

스카이라디오미터 모델에 따른 에어러솔의 광학적 특성 비교

최용주¹⁾, 김영성^{1)*}, 손병주²⁾

¹⁾한국의외국어대학교 환경학과

²⁾서울대학교 지구환경과학부

(접수일 : 2011년 5월 27일, 게재확정일 : 2011년 8월 17일)

Comparison of Aerosol Optical Properties from Different Models of Skyradiometer

Yongjoo Choi¹⁾, Young Sung Ghim^{1)*}, and Byung-Ju Sohn²⁾

¹⁾Department of Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies

²⁾School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

(Received 27 May 2011, Accepted 17 August 2011)

Abstract Aerosol optical properties from the radiation measurements by SKYNET PREDE skyradiometers, POM-01 and POM-02 were compared during the inter-calibration campaign at Seoul in February 2009. The monochromatic solar flux at the top of the atmosphere (F_0) gave a relative standard deviation (RSD) of 9-10% for both instruments. This comparatively high value of RSD was probably because F_0 was determined at short time intervals, in the morning and afternoon, using the measurements made in the polluted environment of Seoul. Although POM-02 was more effective in tracking the solar radiation, aerosol optical depths (AODs) from the two instruments were very similar after the cloud screening procedure. The squared correlation coefficients (R^2) of single scattering albedo (SSA) and real and imaginary refractive indices between the two instruments was around 0.5 but increased to 0.7-0.8 when only using AOD greater than 0.4. Nevertheless, mean values of the Angstrom exponent, SSA, and the imaginary refractive index of POM-02 were higher than those of POM-01.

Key words: POM-01, POM-02, Cloud screening, Aerosol optical depth, Aerosol optical properties

1. 서 론

지표부터 대기 상부 (top of atmosphere)까지 컬럼 내 에어러솔의 광학적 특성을 파악하기 위하여 다양한 지표 관측망들이 운영되고 있다 (WMO, 2005). 대표적 관측망인 AERONET (Aerosol Robotic Network, <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>)과 SKYNET (Skyradiometer Network, <http://skyrad.sci.u-toyama.ac.jp/>)에는 각각 450여 개, 60여개 관측 지점이 있으며, 각각 sun photometer

(CIMEL CE318-1, -2)와 스카이라디오미터 (skyradiometer; PREDE POM-01, -01MKII, -02, -100P)들을 이용하여 일사를 측정한다. 직달일사와 산란일사 측정 결과는 복원 절차에 따라 광학자료로 변환된다. AERONET은 NASA GSFC (Goddard Space and Flight Center)에서 기기 보정과 자료 수집, 복원을 일괄한다 (Holben et al., 1998). 반면 SKYNET은 지점별로 기기와 자료를 관리하며 일본 쓰쿠바의 MRI (Meteorological Research Institute)에 표준기기를 운용하고 있다 (Takamura et al., 2004).

일사측정 결과로부터 광학자료를 복원할 때 오차에 대하여 많은 연구가 있었다. Tonna et al. (1995)은 산란일사로부터 광학적 두께를 구할 때 지표 반사율, 복소수 굴절률 등 입력자료의 정확성이 미치는 영향을 조사하였고, Boi et al. (1999)은 산란일사만에 의한 AOD

†Corresponding Author: Young Sung Ghim, Yongin-si, Gyeonggi-do, 449-791, Korea
Phone : +82-31-330-4993, Fax : +82-31-330-4529
E-mail : ysghim@hufs.ac.kr

(aerosol optical depth)의 정확도가 직달일사를 함께 이용하였을 때와 다르지 않음을 보고하였다. Dubovik et al. (2002)은 복원과정에서 AOD, 일사량, 방위각, 지표 반사율이 참값과 차이를 보일 때 광학적 특성의 변화를 살펴보았다. 광학적 특성의 오차는 AOD가 작을 때 특히 커서 AOD (440 nm)가 0.2 이하일 때 SSA (single scattering albedo)와 복소수 굴절율의 실수부, n , 허수부, k 의 오차는 각각 0.05-0.07, 0.05와 80-100%를 나타내었다. AOD (440 nm)가 0.5 이상으로 커지면 오차가 줄지만 그럼에도 SSA, n , k 의 오차는 각각 0.03, 0.04, 30-50%였다.

