

광주 도심지역에서 측정된 Aethalometer 검댕입자 자료의 보정

Compensation of Aethalometer Black Carbon Data Observed at a Gwangju Site

박승식^{1),*} · 정정훈¹⁾ · 조성용¹⁾ · 김승재^{1),2)}

¹⁾전남대학교 환경공학과, ²⁾전남대학교 환경연구소

(2009년 7월 10일 접수, 2009년 9월 12일 수정, 2009년 10월 16일 채택)

Seung Shik Park^{1),*}, Jung H. Jung¹⁾, Sung Y. Cho¹⁾ and Seung Jai Kim^{1),2)}

¹⁾Department of Environmental Engineering, Chonnam National University

²⁾Environmental Research Institute, Chonnam National University

(Received 10 July 2009, revised 12 September 2009, accepted 16 October 2009)

Abstract

PM_{2.5} black carbon (BC) concentrations were measured to investigate the filter spot loading effect in raw BC data at 5-minute time-based resolution using a single-wavelength aethalometer at a Gwangju site. Also the elemental carbon (EC) concentrations from 24-hr integrated filter-based measurements of PM_{2.5} particles were determined to compare with the loading compensated BC values. Close examination of the time-series BC data showed clearly the “gaps” when the filter tape advances, suggesting the correction of raw BC data. Therefore, we calculated the average BC concentration in each range of attenuation (ATN) to decide if there was (or was not) an effect on the aethalometer data according to the loading of the filter spot. A consistent decrease of average BC concentration was found with increasing ATN values for every month, suggesting there was a consistent “spot loading effect” in the raw BC data. The loading compensated BC concentration according to a simple compensation model with loading effect was 1.01 ~ 1.15 times greater than the raw BC data. The 24-hr average concentration of EC observed during summer sampling period was about 3% higher than the original 24-hr average BC value and 2% lower than the loading compensated BC concentration.

Key words : Aethalometer, Black carbon, Spot loading effect, Elemental carbon

1. 서 론

탄소입자는 대기 입자상 물질의 가장 많은 성분들 중 하나이며 유기탄소(Organic carbon, OC) 및 원소

탄소(Elemental carbon, EC, 또는 black carbon (BC)으로도 불림)로 이루어져 있다. 대기 중 입자상 물질은 필터에 채취될 때 주로 EC의 존재로 인하여 검게 나타난다. 그러므로 검댕(BC)을 가시광선 스펙트럼의 폭넓은 범위에서 빛을 흡수하는 탄소 에어로졸의 분율로 정의한다. 탄소입자의 특성에 대한 연구는 매우 실효적인 분야로서, 특히 인간의 건강 및 대기

*Corresponding author.

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

복사성질에 미치는 영향들 및 구름과의 상호작용에 밀접하게 관련되어 있다. 게다가 EC (또는 BC) 에어로졸은 직·간접적으로 대기에서 빛의 소멸을 통하여 기후에 영향을 미치며 (Myhre *et al.*, 2001; Horvath, 1993; Adams *et al.*, 1990) 시정감소를 초래한다 (Gebhart *et al.*, 2001; Crutzen and Andreae, 1990). 화석연료의 불완전 연소로 배출되는 BC 입자의 기후 복사강제력은 최대 $+0.5 \text{ W/m}^2$ 로 평가되고 있다 (IPCC, 2001). 최근 전 세계적으로 대기 중 BC 농도의 현저한 증가현상 및 BC 측정농도의 불확실도는 대기 중 BC 농도의 복사강제력의 평가에 상당한 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단되며 대기 중 BC 농도의 정확한 측정을 통한 배출량 실태파악이 이루어져야 할 것이다.

Aethalometer는 롤러 필터(roll filter)에 채취된 시료를 통해 투과된 빛의 감쇄정도를 측정함으로써 BC 에어로졸의 농도를 결정한다. 현재까지 이용 가능한 모든 광학적 흡수 또는 빛의 감쇄방법들 중에서 Hansen *et al.* (1984)에 의하여 개발된 aethalometerTM가 대기 중 실시간 BC 에어로졸의 질량농도를 측정하기 위해 가장 많이 사용된 기법이다. 현재 세계적으로 aethalometer 측정 장비가 도심지역, 교외지역, 배경지역, 실내 공간 등에 설치되어 사용 중에 있으며 국내의 경우도 몇몇 연구기관에서 장비를 활용하고 있다 (Park *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2007, 2006). Aethalometer에서 BC 농도측정을 위해 사용되는 BC 에어로졸의 흡수효율은 배출 오염원 및 화학적 조성 (Petzold *et al.*, 2005; Lavanchy *et al.*, 1999; Lioussé *et al.*, 1993)에 따라 달라지고 모든 빛의 흡수는 BC 에어로졸의 존재 때문이라는 가정은 항상 성립되지 않는 것 (Kirchstetter *et al.*, 2004; Arimoto *et al.*, 2002; Caquineau *et al.*, 1998)으로 알려져 있다.

