

대기 에어로졸 검댕입자 측정을 위한 두 aethalometer의 상호비교

Inter-comparison of Two Aethalometers for Aerosol Black Carbon Measurements

정정훈 · 박승식* · 윤관훈¹⁾ · 조성용 · 김승재

전남대학교 환경공학과, ¹⁾(주)에이피엠엔지니어링

(2010년 7월 13일 접수, 2010년 9월 25일 수정, 2010년 11월 25일 채택)

Jung Hoon Jung, Seung Shik Park*, Kwan Hoon Yoon¹⁾,
Sung Yong Cho and Seung Jai Kim

Department of Environmental Engineering, Chonnam National University

¹⁾*APM Engineering Co., Ltd.*

(Received 13 July 2010, revised 25 September 2010, accepted 25 November 2010)

Abstract

Recently, a real-time, pocket-sized aethalometer (microAeth[®] model AE51) has been developed by Magee Scientific Inc. for measuring the concentration of black carbon in the atmosphere. In this study, two aethalometers, models AE-16 and AE-51, which measure the optical absorption of carbon particles at infrared 880 nm, were operated at time interval of 5-min between January 9 and February 10, 2010 at an urban site of Gwangju, to compare the accuracy of black carbon (BC) concentrations reported from the AE-51 model and to investigate reasonable sampling time of filter media in the AE-51. The air samples in the AE-51 and AE-16 models are collected on T60 (Teflon coated glass fiber) filter media (filter spot area: 0.07 cm²) and quartz fiber roll-tape filter (filter spot area: 1.67 cm²), respectively. Real-time measurement results indicate that when the filters were clean, the AE-51 BC was greater than or similar to the AE-16 BC data. However as the filter spots become darker, the AE-16 BC concentrations were higher than the AE-51 BC data and the difference in the BC concentrations from two AE models becomes gradually increased. Relative error in the AE-51 and AE-16 BC concentrations showed significance difference depending on used time of the filter in the AE-51 model, weather pattern, levels of air pollution, etc, ranging from 11.5% (used time of the filter in AE-51: 1,595 min) to 52.5% (used time of the filter in AE-51: 2,085 min). When considering the used time of one filter ticket in the AE-51 model and difference (or relative error %) between AE-16 and AE-51 BC concentrations, it is recommended that the standard sampling time per one filter ticket within the AE-51 model be less than approximately 24 hr (1,440 min) under the normal weather conditions except for severe haze and mist events.

Key words : Aethalometer, Pocket-sized aethalometer, Black carbon, Particle shadowing effect

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)62-530-1863, E-mail : park8162@chonnam.ac.kr

1. 서 론

대기 중의 검댕(Black carbon, BC)은 화석연료 연소나 바이오매스 연소의 불완전연소 과정에서 직접적으로 발생하며, 일반적으로 $3\mu\text{m}$ 이하의 작은 입자 크기를 가지는 입자상 물질이다. BC 에어로졸 입자는 인간의 건강 및 시정에 악영향을 미치며, 직접적으로 빛을 흡수함으로써 알베도 및 구름조절에 영향을 준다(Gebhart *et al.*, 2001; Myhre *et al.*, 2001; Adams *et al.*, 1990; Crutzen and Andreae, 1990). 최근 검댕 입자에 대한 기후강제력 평가, 연소 오염원의 정량적 기여도 평가, 인체 유해성 등의 연구가 활발히 진행되고 있다(Maynard *et al.*, 2007; Menon *et al.*, 2002; Hansen *et al.*, 2000).

현재까지 대기 중 실시간 BC 에어로졸의 질량농도를 측정하기 위해 가장 많이 사용된 방법은 Hansen *et al.* (1984)에 의해 개발된 aethalometer이다. Aethalometer는 필터에 채취된 입자부하에 의한 빛의 감쇄가 BC 농도에 선형적으로 비례한다는 전제 하에 빛의 감쇄 변화를 BC 입자의 질량농도로 변환시킨다. 최근 aethalometer 제작사인 미국의 Magee Scientific Inc.는 세계 최초로 장소에 구애받지 않고 BC 농도를 거의 실시간으로 측정할 수 있는 소형의 휴대용 BC 측정기(AE-51 모델)를 개발하였다. AE-51 모델은 순환대기 BC 측정에 주로 사용되어 온 근 적외선 단일파장(880 nm)의 AE-16 모델과 동일하게 광학적 흡수방법을 이용하여 BC 농도를 측정한다. 소형의 AE-51 모델은 250 g의 가벼운 무게와 빠른 측정 속도(최소 1초 간격 측정 가능), 유동적인 시료채취 기능 등의 장점을 가지고 있다. 또한 AE-51 모델은 도로변 BC 입자의 노출시험 및 플럭스 연구에 활용이 가능하다. 그리고 BC 입자 측정을 위해 T60 테플론 코팅된 붕소규산염 유리섬유재질의 여과지(filter ticket)를 사용하며, 여과지의 장착 및 교체는 사용자에게 의하여 수동으로 이루어진다. AE-51 모델의 측정 시간은 대기 중 입자상 오염물질의 오염도에 따라 매우 유동적이므로 사용자의 조작 능력 여하에 의해 측정 데이터의 신뢰성에 영향을 줄 수 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 AE-51 모델은 다양한 장점을 가지고 있지만 BC 측정을 위하여 사용하는 유리섬유 여과지의 가격이 상당히 비싸다는 단점이 있다.