기기에 따른 광학자료의 차이에 대한 연구도 활발하다. Sano et al. (2003)이 AERONET의 CIMEL CE318-2와 SKYNET의 POM-100P를 비교한 결과에서는 670 nm에서 AOD 차이가 0.008로, 4% 이하였다. Campanelli et al. (2004a)은 CE318과 POM-01을 비교하였다. 구름의 영향을 제거하기 전에는 과장에 따라 두 기기의 AOD 차이가 9.3-18%였으나 구름의 영향을 제거한 후에는 9.6-12%로 줄었다. AE (Ångström exponent)의 차이는 일평균 8.6%였으며 6-11시에는 5.7%인데 비하여 11-15시에는 16%로 높았다. Che et al. (2008)은 CE318과 POM-02를 비교하였다. 모든 과장에서 AOD 차이는 1.3% 미만으로 작았지만, AE 차이는 5.8%였다. AOD > 0.4를 대상으로 한 SSA (single scattering albedo)의 차이는 670 nm 이하에서 4% 이하였으나 870, 1020 nm 등 장과장에서는 7% 대로 컸고 POM-02가 CE318에 비해 높았다.

국내 SKYNET 운영팀은 우리나라에 보급된 스카이라디오미터를 비교, 검정하기 위하여 2009년 1월 30일부터 20일간 서울대학교 자연과학대학 옥상 (126.94°E, 37.46°N, 300 m asl)에서, 각각 서울대와 공주대의 POM-01 2대와, 연세대와 한국외대의 POM-02 2대 등 4대의 기기를 공동 관측하였다. POM-01은 Lee et al. (2002)이 1998년 4월 안면도에서 황사의 광학적 특성을 조사하기 위하여, 광종흡 등 (2005)은 공주지역 에어러솔의 광학적 특성을 조사하기 위하여 이용하였다. POM-02는 구름과 크기가 큰 에어러솔을 측정할 수 있도록 장과장 영역을 확장한 모델로, 구자호 등 (2007)은 이를 이용하여 2005년 12월부터 1년간 서울 상공 에어러솔의 광학적 특성을 조사하였다.

이번 연구에서는 공동관측기간 서울대의 POM-01과 한국외대의 POM-02 측정결과로부터, (1) 구름제거 과정, (2) 보정 방법에 따른 대기 상부의 직달일사량 차이, (3) 직달일사로부터 산출되는 AOD와 AE, (4) 역치환 모델 (inversion model)에 의한 SSA, 복소수 굴절율의 실수부 (n), 허수부 (k)의 값을 비교하였다. 기기에 따른 광학 변수의 차이를 분석하여 각기 다른 기기로 측정하였을 때 광학적 특성의 신뢰 구간을 살펴보았다.

한국기상학회 대기 제21권 3호 (2011)

2. 연구 방법

2.1. 측정기와 복원 방법

스카이라디오미터는, 태양의 이동에 따라 태양 천정각에서 직달일사를, 일정한 천정각 하에서 방위각을 변화시키며 산란일사를 측정한다. POM-01과 POM-02 기기의 가장 큰 차이점은 측정 파장 수와 시간 간격에 있다. POM-01은 필터를 이용하여 315, 400, 500, 675, 870, 940, 1020 nm 등 7개 파장을 측정하며, POM-02는 315, 340, 380, 400, 500, 675, 870, 940, 1020, 1600, 2200 nm 등 11개의 파장을 측정한다. POM-01은 3분 간격으로, POM-02는 6분 간격으로 산란일사를 측정한다. 직달일사는, 산란일사를 측정하지 않을 때 30초 간격으로 측정한다.

에어러솔의 광학적 특성은 skyrad.pack v4.2를 이용하여 복원하였다 (Nakajima et al., 1996). 315 nm와 940 nm는 각각 오존과 수증기 흡수 파장으로 복원에 이용하지 않았으며, POM-02의 1600, 2200 nm 자료도 이용하지 않았다. 결국 POM-01에서는 5개 파장, POM-02에서는 7개 파장 자료를 이용하였다. Skyrad.pack에서는 대기 상부에서의 직달일사량을 결정한 후 직달일사가 대기를 지나는 동안 감쇄로부터 AOD를, 산란일사로부터 SSA와 굴절률 등을 구한다. Skyrad.pack의 입력자료로서 필요한 기압, 컬럼 오존량, 지표면 반사율은 각각 기본적으로 제공되는 1 기압, 0.3 cm, 0.1을 이용하였다. 이번 연구에서 AOD는 500 nm 값 (AOD₅₀₀)이며, AE는 WMO (2005)에 따라 500 nm와 870 nm AOD를 이용하여 식 (1)과 같이 계산하였다.

$$AE = \frac{\ln AOD_{870} - \ln AOD_{500}}{\ln 870 - \ln 500} \quad (1)$$

2.2. 구름 제거

일사를 이용한 광학 측정기는 일사가 있는 주간에만 측정이 가능하며 강수가 있거나 구름이 많아도 측정할 수 없다. 특히 얇은 권운층을 에어러솔로 인식하기 때문에 구름제거가 매우 중요하다. 다음은 이번 연구의 구름제거 과정이다.