최근에 aethalometer 석영필터에 입자들의 축적에 의한 광학적인 영향이 측정결과에 영향을 미치고 있음이 보고되고 있다 (Kirchstetter and Novakov, 2007; Arnott *et al.*, 2005; Weingartner *et al.*, 2003; LaRosa *et al.*, 2002). 석영필터에 입자가 쌓임에 따라 추가된 BC의 단위 질량당 흡수된 빛의 감쇄 정도가 감소되어 샘플링 초기 필터에 비하여 축적된 필터에 대해 실제보다 더 낮은 BC 농도를 초래한다. 이와 같은 광학적인 효과를 “투영효과 (shadowing effect 또는 spot loading effect)”라 일컫는다. 이와 같은 투영효과

는 실외보다 실내 환경에서 크게 나타나고 대기 체류시간이 오래된 시외지역 에어로졸보다 오염원에서 바로 배출된 새로운 에어로졸 입자 (fresh urban aerosols)에서 크게 나타난다고 보고되고 있다 (Hansen *et al.*, 2007). 현재 세계적으로 사용 중인 aethalometer는 석영필터의 빛의 감쇄를 BC 질량농도로 변환시키기 위해 사용된 알고리즘은 이와 같은 채취 입자의 필터부하 증가에 따른 광학적인 영향을 보정하지 않고 있다.

Aethalometer 기기의 측정 BC 농도는 BC 농도와 필터에 쌓인 입자의 빛의 감쇄치 사이에 선형관계를 가진다는 가정을 전제로 결정되지만, 실제 기기 응답 특성 분석결과에 의하면 대기환경 조건, 계절, 시간, 교통량 등에 따라 BC 농도와 빛의 감쇄치 사이에 비선형관계를 보일 수 있다. 본 연구에서는 광주광역시 한 도심지역에서 단일 채널 aethalometer에 의해 5분 간격으로 2008년 1월부터 8월까지 약 8개월 동안 BC 농도를 측정하여 원시 (raw) BC 자료로부터 석영필터에 쌓인 입자의 부하 증가에 따라 실제 BC 농도의 저 평가 현상이 발생하는지 조사하였다. 그리고 필터 상에 입자부하 증가에 따른 광학적 산란효과 발생 시 실제보다 낮게 측정된 BC 농도의 보정을 위하여 경험적인 비선형 모형을 사용하였다.

2. 대기 중 BC 입자측정 및 광학적 산란효과 보상

2.1 BC 에어로졸 입자의 실시간 측정 및 24시간 기준 원소탄소 측정

BC 에어로졸 입자 측정은 PM_{2.5} 임팩터가 설치된 880 nm의 단일채널 aethalometer (Magee Scientific사 AE-16 모델)에 의하여 5분 간격으로 광주광역시 전남대학교 공과대학의 3층 건물 옥상에서 2008년 1월 20일에서 8월 31일까지 이루어졌다. 측정지점은 2차선 도로에서 약 50m 떨어져 있으며 출퇴근 시간대에 대기오염물질들의 농도가 증가하는 경향을 보이는 전형적인 도시지역 대기질의 특성을 나타낸다.

Aethalometer는 대기 중 BC 에어로졸 입자 농도를 실시간으로 측정 가능한 기기이다. Aethalometer는 필터에 채취된 입자를 통해 투과된 빛의 광학적인 감쇄를 측정하는 원리로 BC 에어로졸 입자의 질량농도

를 결정한다. 석영필터에 부착된 입자들에 의한 빛의 광학적 감쇄(ATN)는 다음 관계로부터 계산된다.

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

여기서 I_0 및 I 는 입자 채취 전·후 석영필터 매체를 통한 빛의 세기를 나타낸다. Aethalometer에서 BC 에어로졸의 질량농도, M_{BC} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)는 빛의 감쇄계수로 부터 계산된다.

