

## 2008년 광주지역 검댕입자 특성 및 광학적 산란효과 보상

### Characteristics of Black Carbon in PM<sub>2.5</sub> Observed in Gwangju for Year 2008 and Examination of Filter Loading Effect

정 정 훈 · 박 승 식\*  
전남대학교 환경공학과

(2010년 5월 11일 접수, 2010년 7월 2일 수정, 2010년 8월 4일 채택)

Jung Hoon Jung and Seung Shik Park\*  
*Department of Environmental Engineering, Chonnam National University*  
(Received 11 May 2010, revised 2 July 2010, accepted 4 August 2010)

#### Abstract

Black carbon (BC) concentrations were measured with an aethalometer (AE-16, 880 nm) at time interval of 5-min at an urban site of Gwangju over a year 2008. 24-hr filter-based integrated measurements of PM<sub>2.5</sub> particles were also made at the same site during the winter and summer intensive periods to test any optical loading bias in the raw BC data measured by aethalometer. BC concentration was higher in winter than in summer, possibly due to increase in emissions from energy consumption and poor dispersion with reduction of boundary layer in winter. Also temporal cycles of BC indicate that short-term transient spikes were common, occurring primarily during the rush-hour periods. A similar feature was also observed in diurnal concentration cycle of CO, mainly emitted from motor vehicles. When both low wind speed and weather patterns such as mist, haze and etc were combined, high BC concentrations frequently occurred. The amount of optical loading effect described by the "k" factor showed the seasonal variation, ranging from 0.0003 to 0.0036. This implies that optical loading effect is not seen at all times. From the comparison between the filter-based elemental carbon (EC) and aethalometer BC data, it was found that the loading compensated BC values were more reasonable than the raw BC ones reported from the aethalometer.

**Key words :** Aethalometer, Black carbon, Elemental carbon, Meteorological factors, Optical loading effect

#### 1. 서 론

대기 중 미세먼지의 중요한 구성요소 중 하나인

탄소입자는 유기탄소(organic carbon, OC)와 원소탄소(elemental carbon, EC 또는 black carbon, BC)로 이루어져 있다. BC(검댕) 입자는 화석 연료의 불완전 연소와 다양한 종류의 생체 소각을 통하여 생성되며 인간의 건강(질병, 죽음) 및 기후변화에 직·간접적 영향을 미치며(Myhre *et al.*, 2001; Horvath, 1993;

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

Adams *et al.*, 1990), 시정감소를 유발한다(Gebhart *et al.*, 2001; Crutzen and Andreae, 1990). BC 입자는 태양 복사 에너지를 흡수하는 성질을 가지고 있으며, BC 입자에 대한 복사 강제력은 최대  $+0.5W/m^2$ 로 평가되어  $CO_2$ 와 함께 지구 온난화에 기여하는 물질로 알려져 있다(IPCC, 2001). 따라서 21세기 최대 화두로 떠오르는 기후변화의 일환으로 갈수록 심각해져가는 지구 온난화 문제와 관련한 지구복사에너지 균형에 대한 대기 에어로졸 영향의 정량화에 관한 연구가 세계적으로 활발히 진행되고 있다.

도시의 대기오염도는 산업 및 자동차 오염원과 기상요소들의 혼합에 의해서 조절되며, 이를 제어하고 관리하기 위해 오염원의 관리와 생성 메커니즘을 규명하는 일은 필수적이다. 이러한 연구의 일환으로 대기 중 오염물질의 수송 및 확산, 수용점 농도에 영향을 미치는 기상인자와 오염물질의 상관관계에 대한 연구는 병행 되어야 한다. Lee *et al.* (1999)은 부산광역시 지역의 계절별  $NO_2$  농도와 기상인자와의 상관관계를 살펴보았으며, Shin *et al.* (2007)은 인천지역  $PM_{10}$  농도에 영향을 미치는 기상인자인 풍향, 풍속, 상대습도, 일기유형, 해륙풍 유무 등을 살펴봄으로써 미세먼지로 인한 대기오염 현상의 주요원인을 분석하고자 했으며, Hwang *et al.* (2008)은 대구지역의 미세먼지 고농도 발생 현황을 분석하고 일기유형별, 기상인자에 따른 영향을 파악하고자 했다. 따라서 대기질과 밀접하게 관련이 있는 기상변수들과 미세입자의 주요 구성성분 중의 하나인 BC 입자와의 상관관계조사는 수용지역 BC 농도수준을 평가하는데 중요하다 할 수 있다.