(1) 하루 중 산란일사 AOD 3개 이상, 산란일사 AOD₅₀₀의 표준편차가 0.2 이하일 때를 선택한다. 전자는 하루의 특성을 알기 위해서 자료 수가 최소한 3개는 되어야 한다고 판단하였기 때문이다. 후자는, 그 동안의 자료를 살펴볼 때, 표준편차가 0.2를 넘을 경우 구름의 영향이 지배적이어서 에어러솔의 특성을 알아보기 어려웠기 때문이다.

(2) 산란일사 AOD₅₀₀ 중 평균 $-3 \times$ (표준편차) 보다 작거나 평균 $+3 \times$ (표준편차) 보다 큰 값을 제외한다 (Kim et al., 2004). 정규분포를 가정할 때 평균으로부터

3 × (표준편차) 범위 밖은 가장 높거나 낮은 0.2%에 해당하며 실질적으로는 일출 때 높은 천정각이나 구름에 의한 비정상적인 값을 배제하기 위한 것이다.

(3) 30초 간격으로 측정되는 직달일사 AOD₅₀₀은, (직전의 직달일사 AOD₅₀₀이나 직달일사 후 30초-1분 후 측정되는 산란일사 AOD₅₀₀와 같이) 측정 간격이 짧을 때는 차이가 0.015 이하, (천정각에 따라 측정 간격이 약간씩 다르지만, 산란일사 후 약 2분 뒤 측정되는 직달일사 AOD₅₀₀과 같이) 상대적으로 측정 간격이 길 때는 차이가 0.03 이하인 값을 선별한다. 이와 같은 설정은, 에어러솔에 의한 AOD 변화가 연속적인데 비하여 구름의 영향을 받으면 AOD가 급하게 변하기 때문이다 (Kim et al., 2004; Smirnov et al., 2000). Smirnov et al. (2000)은 1분 간격의 AOD₅₀₀에 대하여 0.02를 기준으로 구름의 영향을 구분하였다. Kim et al. (2004)은 AOD₅₀₀의 측정 간격은 동일하나 에어러솔이 많은 동아시아에서는 AOD₅₀₀의 변화가 클 수 있다고 생각하여 0.03을 기준으로 하였다. 산란일사와 직달일사의 기준 값은 Kim et al. (2004)과 동일한데 측정 간격이 긴 것을 감안하면 엄격한 기준이다. 30초 간격의 직달일사 AOD₅₀₀에 대해서는 이의 절반인 값을 적용하였다.

(4) 최종적으로, 일별 전체 AOD 중 구름제거과정을 통과한 자료의 비율이 50% 이상, 자료 개수가 3개 이상인 날을 선택한다. 후자의 AOD 자료 수 제한은 (1)에서 설명한 것과 같다. 자료 회수율 역시 (1)의 표준편차 제한과 같이, 50% 이상의 자료가 배제되었을 때는 당일 전반적으로 구름의 영향이 커서 에어러솔의 특성을 살피기에 부적합하다고 판단하였기 때문이다.

(1), (2), (4)에서 일별로 구름의 영향을 판단한 것은, 일사로부터 얻는 광학적 특성이 주간 자료만 가능할 뿐 아니라 구름의 영향 등으로 시간 간격이 일정하지 않아 skyradiometer 혹은 sunphotometer를 이용하는 많은 연구가 일단위로 광학적 특성을 조사하기 때문이다 (http://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/data_description.html).

3. 결 과

3.1. 대기상부의 직달일사량 산출과 기기보정

지표에서 측정하는 직달일사 (F)의 대기에 의한 감쇠는 파장별로 다음과 같이 표시된다 (Nakajima et al., 1996).

$$F = F_0 \exp(-m_0\tau) \quad (2)$$

F_0 는 대기상부에서의 직달일사량이고, τ 는 기체와 에어러솔을 합한 광학적 두께이다. m_0 는 광학적 대기 질량으로 $1/\cos\theta$ 로 표시되며 θ 는 태양 천정각이다. 식 (2)에서 $\ln F$ 와 $m_0\tau$ 는 선형이므로 이들의 상관관계로

부터 F_0 를 구할 수 있다.