본 연구에서는 휴대용 AE-51 모델의 BC 측정 자료의 정확도를 평가하기 위하여 약 한 달 동안 880 nm의 단일파장을 이용하는 AE-16 모델과 비교실험을 수행하였다. 그리고 AE-51과 AE-16 모델로부터 얻어진 두 종류 BC 농도의 측정오차를 최소화하기 위하여 AE-51 모델에서 사용하는 여과지의 적절한 사용시간을 제안하였다.

2. 연구방법

2.1 실시간 BC 에어로졸 입자 측정

대기 중 BC 입자의 측정은 광주광역시 전남대학교 내 한 3층 건물 옥상에서 단일파장의 AE-51 모델과 AE-16 모델(Magee Scientific Inc.)을 사용하여 2010년 1월 9일~2월 10일 사이에 5분 간격으로 이루어졌다. 측정지점에 대한 지리적인 설명은 Jung and Park (2010)의 논문에 잘 설명되어 있다. AE-16 모델은 BC 농도를 실시간으로 측정하기 위하여 roll-tape 형태의 석영필터를 사용한다. 반면에 AE-51 모델에서는 고가의 단일 유리섬유 필터여과지(filter ticket)를 사용하며 단일 필터여과지의 적절한 사용시간을 조사하기 위하여 여과지의 교체시간을 변화시켜가면서 5분 단위의 BC 농도를 측정하였다. 측정기간 중 AE-51에서 교체한 필터 수는 총 20개였다. AE-51 모델은 기존 AE-16 모델과 동일하게 입자에 의한 빛의 소멸을 측정하기 위하여 880 nm의 근 적외선 단일파장을 이용하며 실내 및 작업환경의 검댕입자 농도를 실시간 측정이 가능하도록 개발된 장비이다. 그러나 본 연구에서 두 AE BC 측정 장비의 차이점은 AE-16 모델은 $\text{PM}_{2.5}$ 입자 BC 농도를 측정할 수 있도록 $\text{PM}_{2.5}$ 임팩터가 도입부에 설치되어있는 반면에 AE-51 모델은 TSP(Total Suspended Particulate) BC 농도를 측정한다. 표 1에 두 측정 장비의 구체적 사양과 특성을 정리하였다.

Aethalometer의 측정원리는 석영 필터 테이프에 축적된 BC 입자의 양은 필터 spot을 통과한 빛의 감쇄변화에 비례한다는 가정 하에 BC 질량 농도를 결정한다. 석영 필터 테이프에 축적된 BC 입자에 의한 빛의 광학적 감쇄(Attenuation, ATN)는 다음 관계로부터 계산된다.

Table 1. Specifications of measurement instruments used in this study.

| Specification | AE-16 model | AE-51 model |
|-------------------|----------------------------|--|
| Optical source | 880 nm wavelength (IR) LED | 880 nm wavelength (IR) LED |
| Particle cut size | PM _{2.5} | TSP |
| Precision | ±0.20 µg BC/m ³ | ±0.10 µg BC/m ³ |
| Time base | 5 min | 5 min |
| Flow rate | 5 L/min | 0.1 L/min |
| Cycle | Real time | Real time |
| Filter type | Quartz fiber roll tape | T60 Teflon-coated borosilicate glass fiber |

$$ATN = -100 \times \ln(I/I_0) \quad (1)$$

여기서 I 및 I₀는 BC 입자 채취 전·후 석영 필터 매질을 통과한 빛의 세기를 나타낸다. Aethalometer는 에어로졸 입자가 축적된 석영 필터에 완벽하게 확산된다고 가정하고 있으며, 빛의 감쇄계수로부터 BC 에어로졸의 질량농도는 다음과 같이 계산된다(Hansen *et al.*, 1984).

$$BC = \frac{b_{ATN}}{\sigma_{ATN}} = \frac{A}{Q} \frac{\Delta ATN}{\Delta t} \cdot \frac{1}{\sigma_{ATN}} \quad (2)$$

여기서 b_{ATN}: aethalometer에서 측정된 빛의 감쇄계수 (m⁻¹), A: 필터 spot 면적 (m²), Q: 공기채취유량 (L/min), ΔATN: 입자채취시간, Δt (min) 동안 빛의 감쇄변화 및 σ_{ATN}: 필터에서 BC의 감쇄효율 (16.6 m²/g @880 nm)을 의미한다.