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

여기서 b_{ATN} : 빛의 감쇄계수(m^{-1}), A : 필터 spot 면적(m^2), Q : 공기채취유량(L/min), ΔATN : 입자채취 시간(Δt , min) 동안 빛의 감쇄변화, 및 σ_{ATN} : 필터에서 BC의 감쇄효율로 880 nm의 근적외선 파장(Aethalometer "AE-16" 모델의 램프 조사파장)에서 $16.6 \text{ m}^2/\text{g}$ 를 가진다. 그러나 σ_{ATN} 은 에어로졸의 종류 및 대기 체류 시간에 상당히 영향을 받는다(Petzold and Niessner, 1995; Liousse *et al.*, 1993). 기기에 내장된 백열등으로 측정된 σ_{ATN} 은 오염원으로부터 멀리 떨어진 지역(remote areas)에서는 $5 \sim 9.3 \text{ m}^2/\text{g}$ (Lavanchy *et al.*, 1999), 도시지역에서는 $14 \text{ m}^2/\text{g}$ 및 도로변 지역에서는 $20 \text{ m}^2/\text{g}$ (Liousse *et al.*, 1993)로 조사되었다.

또한 실시간 BC 입자측정 외에도 BC 농도와와의 비교분석을 위하여 동일한 장소에서 24시간 기준의 $\text{PM}_{2.5}$ 입자를 2008년 6월 1일~8월 31일 사이에 채취하여 미국 환경청의 NIOSH 방식인 TOT(Thermal optical transmittance)방법에 의해 유기 및 원소탄소를 분석하였다. 대기 중 $\text{PM}_{2.5}$ 입자채취를 위해 사용된 여지는 47 mm 직경의 석영필터(Pallflex Tissu-quartz 2500 QAO, Whatman)로 사용 전 공 시료에 존재할 있는 탄소성분양을 최소화하기 위하여 500°C 로 유지된 화로 내에서 약 10시간 동안 전처리 하였다.

2. 2 Aethalometer BC 자료의 광학적 산란효과 보정방법

Aethalometer 기기(AE-16 모델)는 석영필터에 쌓인 입자에 의한 빛의 누적 감쇄치가 약 125에 이르면 석영필터 롤 테이프가 약 2.5 cm씩 앞으로 이동하는데 이 시점에 BC 에어로졸 농도의 순간적인 증가 현상이 관측되며, 필터 이동 전·후 BC 농도가 보통 2배정도 차이가 발생한다. 이것은 입자가 석영필터에

점진적으로 누적됨에 따라 입자의 광학적인 산란현상이 발생하여 필터 교체 전까지의 시료에 대해서는 실제 BC 농도보다 낮은 BC 농도를 보여준다(Hansen *et al.*, 2007; Kirchstetter and Novakov, 2007; Virkkula *et al.*, 2007; Arnott *et al.*, 1999). 이런 현상의 발생은 빛의 감쇄치(ATN) 변화와 BC 농도사이 비선형관계를 야기하여 aethalometer의 기본적인 측정원리를 위반한다(Arnott *et al.*, 2005; Weingarter *et al.*, 2003). 또한 지구 기후 강제력에 미치는 BC 입자의 영향을 실제보다 낮게 평가할 수 있기 때문에 aethalometer 측정 BC 농도자료의 보정이 반드시 필요하다.

본 연구에서 측정된 aethalometer BC 자료에서 필터가 움직일 때 실제로 BC 자료의 광학적 산란효과에 의해 BC 농도의 저 평가 가능성을 조사하였다. 그림 1은 2008년 2월 19일 09:00~2월 22일 16:00까지 aethalometer로 측정된 5분 간격의 BC 농도와 빛의 누적 감쇄치를 보여준다.

그림 1에서 보는 바와 같이 본 연구의 측정결과에서도 명백하게 입자축적에 의한 필터의 빛의 누적 감쇄치가 ~125에 도달하여 새로운 필터 spot으로 교체될 때 BC 농도가 급격한 증가경향을 보이고 있음을 확인할 수 있었다. 예로서 출근시간대에 측정된 BC 농도는 2월 20일 오전 07:55분(필터 이동 전 마지막 측정)에 $11.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 오전 08:10분(필터 이동 후 첫 번째 측정)에 $17.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 관측되었다. 그리고 2월 22일 06:45분(필터 이동 전 마지막 측정)에 BC 농도는 $5.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 07:00분에 $13.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 측정되었다. 반면에 2월 21일 02:55분에 BC 농도는 $2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 03:10분에 $3.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 측정되었다. 위 결과에 의하면 출퇴근시간 동안 차량운행에 의해 배출되는 새로운 에어로졸 입자들(fresh aerosol particles)의 경우는 실제 BC 농도보다 훨씬 큰 BC 농도의 저평가를 나타내고 있음이 확인되었다.