Skyrad.pack에서는 확산일사로부터 τ 를 얻어 식 (2)의 F_0 결정에 이용한다 (Nakajima et al., 1996; Boi et al., 1999). F_0 는 AOD 산출에 1차로 중요할 뿐 아니라 장기간의 F_0 변화로부터는 측정 필터의 성능을 점검할 수 있다. AERONET의 표준 기기는 청정한 하와이의 Mauna Loa에서 점검하며 정기적으로 GSFC의 기기와 교환하여 다른 기기의 보정에 이용된다 (Holben et al., 1998). F_0 의 10% 차이는 AOD를 산출할 때 0.1의 차이를 나타낼 수 있다 (Nakajima et al., 1996). AERONET에서 새로 보정된 기기의 F_0 상대 표준편차는 보통 1-2%이며 이에 의한 AOD의 불확실성은 0.01-0.02 정도이다 (Campanelli et al., 2004b).

스카이라디오미터는 일사량을 전류로써 측정하므로 지금 연구에서 식 (2)의 F 와 F_0 는 mA 단위의 상대값이다. 공동 관측기간 오전, 오후로 나누어 결정한 500 nm F_0 의 평균은 POM-01, POM-02 각각 2.71×10^{-4} , 3.05×10^{-4} 로써, POM-02가 11% 높았으며 상대 표준편차 (= 표준편차/평균) 역시 8.6%와 9.9%로 POM-02가 컸다. POM-01과 -02는 측정 방법이 다르므로 두 기기의 F_0 는 직접 비교하기 어려울 수 있으나, 상대 표준편차 9-10%는 AOD의 불확실성과 연계될 수 있다. 이와 같은 편차는 오염이 심한 서울에서 오전과 오후로 나누어 결정한 F_0 를 대상으로 표준편차를 조사하였기 때문으로 보여진다. 2001년 4월 하순부터 7월초까지 로마의 F_0 를 살펴본 Campanelli et al. (2004b)에서도 오전, 오후의 F_0 는 $2.0-2.5 \times 10^{-4}$ 를 중심으로 변하여 변화폭이 컸다, 그러나 3일 이동 평균을 조사하였을 때는 편차가 1.8-2.5%로 AERONET과 크게 다르지 않았다.

3.2. 구름 제거

Fig. 1은 공동관측일 중 하루인 2월 1일을 대상으로 구름을 제거하기 전과 제거한 후 전류값으로 측정되는 일사량과 500 nm 파장 AOD의 시간별 변화를 살펴본 것이다. 오전에는 청정하나 12시경부터 구름 혹은 에어러솔의 영향으로 AOD가 상승하였다. 14시경 POM-01은 몇 차례 일사량을 측정하지 못한 반면 POM-02는 모든 일사량을 측정하였다, 그러나 POM-02에서도 일사량의 변화가 커서 별도의 구름제거 과정을 거치지 않았음에도 skyrad.pack에서 AOD를 복원하지 못하였다. POM-01에서도 구름제거 후에는 13시부터 15시 30분경까지 AOD가 삭제되었다. 오히려 POM-02에서 구름제거 후 일사량의 변화가 큰 14시 전 후에 일부 AOD가 남아있다. 물론 에어러솔에 의하여 AOD가 상승한 것일 수 있으나 14시 부근 POM-02의 일사량 변화로 보아 구름의 영향일 가능성이 크다. 앞에서 설명한 것과 같이 짧은 시간 내 AOD 변화가 크면 구름으로 판단되나 이 때에는 구름의 영향이 거의 일정하여

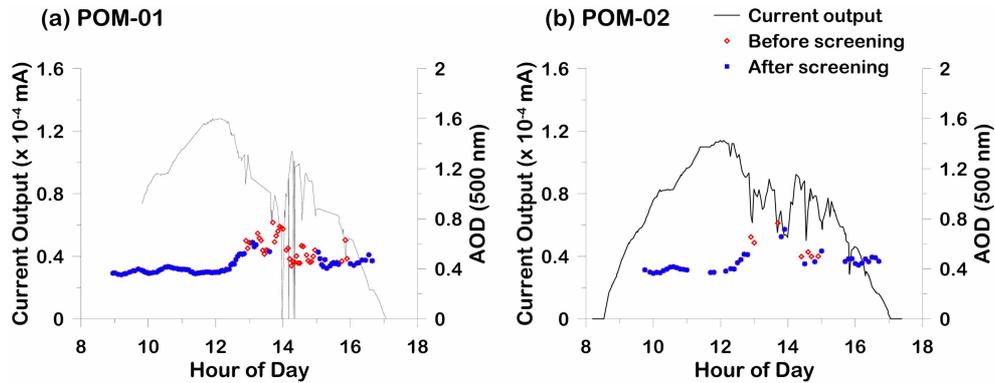


Fig. 1. Current output measuring the variation in solar radiation and the difference of AOD between before and after a cloud screening procedure on February 1.