2.2 Aethalometer AE-16 모델의 광학적

산란효과 보상

Aethalometer는 필터에 채취된 BC 입자의 질량과 빛의 감쇄가 선형적으로 비례한다는 가정 하에 BC 입자의 질량농도를 측정한다. 하지만 석영필터에 입자가 쌓임에 따라 입자의 포화영향(saturation effect)으로 인해 빛의 감쇄와 BC 농도사이에 비선형 관계가 성립된다(Jung and Park, 2010; Park *et al.*, 2009; Virkkula *et al.*, 2007; Weingartner *et al.*, 2003). 입자의 광학적 투영효과(shadowing effect)가 발생하면 측정된 BC 값이 실제 BC 값보다 낮게 평가되므로 측정 자료를 사용하기 전에 반드시 원시 자료의 보정이 요구된다. 따라서 본 실험에서 측정된 원시 BC 자료의 광학적 산란효과를 보상하기 위해 비선형 단순모형을 이용하였다. 보정된 빛의 감쇄계수는 식(3)과 같은 비선형관계를 따른다고 가정하며 보정된 BC

에어로졸 농도는 식(4)에 의하여 계산된다.

$$b_{ATN}(\text{corrected}) = (1+k \cdot ATN) \cdot b_{ATN} \quad (3)$$

$$BC_{\text{corrected}} = \frac{b_{ATN}(\text{corrected})}{\sigma_{ATN}} = (1+k \cdot ATN) BC_{\text{raw}} \quad (4)$$

여기서 “k”는 실험적으로 얻어지는 상수이며, k값이 0에 접근할수록 광학적 부하영향 (particle shadowing effect)이 없음을 의미하고 값이 클수록 대기 중으로 배출된 지 얼마 되지 않은 즉, 대기 체류시간이 짧은 BC 에어로졸 입자(fresh aerosol)를 의미한다(Virkkula *et al.*, 2007; Weingartner *et al.*, 2003). 광학적 산란효과의 보상에 대한 구체적인 내용은 Park *et al.* (2009)의 논문에 잘 정리되어 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 BC 농도의 시간별 특성

그림 1은 측정기간 중 aethalometer AE-51과 AE-16 모델에 의해 5분 간격으로 측정된 BC 농도의 시간별 추이를 보여준다. 측정 기간 동안에 AE-51과 AE-16로 측정된 5분 평균 BC 농도는 박무+연무가 발생한 1월 18일 19:00~22:00 사이에 가장 높게 관측되었으며 이때 BC 농도는 각각 19.24, 31.03 µg/m³이었다. 대기가 매우 깨끗했던 2월 6일 4:00시에 두 측정 장비의 BC 농도는 모두 약 0.40 µg/m³로 매우 낮은 농도를 보였다. 측정결과의 분석에 의하면 BC 농도가 높을수록, 또는 일반적으로 AE-51 모델의 필터여과지 사용시간이 길수록 두 장비 사이의 BC 농도 측정오차는 크게 나타났으며 항상 AE-16 BC 농도가 높게 측정되었다. AE-16과 AE-51 모델의 BC 농도차이에 대한 자세한 설명은 3.2절에 기술하였다.

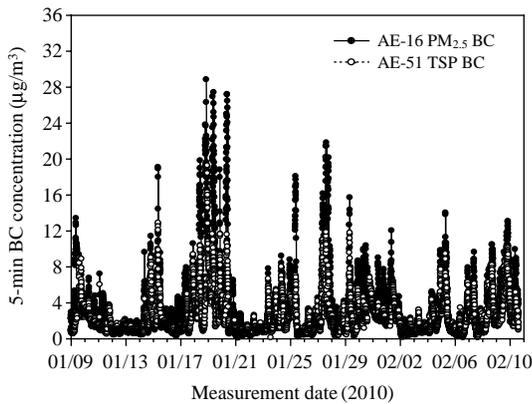


Fig. 1. Temporal profiles of BC concentrations measured with AE-51 and AE-16 models.

일평균 BC 농도는 박무와 연무가 심하게 발생한 1월 19일에 가장 높게 관측되었으며, AE-51과 AE-16 모델의 BC 농도는 각각 5.40, 8.45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 어떤 특별한 기상 현상이 발생하지 않았던 2월 2일(맑은 날)에 AE-51과 AE-16의 일평균 BC 농도는 각각 0.72, 0.89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 측정 기간 중 가장 낮은 농도를 보였다.

그림 2는 전체 측정기간 중 AE-51과 AE-16 모델의 BC 입자의 시간별 평균 농도경향을 보여준다. 그림에서 AE-51과 AE-16으로 측정한 BC 농도의 시간별 특징을 보면, 아침시간에 최고농도를 보인 후 오후에 감소하다가 저녁시간에 다시 약간 증가하는 경향을 보이는 거동을 보이고 있다. BC 농도는 일출 전부터 증가하기 시작해서 최고 농도를 보인 후 오전 9:00시 이후로 감소하는 경향을 보였다. 아침에 최고의 BC 입자 농도를 보이는 현상은 아침 출근시간과 매우 일치하였으며, 이것은 측정지점에서 약 150m 떨어진 2차선 도로변의 아침 교통량과 북쪽방향으로 약 800m 떨어진 곳에 위치한 호남고속도로와 밀접하게 관련이 있었을 것으로 추정된다. 그리고 아침 출근시간 이후 시간 진행에 따라 감소하여 오후 14:00시에 BC 농도는 최소값을 보이는데 이것은 낮 시간 동안 차량 통행의 감소와 대기 혼합고의 상승으로 인한 오염물질의 활발한 확산에 의하여 BC 물질의 농도가 희석된 것으로 사료된다. 또한 아침 출근시간에 비해 저녁 퇴근시간에는 BC 농도의 완만한 증가현상이 확인되었다.