본 연구에서는 BC 측정결과의 광학적 전조효과(shadowing effect)에 의한 BC 농도의 저평가를 보정하기 위하여 Virkkula *et al.* (2007)이 제안한 보정 알고리즘을 사용하였다. 알고리즘은 필터 spot 이동 후 측정된 첫 번째 BC 농도는 실제 BC 농도에 근접한 것으로 가정한다. Virkkula *et al.* (2007)이 제안한 보정 알고리즘의 원리를 간단히 소개하면 다음과 같다. 식(2)의 빛의 감쇄계수(b_{ATN})는 측정시간 진행에 따라 필터 위에 축적된 입자의 부하영향 때문에 실제

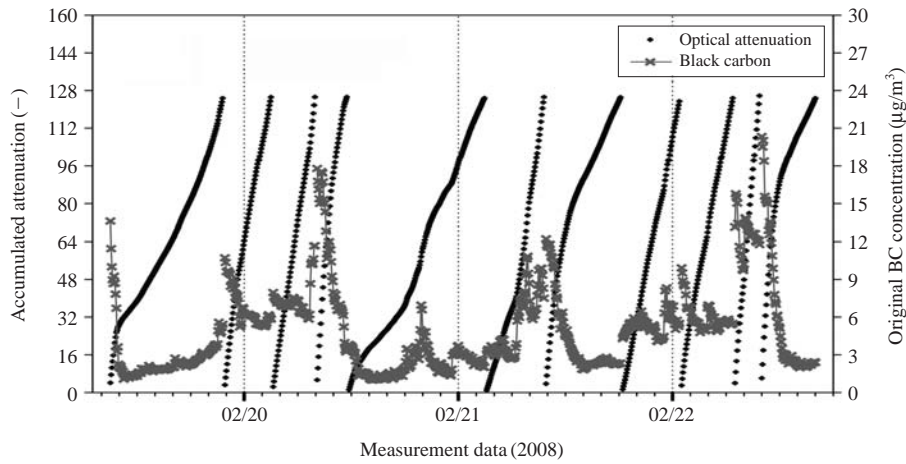


Fig. 1. Relationship between optical attenuation and BC concentration reported from Aethalometer instrument.

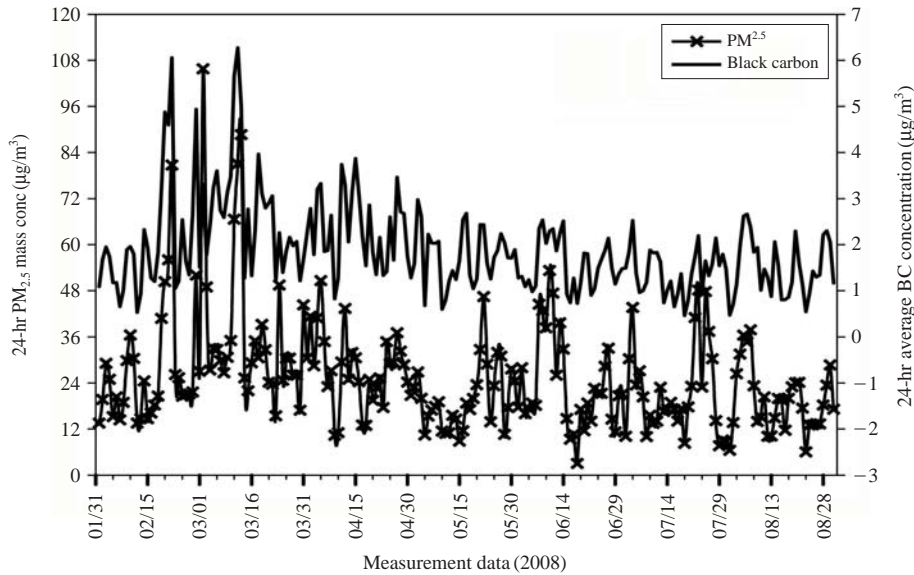


Fig. 2. Temporal profiles of 24-hr average PM_{2.5} and BC concentrations measured over the entire study period.

에어로졸 입자의 감쇄계수와 상당한 차이를 나타낼 수 있으며 빛의 감쇄치와 BC 농도 사이에 비선형관계를 보인다. 보정된 빛의 감쇄계수는 식(3)과 같은 비선형관계를 따른다고 가정하며 보정된 BC 농도는 식(4)에 의해 계산된다.