에어러솔로 인식된 것으로 추정된다. 구름제거 과정에서 일사량의 변화까지를 고려하는 방안을 생각할 필요가 있다.

Table 1은 측정기간 구름제거 전, 후 AOD의 자료수와 회수율, 그리고 기기별 AOD의 차이이다. AOD가 복원된 13일 중 POM-01과 -02에서 각각 6일과 7일에 하루 3개 이상 AOD가 구름제거 과정을 통과하였다. 두 기기 모두 하루 3개 이상 AOD가 구름제거 과정을 통과한 6일의 AOD 회수율은 POM-01과 -02 각각 평균 83.5%와 91.3%였고 최저는 각각 60.8%와 81.8% 였다. 6일에 대하여 측정 시간을 조사한 결과 POM-01과 -02

각각 7.17 시간과 7.5 시간이었으며, 주간 평균 9시간을 가정하였을 때 각각 80%와 83%로 대표값으로 인정할 만하였다.

Fig. 2에서는 Table 1의 기기별 일평균 AOD를 비교하였다. 구름제거 전후 두 기기의 측정값을 비교하기 위하여 구름제거 후 POM-02에서만 일평균이 유효한 2월 18일은 제외하였다. 전체적인 변화 모습은 구름제거 전후 모두 두 기기가 매우 유사하다. 구름제거 전의 일평균이 변화가 큰데 비하여 구름제거 후에는 많은 값들이 삭제되었다. 구름제거 전후 일평균이 유효한 6일과 유효하지 않은 6일에 대하여 일평균의 평균과

Table 1. Comparison of data recovery and AOD between before and after a cloud screening procedure.

Date	Number of Data						AOD ^a (500 nm)			
	POM-01			POM-02			POM-01		POM-02	
	Before	After	Rate ^b (%)	Before	After	Rate (%)	Before	After	Before	After
1/31	56	55	98.2	24	23	95.8	0.23 ± 0.02	0.23 ± 0.02	0.22 ± 0.02	0.23 ± 0.02
2/1	130	91	70.0	45	38	84.4	0.45 ± 0.10	0.41 ± 0.06	0.45 ± 0.09	0.43 ± 0.08
2/3	21	-	-	19	-	-	1.04 ± 0.23	-	1.09 ± 0.02	-
2/4	79	48	60.8	44	36	81.8	0.84 ± 0.16	0.84 ± 0.13	0.81 ± 0.12	0.81 ± 0.12
2/6	17	-	-	8	-	-	1.17 ± 0.18	-	1.04 ± 0.18	-
2/8	124	89	71.8	69	60	87.0	0.70 ± 0.12	0.68 ± 0.12	0.69 ± 0.14	0.66 ± 0.13
2/9	34	-	-	16	-	-	0.87 ± 0.18	-	0.84 ± 0.12	-
2/11	25	-	-	13	-	-	1.26 ± 0.20	-	1.17 ± 0.13	-
2/12	24	-	-	11	-	-	0.71 ± 0.17	-	0.67 ± 0.17	-
2/15	5	-	-	7	-	-	0.30 ± 0.04	-	0.37 ± 0.21	-
2/16	57	57	100.0	82	81	98.8	0.15 ± 0.01	0.15 ± 0.01	0.14 ± 0.01	0.14 ± 0.01
2/17	47	47	100.0	58	58	100.0	0.13 ± 0.02	0.13 ± 0.02	0.13 ± 0.02	0.13 ± 0.02
2/18	115	-	-	54	30	55.6	1.31 ± 0.19	-	1.32 ± 0.16	1.26 ± 0.13

^aMean ± standard deviation

^bData recovery rate

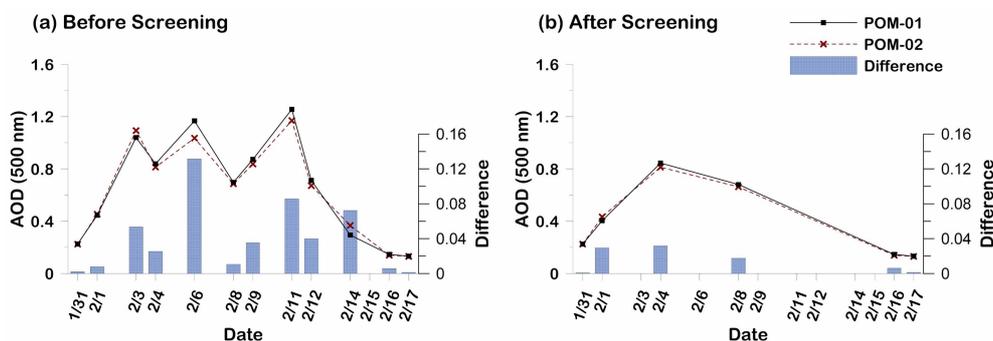


Fig. 2. Variations in daily average AOD by a cloud screening procedure. Difference is absolute one between the two instruments.

