어로졸 광학 깊이는 각 파장별 1.787, 1.458, 1.287, 1.085였으며, 적용 후는 각각 1.027, 0.748, 0.589, 0.402였다. 옹스트롬 파장지수는 알고리즘 적용 전 0.799, 적용 후 1.041로 나타났으며, 배경값 1.6과 평균 1.3보다 낮은 값으로(McClatchey et al., 1982; Iqbal, 1980) 서울 에어로졸의 크기가 일반적으로 평균보다 조금 큰 것을 알 수 있다. 알고리즘의 구름효과 제거가 상당히 좋은 결과를 가져오는 반면 여름철의 에어로졸 광학 깊이는 여전히 높은 것으로 나타났다. 따라서 한국의 기상조건에 보다 알맞은 알고리즘의 개선이 필요하며, 이 알고리즘은 overcast의 기상조건과 단시간의 대규모 먼지이동을 감지하는데 어려움을 가지고 있으므로 이에 대한 개선 또한 요구되어진다. 향후 보다 정확한 에어로졸 광학 깊이의 산출을 위해 Skyradiometer 자료와도 비교검증 할 계획이다.

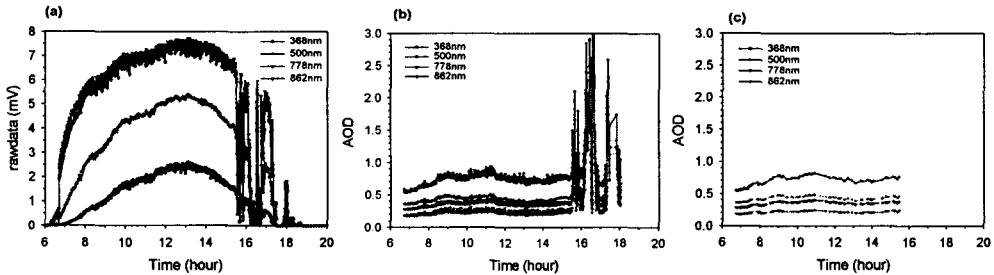


Fig. 2. Diurnal variation of (a) raw data and aerosol optical depth (b) before and (c) after cloud screening algorithm applied on 15 April 1999.

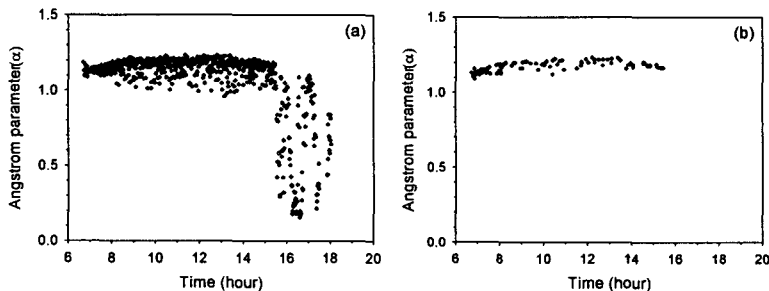


Fig. 3. Diurnal variation of Ångström parameter before (a) and after (b) cloud screening algorithm applied on 15 April 1999.

사 사

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 국가지정연구실 사업의 하나인 기상연구소 응용기상연구실의 "한반도 기후변화 감시 기술 개발" 연구과제(과제번호: 2000-3-193)로 수행된 내용이며, 오존 관측자료를 제공해주신 연세대학교 조희구 교수님께 감사의 말씀을 드립니다.

참 고 문 헌

- 김지영, 전영신, 오성남 (2000) 기단의 유형과 이동경로에 따른 대기 중 에어로솔 광학 깊이의 특성, *한국기상학회지*, 36(4) (인쇄중).
- 민희경, 김영준, 오성남, 조희구 (2000) 대기 중 에어로솔 광학 깊이의 변화에 대한 연구, *한국기상학회 춘계학술발표회*, 4. 27~28, 대전공군기상전대.
- 민희경(2000) A Study on Variation of Aerosol Optical Depth(AOD) in the Atmosphere using RSR(Rotating Shadowband Radiometer) data, K-JIST, MS Thesis.
- Dutton, E. G., P. Reddy, S. Ryan, and J. J. DeLuisi (1994) Features and effects of aerosol optical depth observed at Mauna Loa, Hawaii: 1982-1992. *J. Geophys. Res.*, 99(D4), 8295-8306.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (1995) World meteorological office, United Nations Environmental Programme, *Radiative forcing of climate change, The 1994 Report of the Scientific Assessment Working Group of IPCC. Summary for policymakers.*
- Iqbal, M. (1983) An introduction to solar radiation. Academic Press, 390pp.
- McClatchey, R. A., Bolle, H. J., and Kondratyev, K. Ya. (1982), A preliminary cloudless standardatmosphere for radiation computation, *Int. Radiation Com. Rep.*, Boulder, Colorado, USA, 78-104.
- Richard Arimoto (2000) Collaborative Research: Aerosol Characterization Experiment (ACE)-Asia Surface Network Implementation, Operations, and Coordination, *NSF proposal.*
- Smirnov. A., B. N. Helben, T. F. Eck, O. Dubovik, I. Slutsker (2000) Cloud screening and quality control algorithms for the AERONET database, *Rem. Sens. Environ.*
- Toon, O. B. (1995) Modeling the relationships between aerosol properties and the direct and indirect effects of aerosols on climate, *Aerosol forcing of climate*, 197-213pp.
- WMO (1993) Report of the WMO workshop on the measurement of atmospheric optical depth and turbidity. *WM, Global Atmosphere Watch No. 101, WMO/TD-No. 659, 5-6.*