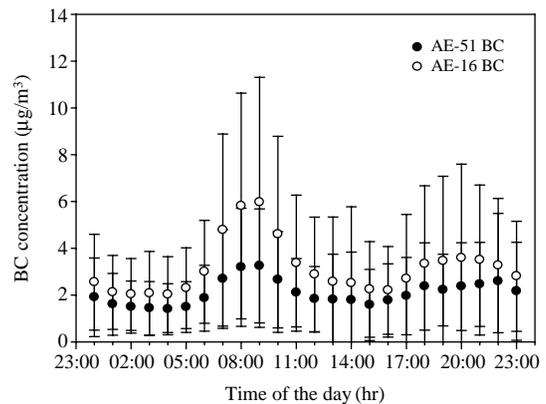


Fig. 2. Diurnal variations in BC concentrations from AE-51 and AE-16 models.

3. 2 Aethalometer AE-16과 AE-51 모델 측정 BC 농도비교

연구에서는 측정 기간 중 PM_{10} 오염정도와 일기유형에 따라 AE-51의 필터사용시간을 변경해가면서 AE-51과 AE-16 측정 BC 농도차이를 조사하였다. AE-51의 필터사용시간 평가를 위한 입자측정 시간은 최소 880분(PM_{10} 오염도가 심한 경우)에서 최대 4,125분(청정한 대기조건)까지 이루어져 있으며 측정기간 중 총 20회의 필터 교체가 이루어졌다. 표 2는 AE-51 모델의 필터사용시간을 기준으로 정리한 AE-51과 AE-16 측정 BC 입자의 평균농도, 두 BC 농도사이의 회귀분석 결과, BC 농도 상대오차율 등을 나타낸 표이다. 그림 3은 AE-51의 필터 측정시간 증가에 따른 AE-51과 AE-16 모델의 평균 BC 농도의 변화와 두 BC 농도의 상대오차율을 나타낸 그림이다. 실험에 사용된 AE-51 모델은 TSP 내의 BC 농도를 측정하는 반면, AE-16 모델은 $\text{PM}_{2.5}$ 의 BC 농도를 측정하기 때문에 이론적으로는 AE-51 측정 BC 농도가 AE-16 BC 농도보다 항상 크게 관측이 되어야 한다. 그러나 표 2와 그림 3을 보면 AE-16 측정 BC 농도가 AE-51 BC 농도보다 항상 높게 측정이 되었다. 그림 1의 5분 평균 BC 농도를 살펴보면 AE-51 모델의 새로운 필터 교체 후에 2~3시간 동안 측정된 BC 농도는 AE-16 모델의 BC 농도보다 약간 높거나 거의 비슷한 값을 보여주었다.

그러나 AE-51 모델의 필터 상에 입자의 축적(필터사용시간의 증가를 의미)이 진행됨에 따라 AE-16

Table 2. Comparison of BC concentrations observed from aethalometer AE-51 and AE-16 models.