표준편차를 살펴보면 POM-01과 -02 각각 0.40 ± 0.06 , 0.41 ± 0.06 과 0.95 ± 0.17 , 0.93 ± 0.14 으로 구름제거 후 일평균의 평균과 표준편차가 모두 작다. 구름제거 과정에서 절대값이 크고 변화도 큰 일평균들이 삭제되면서 두 기기의 차이가 대체로 줄었기 때문이다. 그러나 개별 측정값에 따라 구름제거 과정의 결과가 다르게 나타날 수 있어 Fig. 1의 2월 1일과 같은 경우 구름제거 전보다 후에 두 기기의 차이가 크다.

이번 연구에서는 2.2절의 (1)-(4)와 같은 구름제거 과정을 이용하였으나 아직 충분치 않다. 그러나 많은 논문들이 다양한 방식들을 제안하고 있어 개선의 가능성은 많다. 예를 들어, Smimov et al. (2000)와 민희경 등 (2002)은 (3)과 같이 2개의 측정값을 비교하는 대신 3개의 측정값으로부터 시간 변화를 계산하였다. 이번 측정에서도 유사한 방식을 적용하고자 시도하였으나 sunphotometer와 skyradiometer의 측정 방식이 달라 적절한 경계값을 찾지 못하여 이용하지 못하였다. Kaufman et al. (2006)은 파장별 AOD를 이용하였고 Khatri and Takamura (2009)은 일사량의 변화를 조사하여 구름의 영향을 최소화하는 방법을 제안하기도 하였다. 다양한 방식을 시험하여 구름 제거 과정을 보완할 예정이다.

3.3. 기기별 광학적 특성

Table 2에서는 구름제거 후 두 기기 모두 일평균이 유효한 6일에 대하여 기기별 광학적 특성의 평균을 비교하였다. 광학적 특성의 평균은 유효한 모든 자료로부터 계산하였으며 따라서 측정간격이 짧은 POM-01의 자료 수가 POM-02보다 많았다. 제곱 상관계수 (R^2)에서와 같이 두 기기 모두 자료가 있을 때에 한하여 평균을 계산하는 방안도 검토하였다. 그러나 POM-01의 AOD를 보고하고자 할 때 POM-02와의 비교를 염두에 두어 POM-02에서도 값이 있을 때 자료만을 이용하지 않기 때문에 상관계수와 별도로 평균값을 계산할 때는 이용 가능한 모든 자료를 이용하였다. 또한 일평균을 비교한 Fig. 2과 달리 Table 2에서는 분 단위로 측정된 모든 값을 비교하였는데, 일평균만을 비교할 경우 자료 수가 적은 것이 가장 큰 이유이다.

먼저, 유효한 모든 자료를 이용할 때 AOD의 평균은 POM-01이 -02보다 0.06 크고, k 는 POM-01이 -02보다 2배가 되는 등 두 기기의 차이가 작지 않다. 그러나 평균의 차이에도 불구하고 표준편차는 유사하며 특히 AOD는 R^2 이 0.999로 매우 높다. 기기별 값의 차이가 시스템적인 측면이 있음을 나타내는 결과로 볼 수 있다.

Table 2. Comparison of aerosol optical properties from POM-01 and POM-02^{a,b,c}

	All Data			AOD (500 nm) > 0.4		
	POM-01	POM-02	R^2	POM-01	POM-02	R^2
AOD (500 nm)	0.44 ± 0.27	0.38 ± 0.28	0.999	0.69 ± 0.18	0.68 ± 0.17	0.998
AE (870/500 nm)	0.94 ± 0.25	0.91 ± 0.27	0.923	1.02 ± 0.12	1.05 ± 0.13	0.982
SSA (500 nm)	0.90 ± 0.04	0.94 ± 0.04	0.524	0.90 ± 0.03	0.93 ± 0.03	0.807
n (500 nm)	1.47 ± 0.05	1.47 ± 0.04	0.588	1.46 ± 0.04	1.46 ± 0.03	0.822
k (500 nm)	-0.010 ± 0.005	-0.005 ± 0.004	0.562	-0.012 ± 0.005	-0.007 ± 0.004	0.716

^aMean \pm standard deviation except R^2 , the square of the correlation coefficient.

^bMean and standard deviation were obtained with all available data from POM-01 and POM-02, respectively, while R^2 was determined only when data from both POM-01 and POM-02 were available.