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

$$Corrected\ BC = \frac{b_{ATN}(corrected)}{\sigma_{ATN}} = (1 + k \cdot ATN) \cdot M_{BC} \quad (4)$$

여기서 “k”는 경험적으로 도출된 상수이며 광학적 산란효과의 양을 나타낸다. Hansen *et al.* (2007)은 단일 비선형변수, “k”값은 측정위치, 계절, 에어로졸 입자의 조성, 대기 에어로졸 체류시간 등에 따라 변한

다고 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 PM_{2.5} 및 BC 농도의 시간별 특성

2008년 1월부터 8월까지 측정한 월 평균 PM_{2.5} BC 농도는 대기혼합도가 높고 대기확산이 원활한 여름철에 해당하는 7월에 1.4 μg/m³로 가장 낮았으며 3월에 2.7 μg/m³로 가장 높게 관측이 되었다. 그림 2는 전 측정기간 동안 PM_{2.5} 입자와 BC의 24시간 평균농도 분포를 보여준다. PM_{2.5} 질량농도는 PM_{2.5} BC 입자의 측정지점에서 약 1km 떨어진 광주지역 두암동 대기오염 측정소에서 관측한 자료를 사용하였다. 측정기간 중 PM_{2.5} 일 평균농도는 25.3 μg/m³ (3~106 μg/m³)로 관측되었다. 동일기간에 BC 입자의 농도는 1.9 μg/m³ (0.5~6.3 μg/m³)이었으며 PM_{2.5}의 8.3% (3.1~23.8%)를 차지하였다. 2월 22일과 3월 2일에 두 번의 황사가 발생하였는데 이 때 측정된 BC 평균농도는 각각 3.3 μg/m³와 6.1 μg/m³이었으며 PM_{2.5} 질량농도의 7.5%, 3.1%를 차지하였다.

3.2 실시간 aethalometer BC 자료의

광학적 산란효과 보상

본 연구를 통하여 측정한 aethalometer BC 자료의 정밀조사에 의하면 필터에 쌓인 입자의 부하가 빛의 최대 감쇄치(~125)에서 0으로 변할 때, 즉 새로운 필터 spot으로 전진할 때, 입자의 광학적 부하영향의 명확한 조짐이 있음을 확인하였다. 필터에 입자가 쌓임에 따라 aethalometer BC 자료에 미치는 광학적인 영향이 실제로 존재하는지 또는 그렇지 않는지를 결정하기 위하여 간단한 단일 매개변수법을 사용하였다. 이 방법을 사용하기 위하여 먼저 월별로 측정한 BC 자료에 대해 각각의 빛의 감쇄치(ATN) 범위에 대한 BC 입자의 평균농도를 계산하였다. 그림 3은 총 7개월의 측정기간 중 여름철 3개월(6월, 7월, 8월)에 대한 ATN 값의 증가에 따른 BC 평균 농도의 변화와 aethalometer 측정 BC 농도와 보정된 BC 농도사이의 관계를 나타낸다. 그림 3에서 총 7개월의 측정기간 중 여름 3개월 측정 자료만을 언급한 이유는 원시 BC 자료의 보정결과의 신뢰성 검증이 24시간 필터 측정 EC 자료가 있는 여름철 기간(6~8월)에 대하여

수행되었기 때문이다. ATN 값과 평균 BC 농도사이의 회귀방정식에 의해 계산한 평균 BC 농도는 빛의 감쇄치(ATN)가 0에서 ~125로 증가할 때 2월 16.8%, 3월 27.0%, 4월 33.4%, 5월 37.7%, 6월 3.8%, 7월 35.7%, 및 8월 13.5%의 상대적인 감소율을 보여주었다. 6월을 제외하고는 대부분의 측정기간 중 ATN 증가에 따라 평균 BC 농도의 감소현상이 일관되게 관측되었다. 이것은 필터에 쌓인 입자의 빛의 감쇄치가 ~125에 도달하여 필터 테이프가 전진할 때 확실하게 광학적인 입자의 부하영향(spot loading effect)이 존재하여 aethalometer 측정 BC 농도가 저 평가되었음을 의미한다.