| Date | Measurement time (min) | AE-16 mean ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | AE-51 mean ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Regression fit ($\text{BC}_{\text{AE-51}} = a \cdot \text{BC}_{\text{AE-16}} + b$) | Error* ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Relative error** (%) | Weather conditions |
|-------------|------------------------|---|---|--|-------------------------------------|----------------------|--------------------------------|
| 01/09~01/11 | 3035 | 3.85 ± 1.32 | 2.31 ± 1.54 | $y = 1.05x - 1.73, R^2 = 0.80$ | 1.54 | 40.1 | clear, cloudy, and haze |
| 01/11~01/14 | 4125 | 1.68 ± 1.34 | 1.09 ± 0.69 | $y = 0.42x + 0.38, R^2 = 0.67$ | 0.58 | 34.8 | clear and snow |
| 01/14~01/17 | 4090 | 3.59 ± 2.55 | 1.81 ± 1.66 | $y = 0.57x - 0.23, R^2 = 0.76$ | 1.78 | 49.6 | clear and cloudy |
| 01/17~01/18 | 2085 | 7.40 ± 6.80 | 3.49 ± 2.15 | $y = 0.24x + 1.65, R^2 = 0.60$ | 3.91 | 52.8 | haze |
| 01/18~01/19 | 880 | 13.51 ± 6.77 | 7.01 ± 3.26 | $y = 0.25x + 3.44, R^2 = 0.31$ | 6.50 | 48.1 | mist and haze |
| 01/19~01/21 | 2570 | 5.00 ± 5.45 | 2.55 ± 2.38 | $y = 0.38x + 0.57, R^2 = 0.78$ | 2.45 | 48.9 | cloudy, rain, and clear |
| 01/21~01/23 | 3230 | 1.27 ± 1.00 | 1.09 ± 0.78 | $y = 0.74x + 0.14, R^2 = 0.92$ | 0.18 | 14.4 | cloudy, snow, and clear |
| 01/23~01/25 | 2060 | 4.42 ± 3.30 | 2.69 ± 1.42 | $y = 0.35x + 1.11, R^2 = 0.70$ | 1.73 | 39.2 | cloudy, clear, and yellow sand |
| 01/25~01/26 | 1415 | 1.06 ± 0.67 | 0.91 ± 0.56 | $y = 0.77x + 0.10, R^2 = 0.88$ | 0.14 | 13.4 | cloudy and clear |
| 01/26~01/28 | 2985 | 4.90 ± 4.95 | 2.71 ± 2.53 | $y = 0.45x + 0.42, R^2 = 0.83$ | 2.19 | 44.6 | clear, cloudy, and rain |
| 01/28~01/30 | 2800 | 3.96 ± 2.77 | 2.32 ± 1.50 | $y = 0.45x + 0.51, R^2 = 0.69$ | 1.64 | 41.5 | cloudy and clear |
| 01/30~02/01 | 2485 | 5.09 ± 1.30 | 2.83 ± 1.17 | $y = 0.36x + 1.00, R^2 = 0.16$ | 2.25 | 44.3 | mist and haze |
| 02/01~02/02 | 1445 | 2.41 ± 1.63 | 1.92 ± 1.57 | $y = 0.94x - 0.37, R^2 = 0.96$ | 0.49 | 20.3 | cloudy and clear |
| 02/02~02/03 | 1505 | 1.09 ± 0.59 | 0.96 ± 0.49 | $y = 0.80x + 0.09, R^2 = 0.89$ | 0.14 | 12.5 | clear |
| 02/03~02/04 | 1390 | 1.77 ± 1.28 | 1.42 ± 0.89 | $y = 0.68x + 0.22, R^2 = 0.94$ | 0.35 | 19.9 | clear and cloudy |
| 02/04~02/05 | 1425 | 4.80 ± 3.06 | 3.50 ± 1.80 | $y = 0.57x + 0.78, R^2 = 0.91$ | 1.29 | 27.0 | clear and cloudy |
| 02/05~02/06 | 1595 | 1.01 ± 0.46 | 0.89 ± 0.40 | $y = 0.75x + 0.14, R^2 = 0.73$ | 0.12 | 11.5 | clear |
| 02/06~02/07 | 1410 | 3.39 ± 2.01 | 2.45 ± 1.42 | $y = 0.65x + 0.22, R^2 = 0.86$ | 0.94 | 27.7 | clear and cloudy |
| 02/07~02/09 | 2525 | 3.87 ± 2.50 | 2.62 ± 1.54 | $y = 0.59x + 0.34, R^2 = 0.92$ | 1.25 | 32.3 | rain and mist |
| 02/09~02/10 | 1670 | 6.21 ± 2.83 | 4.15 ± 2.22 | $y = 0.72x - 0.33, R^2 = 0.83$ | 2.06 | 33.1 | rain and mist |

*Error ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) = $|\text{BC}_{\text{AE-51}} - \text{BC}_{\text{AE-16}}|$

**Relative error (%) = $(|\text{BC}_{\text{AE-51}} - \text{BC}_{\text{AE-16}}| / \text{BC}_{\text{AE-16}}) \times 100\%$

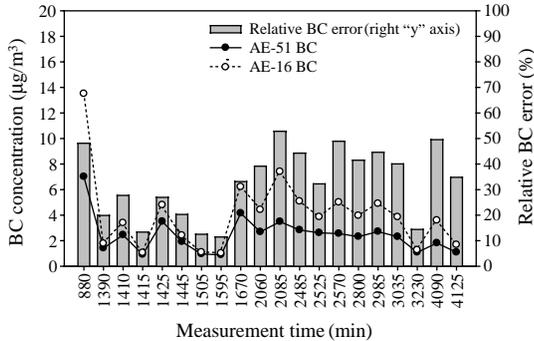


Fig. 3. Average BC concentrations of AE-51 and AE-16 models and its relative BC error with variation of measurement time.

의 BC 농도가 AE-51의 BC 농도보다 높게 측정되어 두 BC 농도의 차이는 점진적으로 증가하는 현상을 나타내었다. 이와 같은 두 BC 농도의 오차는 AE-51과 AE-16 모델의 각 필터 상에 채취된 입자의 측정량 차이에 의한 광학적 투영효과(optical shadowing effect)의 차이, 에어로졸 입자 채취에 사용된 필터물질의 차이 및 필터 spot 면적의 차이에 의해