^cFor six days on which daily averages of AOD from both POM-01 and POM-02 were available in Table 1.

반면 산란일사를 이용하는 SSA와 굴절률의 R^2 은 0.5 수준으로 높지 않다. 측정의 불확실성에 따른 무작위 오차 (random error)의 가능성을 짐작할 수 있다.

Dubovik et al. (2000)에서도 지적되었지만, AOD가 작으면 에어러솔의 영향이 작으므로 에어러솔에 의한 광학적 특성을 정확하게 결정하기 어려워지는 것은 당연하다. 이에 따라 Table 2에서는 Che et al. (2008)에서와 같이 AOD가 0.4 보다 클 때만을 대상으로 기기별 광학적 특성을 살펴보았다. 무엇보다 SSA와 굴절률의 R^2 이 0.7-0.8 수준으로 크게 높아졌고 AE의 R^2 도 AOD에 비례하게 높다. AOD의 차이도 0.06에서 0.01로 줄었다. 반면, AE, SSA와 k 등에서 평균의 차이는 여전히 k 가 음수임을 감안하면 3개 평균 모두 POM-02가 크다. 평균이 이와 같은 차이를 보이는 원인을 추정하기는 쉽지 않다. 그러나 AERONET의 CIMEL sunphotometer와 POM-02를 비교한 Che et al. (2008)에서도 SSA와 k 는 POM-02가 컸다. CIMEL sunphotometer나 POM-01에 비하여 POM-02에서는 단파장인 340 nm와 380 nm에서의 측정값을 추가로 이용하기 때문일 가능성을 생각할 수 있는데 추후 조사가 필요하다.

4. 요약 및 결론

컬럼 에어러솔의 광학적 특성에 대한 관심이 커지면서 다양한 기기가 이용되고 있다. AERONET과 SKYNET 등 서로 다른 기기를 사용하는 측정망별 비교가 보통인데 비하여 이번 연구에서는 20일간 공동관측 결과를 토대로 SKYNET의 두 기기를 비교하였다. POM-01과 -02는 SKYNET에서 함께 이용됨에도 불구하고 측정간격, 파장 등 차이가 클 뿐 아니라 AERONET과 달리 지점별로 기기와 자료를 관리하기 때문이다.

공동관측기간 평균과 표준편차를 이용한 F_0 의 상대 표준편차는 POM-01과 -02 모두 9-10% 수준으로 높았다. 로마에서의 측정 자료를 대상으로 하였던 Campanelli et al. (2004b)에서 F_0 결정에 이용되는 자료의 시간 단위가 길어질수록 편차가 줄었으며, 이번 연구의 결과도 오염이 심한 서울에서, 오전, 오후의 짧은 시간 단위로 F_0 를 결정하였기 때문으로 판단되었다.

POM-02이 POM-01에 비하여 일사량 측정이 효과적이었으나 구름 제거 후의 AOD 모습은 유사하였다. 일단위로 AOD 측정을 비교한 결과 일평균이 유효한 날의 측정자료 회수율은 POM-02가 -01보다 약간 높았고 시간 단위 유효 시간은 POM-01이 약간 많았으나 주간 평균 9시간에 대한 유효 측정 시간은 각각 80%와 74%로 모두 부족하지 않았다. 두 기기 모두 구름제거 전에는 AOD 일평균의 변화가 컸으나 구름제거 과정에서 변화가 큰 값들이 삭제되면서 구름제거 후에는 변화가 작아졌고 대체로 차이도 줄었다.

한국기상학회 대기 제21권 3호 (2011)

분단위로 측정된 모든 자료를 이용한 비교에서 두 기기의 광학적 특성들은, 평균의 차이에도 불구하고 표준편차는 유사하였다. 또한 AOD의 R^2 이 0.999로 두 기기의 상관성이 거의 완전한데 비하여 SSA와 굴절률의 R^2 은 0.5 수준으로 높지 않았다. AOD가 0.4보다 클 때만을 대상으로 한 비교에서는 SSA와 굴절률의 R^2 도 0.7-0.8 수준으로 높아졌으나 AE, SSA, 그리고 굴절률의 허수부인 k 등의 평균 차이는 여전히 컸다. POM-02가 -01에 비하여 단파장의 일사 측정값을 이용하기 때문에 추정되어 점검이 필요하였다.