이와 같이 aethalometer 측정 BC 농도의 저 평가를 초래하는 광학적 산란효과의 크기는 식(3)의 단일변수인 “k” 값에 의해 표현된다. 월별 기준으로 통계적인 선형 적합도(linear fit)에 따라 계산된 “k” 값은 0.26(6월)에서 2.96(5월)로 분포되어 있다. Hansen *et al.* (2007)은 “k” 값이 0에 접근하면 대기 에어로졸 입자는 국지적 배출 오염원에 의해 직접적인 영향을 받는 것보다 대기 체류시간이 오래되거나 또는 광학적 산란특성을 보이는 성분들이 상당히 혼합되어 있는 상태를 나타내는 반면에 “k” 값이 0으로부터 멀어질수록 aethalometer에서 채취된 입자들은 새롭게 배출된 입자나 인접한 국지적 오염원들에 의해 직접적으로 좌우되는 물질들로 구성되어 있는 것으로 보고하고 있다. 이와 같은 기존의 연구결과를 고려했을 때 여름철인 6월, 7월, 8월의 대기 에어로졸 입자는 7월의 경우에는 국지적인 배출 오염원에 의해 영향을 받지만, 6월 및 8월에는 황산염 및 질산염과 같은 광학적 산란특성을 갖는 화학종들이 상당히 혼합되어 있는 물질들에 의해 대기가 영향을 받고 있음을 짐작할 수 있다. 선형회귀분석에 의하면 식(3)에 의해 보정된 BC 농도는 월별로 차이는 있으나 aethalometer 측정 BC 농도(미 보정 BC 자료)보다 1~15% 정도 높은 것으로 평가되었다. 5월 측정된 BC 자료의 경우, 보정과 미 보정 BC 농도 사이에 가장 큰 차이(원 BC 자료의 15% 저평가)를 나타내었다. 6월, 7월 및 8월의 원 BC 농도와 보정된 BC 농도사이의 회귀분석결과가 그림 3의 오른쪽에 나타나 있다. Aethalometer 측정 원 BC 자료를 보정하기 위하여 사용한 간단한 선형모형은 필터 전진 시 관측한 BC 자료의 톱니바퀴 모양의 변화를 확실히 줄여주는데 기여하는