기인된 것으로 판단된다. AE-16 모델은 석영필터 (spot 면적: 1.67 cm^2)에 쌓인 입자에 의한 빛의 누적 감쇄치가 약 125에 이르면 석영필터를 테이프(roll-tape)가 자동으로 약 2.5 cm씩 앞으로 이동하여 새로운 필터 spot에 입자의 채취가 이루어진다(Park *et al.*, 2009). AE-16 모델의 BC 농도는 필터 상의 입자 축적에 의한 광학적 산란효과를 식(4)에 의하여 보정한 값들이다. 반면에 AE-51 모델은 단일의 필터여과지 (spot 면적: 0.07 cm^2)를 사용하므로 측정시간 증가에 따른 여과지에 쌓인 입자의 광학적 부하효과에 의한 BC 농도의 저평가를 보정하기 어렵다. 그리고 AE-51 장비의 경우 매우 적은 필터 spot 면적으로 필터 상의 입자의 포화상태가 빠르게 도달되어 실제 BC 값보다 상당히 저평가되었을 것으로 추정한다. 따라서 AE-51 모델 측정 BC 농도의 정확도를 향상시키기 위해서는 AE-51 모델에서 사용하는 유리섬유 여과지 하나로 측정 가능한 최적의 BC 입자의 누적농도, 즉 여과지의 한계사용시간에 대한 정보가 필요하다. 그림 3에서 보는 바와 같이 AE-51의 필터사용시간이 1,595분(약 26시간)보다 증가할수록 AE-51과 AE-16 모델의 BC 농도의 편차가 증가함을 알

수 있다. 심각한 박무와 연무현상이 발생한 1월 18일 ~19일(필터측정시간 880분)을 제외하면 AE-51 모델의 필터사용시간이 약 1,600분 이하인 경우에 AE-51과 AE-16 모델 측정 평균 BC 농도의 상대오차율이 <20%로 AE-51 모델의 BC 질량농도가 비교적 신뢰할 만하였다.

표 2에 의하면 AE-51과 AE-16 모델의 평균 BC 농도의 상대오차율은 최소 11.5% (AE-51 필터사용시간 1,595분)에서 최대 52.8% (AE-51 필터사용시간 2,085분)이었다. 최소 상대오차율(11.5%)을 보인 날(2월 5일~6일)의 날씨는 매우 맑았으며 AE-51과 AE-16 모델의 평균 BC 농도는 각각 0.89 ± 0.40 , $1.10 \pm 0.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 두 BC 농도 값이 최대 상대오차율(52.8%)을 보인 날의(1월 17일~18일) 일기유형은 맑고 연무가 발생하였으며 AE-51과 AE-16 모델의 평균 BC 농도는 각각 3.49 ± 2.15 , $7.40 \pm 6.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 연무와 박무의 동반 일기유형으로 인하여

대기가 매우 안정한 1월 18일~19일 사이에 880분 동안 측정(가장 짧은 측정시간)한 AE-51과 AE-16 모델의 평균 BC 농도는 각각 7.01 ± 3.26 , $13.51 \pm 6.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 절대농도 차이가 가장 컸고 상대오차율은 48.1%에 이르렀다. 반면에 연구기간 중 AE-51 모델의 필터사용시간(측정시간)이 가장 길었던 1월 11일~14일(4,125분) 사이의 AE-51과 AE-16 모델의 평균 BC 농도는 각각 1.09 ± 0.69 , $1.68 \pm 1.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 두 BC 농도의 상대오차율은 34.8%이었다. 연구기간 중 AE-51의 필터사용시간을 4,125분으로 가장 길게 사용했음에도 불구하고 두 AE 모델의 BC 농도 차이가 겨우 $0.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었던 것은 깨끗한 대기상태가 오래 유지되었기 때문이다. AE-51 모델에서 하나의 여과지의 사용시간이 가장 짧은 경우(880분)와 가장 긴 경우(4,125분)의 BC 농도의 정확도를 분석한 결과에 의하면 AE-51 모델에서 신뢰성 있는 BC 농도를 얻기 위해 필요한 여과지의 한계사용시간은