감사의 글

이 연구는 기상청/국립기상연구소의 학술용역사업인 “광학관측망을 활용한 황사감시기법 개발”과 한국외국어대학교의 교내학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 곽종흠, 서명석, 김맹기, 곽서연, 이태희, 2005: 스카이라디오미터 (Sky-radiometer)로 관측된 공주지역 에어러솔의 광학적 특성, *한국지구과학회*, **26**, 790-799.
- 구자호, 김준, 김미진, 조희구, K. Aoki, M. Yamano, 2007: 스카이라디오미터 관측을 통한 서울 상공 에어러솔의 광학적 특성 분석, *한국기상학회*, **17**, 407-420.
- 민희경, 김지영, 최병철, 오성남, 2002: Sunphotometer 관측을 통한 서울 지역 대기 중 파장별 에어러솔 광학 깊이의 특성: Cloud Screening Algorithm(CSA) 적용. *한국기상학회지*, **38**(1), 25-38.
- Boi, P., G. Tonna, G. Dalu, T. Nakajima, B. Olivieri, A. Pompel, M. Campanelli, and R. Rao, 1999: Calibration and data elaboration procedure for sky irradiance measurements, *Appl. Opt.*, **38**, 896-907.
- Campanelli, M., G. Gobbi, C. Tomasi, and T. Nakajima, 2004a: Intercomparison between aerosol characteristics retrieved simultaneously with a Cimel and Prede sun-sky radiometers in Rome, Torvergata AERONET site, *Opt. Pur. y Apl.*, **37**, 3159-3164.
- Campanelli, M., T. Nakajima, and B. Olivieri, 2004b: Determination of the solar calibration constant for a sun-sky radiometer: proposal of an in-situ procedure, *Appl. Opt.*, **43**, 651-659.
- Che, H., G. Shi, A. Uchiyama, A. Yamazaki, H. Chen, P. Goloub, and X. Zhang, 2008: Intercomparison between aerosol optical properties by a PREDE skyradiometer and CIMEL sunphotometer over Beijing, China, *Atmos.*

- Chem. Phys.*, **8**, 3199-3214.
- Dubovik, O., A. Smirnov, B. N. Holben, M. D. King, Y. J. Kaufman, T. F. Eck, and I. Slutsker, 2000: Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky radiance measurements, *J. Geophys. Res.*, **105**, 9791-9806.
- Dubovik, O., B. N. Holben, T. F. Eck, A. Smirnov, Y. J. Kaufman, M. D. King, D. Tanre, and I. Slutsker, 2002: Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations, *J. Atmos. Sci.*, **59**, 590-608.
- 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. Lavenu, I. Jankowiak, and A. Smirnov, 1998: AERONET-a federated instrument network and data archive for aerosol characterization, *Remote Sens. Environ.*, **66**, 1-16.
- Kathri, P., T. Takamura (2009) An Algorithm to Screen Cloud-Affected Data for Sky Radiometer Data Analysis, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **87**, 189-204.
- Kaufman, Y. J., G. P. Gobbi, I. Koren (2006) Aerosol climatology using a tunable spectral variability cloud screening of AERONET data, *Geophysical Research Letters*, **33**, doi:10.1029/2005GL025478.
- Kim, D.-H., B.-J. Sohn, T. Nakajima, T. Takamura, T. Takemura, B.-C. Choi, and S.-C. Yoon, 2004: Aerosol optical properties over east Asia determined from ground-based sky radiation measurements, *J. Geophys. Res.*, **109**, D02209.
- Lee, S.-S., B.-J. Sohn, D.-S. Shin, H. Fukushima, and T. Nakajima, 2002: Optical characteristics of the Asian dust aerosol from sky radiation measurements in spring 1998. *Korean J. Atmos. Sci.*, **5**, 161-170.
- Nakajima, T., G. Tonna, R. Rao, R. Boi, Y. Kaufman, and B. Holben, 1996: Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions, *Appl. Opt.*, **35**, 2672-2686.
- Sano, I., S. Mukai, M. Yamano, T. Takamura, T. Nakajima, and B. Holben, 2003: Calibration and validation of retrieved aerosol properties based on AERONET and SKYNET, *Adv. Space Res.*, **32**, 2159-2164.
- 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.
- Takamura, T., T. Nakajima, and SKYNET Community Group, 2004: Overview of SKYNET and its activities, *Opt. Pure Appl.*, **37**, 3303-3308.
- Tonna, G., T. Nakajima, and R. Rao, 1995: Aerosol features retrieved from solar aureole data: a simulation study concerning a turbid atmosphere, *Appl. Opt.*, **34**, 4486-4499.
- WMO (World Meteorological Organization), 2005: WMO/GAW Experts Workshop on a Global Surface-based Network for Long Term Observations of Column Aerosol Optical Properties. Davos, Switzerland, 8-10 March 2004, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland (WMO TD No. 1287: available at <http://www.wmo.ch/web/arep/gaw/gawreports.html>).