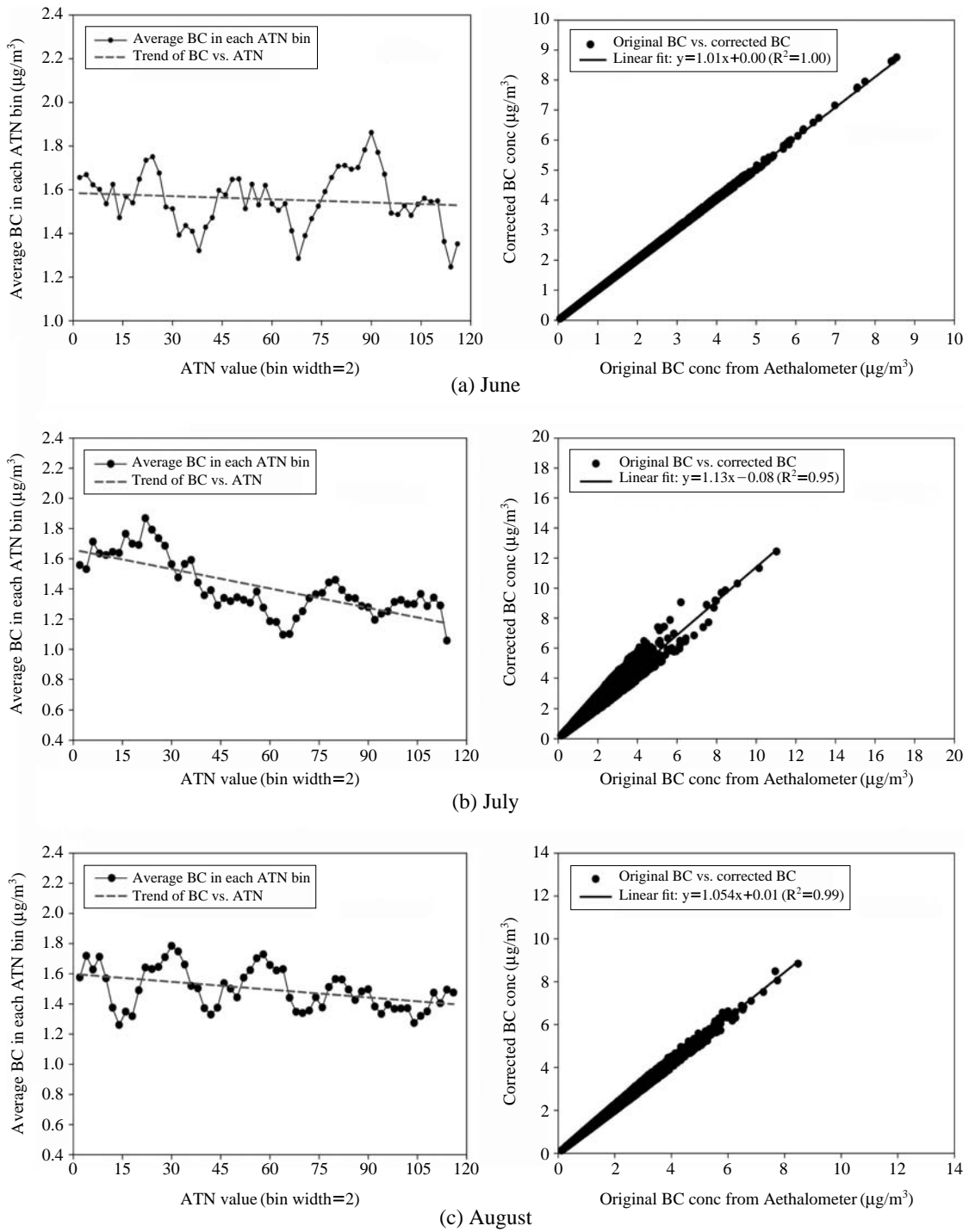


Fig. 3. Variation of average BC concentration with increasing ATN value (left graphs) and regression relationship between original BC reported from aethalometer and corrected BC (right graphs) for June, July and August sampling periods.

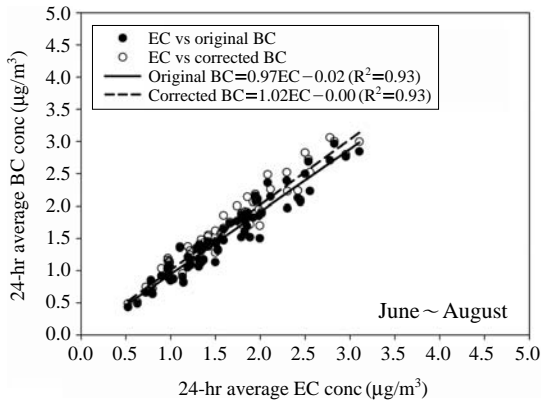


Fig. 4. Relationship between 24-hr filter-based EC and aethalometer BC concentrations.

것으로 확인이 되었다.

24시간 필터 측정 EC 농도와 원 또는 보정 BC 농도사이의 부합도를 판단하기 위하여 선형회귀분석 수행결과를 그림 4에 나타내었다. 5분 평균 aethalometer 측정 및 보정 BC 농도자료는 24시간 평균 EC 농도와 비교를 위하여 24시간 평균으로 변환하였다. 선형회귀분석에 의하면 24시간 평균 원시 및 보정 BC 농도는 24시간 평균 EC 농도와 매우 잘 일치하는 것으로 조사되었다($R^2=0.93$). 이 때 두 자료의 회귀분석결과에 의한 기울기는 각각 0.97, 1.02이었으며, 두 회귀분석자료에 대해 기울기가 1.0으로부터 차이를 보이지 않는 이유는 광주지역에서 측정된 여름철 대기 에어로졸 입자의 경우 체류시간이 길고 대기 중 2차 광화학 무기 및 유기 생성물들이 대기 에어로졸 입자의 주요 구성성분으로 인하여 그림 3에서 볼 수 있듯이 검맹입자의 광학적 산란효과에 의한 영향이 미미하게 나타났을 것으로 추정할 수 있다. 그러나 이와 같은 가설을 뒷받침하기 위해서는 주요 이온성분들의 측정 및 분석을 통한 해석이 요구된다. 또한 본 연구에서 사용한 간단한 선형 보상모형의 적합도 및 신뢰성을 향상시키기 위해서는 다양한 대기환경 및 장기적인 대기측정을 통해 얻어진 자료와의 정량적인 비교연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