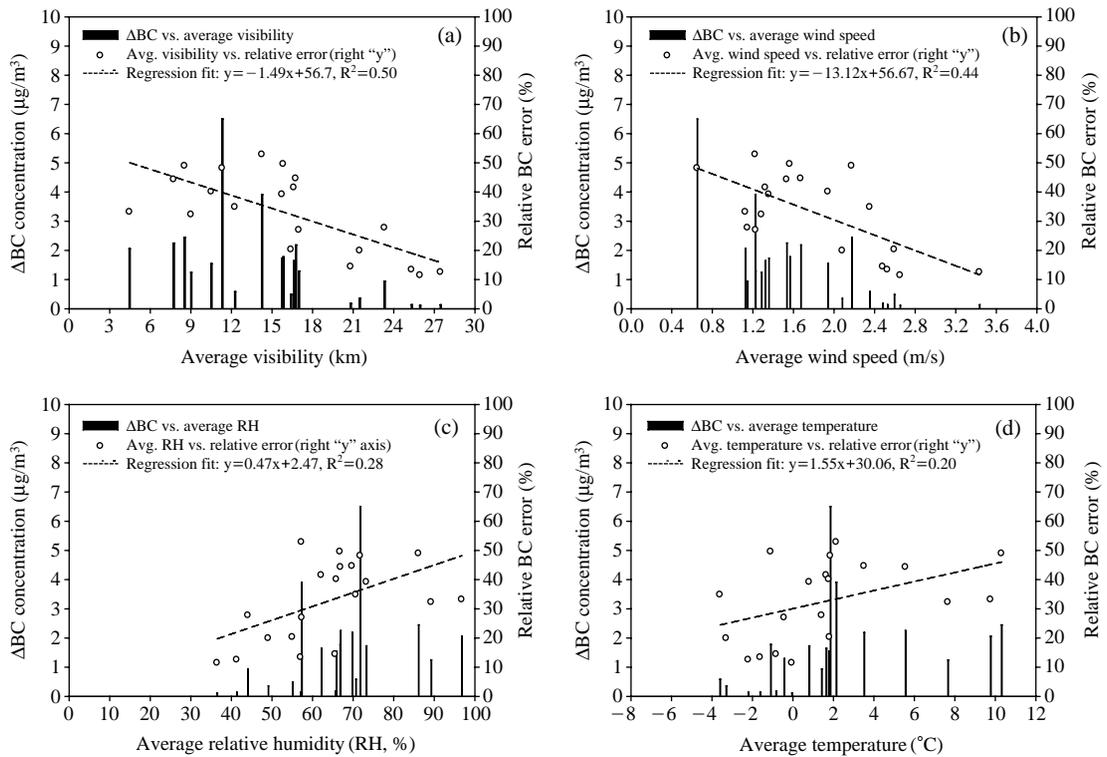


Fig. 4. Variations of $\Delta BC (=BC_{AE-51} - BC_{AE-16})$ concentrations and relative BC error with meteorological factors; (a) average visibility, (b) average wind speed, (c) average RH, and (d) average temperature.

대기 중 입자상 오염물질의 농도수준에 의하여 크게 영향을 받음을 짐작할 수 있다.

AE-51 모델의 필터 측정시간이 1,390분, 1,410분, 1,415분, 1,445분, 1,505분, 1,595분일 때 AE-51과 AE-16 모델의 BC 농도의 차이(상대오차율)는 각각 0.35 (19.9%), 0.94 (27.7%), 0.14 (13.4%), 0.49 (20.3%), 0.14 (12.5%), 0.12 (11.5%) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 이와 같은 결과는 박무와 연무현상이 동시에 발생하여 대기가 매우 혼탁한 경우(1월 18일~19일의 측정시간 880 분)를 제외하고는 AE-51 모델의 여과지 사용시간을 약 24시간(1,440분) 이하로 유지하는 것이 신뢰성 있는 BC 농도를 얻을 수 있음이 확인되었다. 그리고 대기가 매우 청정한 경우(<BC 농도 $2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에는 AE-51의 필터를 3,230분, 4,125분 동안 상당히 장시간 사용할지라도 두 AE 장비의 BC 농도 차이가 각각 0.18 (14.4%), $0.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (34.8%)로 매우 낮게 조사되었다. 이것은 대기가 매우 깨끗한 조건(비와 눈과 같은 강수현상 발생 포함)에서는 AE-51 모델에서 필터여과지를 최대 3일까지 사용해도 BC 측정 신뢰도에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

그림 4는 평균시정, 평균풍속, 평균상대습도 및 평균온도의 변화에 따른 AE-51과 AE-16 모델의 BC 농도 측정오차($\Delta\text{BC} = |\text{BC}_{\text{AE-51}} - \text{BC}_{\text{AE-16}}|$)와 BC 농도의 상대오차율(%)을 분석한 그림이다. 그림 4에 의하면 평균시정과 평균풍속 값이 증가할수록 AE-51과 AE-16 측정 BC 농도 사이의 상대오차율이 감소하는 경향을 보였다(시정 vs. BC 농도 상대오차율 사이의 $R^2=0.50$, 풍속 vs. BC 농도 상대오차율 사이의 $R^2=0.44$). 그림 4(a)를 살펴보면, 평균 시정이 20 km 이상인 경우에 두 BC 농도의 측정오차는 $<1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며, 상대 오차율은 거의 20% 이하로 낮게 나타났다. 평균풍속의 경우, 1 m/s 이하의 풍속에서는 두 BC 농도의 측정 오차가 $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상으로 매우 높은 것으로 확인되었다. 2 m/s 이상의 풍속구간에서는 두 BC 농도의 측정 오차 및 상대 오차율이 모두 낮게 평가되었다(그림 4(b)). 그러나 평균상대습도와 평균온도변화에 따른 AE-51과 AE-16 측정 BC 농도 값 사이의 차와 상대오차율의 차이는 크게 나타나지 않았다. 이러한 결과들을 정리해 보면, AE-51과 AE-16 모델의 평균 BC 농도 측정오차와 상대 오차율은 기상변수 변화에 따라 비교적 낮은 풍속과 짧은 가시거리가 유지될 때 두 BC 농도의 차이와 상

대오차율이 증가하는 경향을 보이고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 최근 Magee Scientific Inc. (USA)에서 개발한 휴대용 aethalometer AE-51 모델의 검댕(BC) 입자 농도 정확도를 평가하고 AE-51 BC 입자의 측정오차를 최소화하기 위한 고가의 필터여과지의 적정사용시간을 제안하였다. 연구목표를 달성하기 위하여 광주광역시 도심지역 한 3층 건물 옥상에서 2010년 1~2월에 약 30일 동안 두 종류의 단일채널(@880 nm 광원) 실시간 BC 측정기기(AE-51 vs. AE-16 모델)를 사용하여 BC 농도를 측정하였다. AE-51과 AE-16 모델은 각각 TSP와 $\text{PM}_{2.5}$ 입자 내 BC 농도를 측정한다. 이론적으로는 AE-51 모델 측정 BC 농도가 AE-16 모델 BC 농도보다 항상 커야 하지만 측정결과는 반대현상이 나타났다. AE-51에서 필터여과지를 새로 교체한 후 측정된 BC 농도는 AE-16 모델의 BC 농도보다 크거나 거의 비슷한 수준을 보여 주었으나, AE-51의 필터사용시간이 길어짐에 따라 AE-16 BC 농도가 AE-51 BC 농도보다 높게 측정되는 현상이 발생하였다. AE-51 측정 BC 농도와 AE-16 측정 BC 농도 사이의 상대오차율은 AE-51 모델의 필터 여과지 사용시간, 일기유형, 대기 오염도 등에 따라 상당히 달라지며 최소 11.5% (AE-51 필터사용시간 1,595분)에서 최대 52.5% (AE-51 필터사용시간 2,085분)의 상대오차율 분포를 보여주었다. 실험 결과에 의하면 AE-51 모델에서 사용한 필터여과지 한 개의 사용시간과 두 BC 농도의 차이(또는 상대 오차율)를 고려했을 때, 박무와 연무현상으로 대기가 매우 혼탁한 경우를 제외하고는 AE-51 모델의 필터 여과지 사용시간을 최대 24시간(1,440분) 이하로 유지하는 것이 믿을만한 BC 측정결과를 얻을 수 있음이 확인되었다. 또한 강우현상을 포함한 대기가 매우 청정한 조건에서는 AE-51 모델에서 하나의 필터 여과지를 최대 3일 동안 사용해도 BC 농도 측정결과의 신뢰성에는 문제가 없는 것으로 조사되었다. 또한 AE-51 모델의 BC 측정오차를 줄일 수 있는 다른 방법으로는 장비의 활용범위를 개인노출실험, 지하 공간(지하 주차장, 지하철 등), 다중이용시설의 내부 공간 등으로 제한하여 사용하는 것이 바람직할 것으로

판단된다. 그리고 향후에 계절, 기상인자(상대습도, 기온, 풍속 등), 에어로졸 입자의 화학적 성분 등의 변화에 따른 두 BC 장비의 측정오차를 규명하기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-313-D00549).

참 고 문 헌

Adams, K., L. Davis, S. Japar, and D. Finley (1990) Real-time, in-situ measurements of atmospheric optical absorption in the visible via photo-acoustic spectroscopy: IV. Visibility degradation and aerosol optical properties in Los Angeles, *Atmospheric Environment*, 24, 605-610.

Crutzen, P. and M. Andreae (1990) Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles, *Science*, 250, 1669-1678.

Gebhart, K., S.M. Kreidenweis, and W.C. Malm (2001) Back-trajectory analyses of fine particulate matter measured at Big Bend National Park in the historical database and the 1996 scoping study, *The Science of the Total Environment*, 276, 185-204.

Hansen, A., H. Rosen, and T. Novakov (1984) The Aethalometer-an instrument for the real-time measurement of optical absorption by aerosol particles, *The Science of the Total Environment*, 36, 191-196.

Hansen, J., M. Sato, R. Ruedy, A. Lacis, and V. Oinas (2000) Global warming in the twenty-first century: An alternative scenario, *Proceedings of The National Academy of Sciences of The United States of America*, 97(18), 9875-9880.

Jung, J.H. and S.S. Park (2010) Characteristics of black carbon in PM_{2.5} observed in Gwangju for year 2008 and examination of filter loading effect, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 26(4), 392-402. (in Korean with English abstract).

Maynard, D., B.A. Coull, A. Gryparis, and J. Schwartz (2007) Mortality risk associated with short-term exposure to traffic particles and sulfates, *Environmental Health Perspectives*, 115(5), 751-755.

Menon, S., J. Hansen, L. Nazarenko, and Y.F. Luo (2002) Climate effects of black carbon aerosols in China and India, *Science*, 297(5590), 2250-2253.

Myhre, G., A. Myhre, and F. Stordal (2001) Historical evolution of radiative forcing of climate, *Atmospheric Environment*, 35, 2361-2373.

Park, S.S., J.H. Jung, S.Y. Cho, and S.J. Kim (2009) Compensation of aethalometer black carbon data observed at a Gwangju site, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 25(6), 571-578. (in Korean with English abstract)

Virkkula, A., T. Makela, R. Hillamo, T. Yli-Tuomi, A. Hirsikko, K. Hameri, and I.K. Koponen (2007) A simple procedure for correcting loading effects of aethalometer data, *Journal of the Air and Wastement Management Association*, 57, 1214-1222.

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, *Journal of Aerosol Science*, 34, 1445-1463.