4. 결 론

단일채널 aethalometer에 의하여 5분 간격의 BC

입자 농도를 측정하여 석영필터 상에 입자 부하증가에 의한 BC 에어로졸 농도의 저 평가 발생가능성을 조사하였다. Aethalometer BC 측정결과의 분석에 의하면 입자 측정에 의한 필터의 빛의 감쇄치와 BC 농도사이 비선형관계를 보였으며 aethalometer 기기 내부의 석영필터 이동 전·후의 BC 농도에 상당한 차이가 있음이 확인되었다. Aethalometer 필터 spot 이동 전·후 BC 에어로졸 입자 농도의 차이를 보정한 결과에 의하면 보정 후 BC 농도는 원시 BC 농도에 비해 대략 1~15% 정도 높게 평가되었다. 연구에서 사용된 광학적 산란효과 보정 알고리즘의 검증결과에 의하면 알고리즘을 활용해 평가한 BC 농도는 24시간 채취 필터시료를 통해 분석한 원소탄소농도와 매우 높은 상관성($R^2=0.93$)과 1.02의 기울기를 보여주었다. 이것은 aethalometer BC 자료의 보정과정이 석영 필터 테이프의 입자부하영향을 잘 설명해주고 있음을 입증하였다. 앞으로도 지속적으로 기존의 필터기준의 분석방법과의 정량적인 비교 평가연구가 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2007년 전남대학교 학술연구비 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

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.

Arimoto, R., W. Balsam, and C. Schloesslin (2002) Visible spectroscopy of aerosol particles collected on filters iron-oxide minerals, Atmospheric Environment, 36, 89-96.

Arnott, W., K. Hamasha, H. Moosmuller, P. Sheridan, and J. Ogren (2005) Toward aerosol light absorption measurements with a 7-wavelength Aethalometer: Evaluation with a photoacoustic instrument and a 3-wavelength nephelometer, Aerosol Science and Techno-

- logy, 39, 17-29.
- Caquineau, S., A. Gaudichet, L. Gomes, M. Magonthier, and B. Chatenet (1998) Saharan dust clay ratio as a relevant tracer to assess the origin of soil-derived aerosol, *Geophysical Research Letter*, 25, 983-986.
- 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. Kreidenweis, and W. Malm (2001) Back-trajectory analyses of fine particulate matter measured at Big Bend National Park in the historical database and the 1967 scoping study, *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, *Science of The Total Environment*, 36, 191-196.
- Hansen, A., J.R. Turner, and G.A. Allen (2007) An algorithm to compensate Aethalometer™ data for the effects of optical shadowing and scattering, 5th Asian Aerosol Conference, Kaohsiung, Taiwan, August 26-29.
- Horvath, H. (1993) Atmospheric light absorption: a review, *Atmospheric Environment*, 27A, 293-317.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2001) *Climate Change 1995: The Science Climate Change*. Cambridge University Press, New York.
- Kirchstetter, T., T. Novakov, and P. Hobbs (2004) Evidence that spectral light absorption by aerosols emitted from biomass burning and motor vehicles is different due to organic carbon, *Journal of Geophysical Research*, 109, D21208.
- Kirchstetter, T. and T. Novakov (2007) Controlled generation of black carbon particles from a diffusion flame and applications in elevating BC measurements methods, *Atmospheric Environment*, 41, 1874-1888.
- LaRosa, L.B., T.J. Buckley, and L.A. Wallace (2002) Real-time indoor and outdoor measurements of black carbon in an occupied house: An examination of sources, *Journal of the Air and Wastement Management Association*, 52, 41-49.
- Lavanchy, V.M.H., H. Gaggeler, S. Nyeki, and U. Baltensperger (1999) Elemental carbon (EC) and black carbon (BC) measurements with a thermal method and an aethalometer at the high-alpine research station Jungfraujoch, *Atmospheric Environment*, 32, 6077-6081.
- Lee, S.B., D.S. Byun, S.M. Park, J.H. Lee, and G.N. Bae (2007) Concentration levels of particulate matters on roads of Seoul in winter, *Proceeding of the Joint Meeting of Environment, BEXCO, Pusan*, 55.
- Lee, S.B., S.M. Park, H.C. Jin, D.S. Byun, D.H. Lee, and G.N. Bae (2006) Characteristics of black carbon concentrations at roadside, *Proceeding of the 43rd Meeting of KOSAE, Mokpo National University*, 121-122.
- Liousse, C., H. Cachier, and S.G. Jennings (1993) Optical and thermal measurements of black carbon aerosol content in different environments: variation of the specific attenuation cross-section, sigma, *Atmospheric Environment*, 27A, 1203-1211.
- 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 for the effect of optical shadowing, *Proceeding of the 48th Meeting of KOSAE, Korea University*, 118-119.
- Petzold, A. and R. Niessner (1995) Method comparison study on soot-selective techniques, *Mikrochimica Acta*, 117, 215-237.
- Petzold, A., H. Schloesser, P. Sheridan, W. Arnott, J. Ogren, and A. Virkkula (2005) Evaluation of multiangle absorption photometry for measuring aerosol light absorption, *Aerosol Science and Technology*, 39, 40-51.
- 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, *Journal of the Air and Waste 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.