대기 중 BC 에어로졸 입자의 질량농도를 실시간으로 측정하기 위해 가장 많이 사용되는 기법은 매질의 빛의 감쇄원리를 이용한 aethalometer이다(Hansen *et al.*, 1984). Aethalometer는 필터에 수집된 BC 입자의 질량과 빛의 감쇄가 선형적으로 비례한다는 전제하에 빛의 감쇄 변화를 BC 입자의 질량농도로 변환시킨다. 하지만 최근에 aethalometer의 석영필터에 입자가 쌓임에 따라 입자의 포화영향(saturation effect)으로 인해 빛의 감쇄와 BC 농도사이에 비선형 관계가 나타남이 보고되고 있다(Kirchstetter and Novakov, 2007; Arnott *et al.*, 2005; Weingartner *et al.*, 2003; La-Rosa *et al.*, 2002). 이러한 현상은 추가된 BC 입자의 단위 질량당 흡수된 빛의 향상이 감소되어 필터 초

기에 비해 측정된 필터는 실제보다 더 낮은 BC 입자의 농도를 초래한다. BC 측정농도의 불확실도의 증가는 BC 에어로졸 입자에 의한 인체 유해성, 기후강제력 평가, 정확한 BC 입자 배출량 인벤토리 구축 등의 평가에서 정확성을 감소시킬 수 있으므로 측정 자료를 활용하기 전에 원시 자료의 보정이 필요하다. 국내·외에서 여러 연구자들에 의하여 산란 및 투영 효과, 및 그에 대한 보상 알고리즘 개발 및 현장 적용에 관한 연구가 많이 수행되었다(Park *et al.*, 2010, 2009; Virkkula *et al.*, 2007; Arnott *et al.*, 2005; Weingartner *et al.*, 2003).

본 연구에서는 광주광역시에서 2008년 한 해 동안  $PM_{2.5}$  BC 에어로졸 입자를 5분 간격으로 측정하여 BC 농도의 일반적인 특성 파악 및 BC 농도와 기상인자들(풍향, 풍속, 상대습도, 일기유형)과의 관계를 살펴보았다. 또한 광주지역 BC 입자의 광학적인 산란효과를 평가하고 원시 BC 자료의 보상에 따른 차이를 분석하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 광주지역 BC 에어로졸 입자

#### 실시간 측정 및 광학적 산란효과 보상

광주지역  $PM_{2.5}$  BC 입자의 측정은 880 nm 단일파장의 aethalometer (AE-16, Magee Scientific Inc.)를 이용하여 전남대학교 한 3층 건물 옥상에서 2008년 1월 18일~12월 31일 사이에 5분 간격으로 이루어졌다. 전남대학교에 위치한 측정 지점은 2차선 도로에서 약 100 m 떨어져 있으며 도로에는 차량들의 통행이 지속적으로 유지되고 있으며 출·퇴근 시간에는 차량통행이 급격히 증가하는 현상을 보인다. 측정 지점 주변에는 소규모 음식점들과 대규모 주거지역이 위치하고 있으며 북쪽방향으로 약 800 m에 호남고속도로 용봉 인터체인지가 위치하고 있다(그림 1).

Aethalometer는 필터에 채취된 입자를 통해 투과된 빛의 광학적인 감쇄정도를 측정하여 BC 에어로졸 입자의 질량농도를 빛의 흡수계수와 감쇄계수의 비로 결정한다.

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

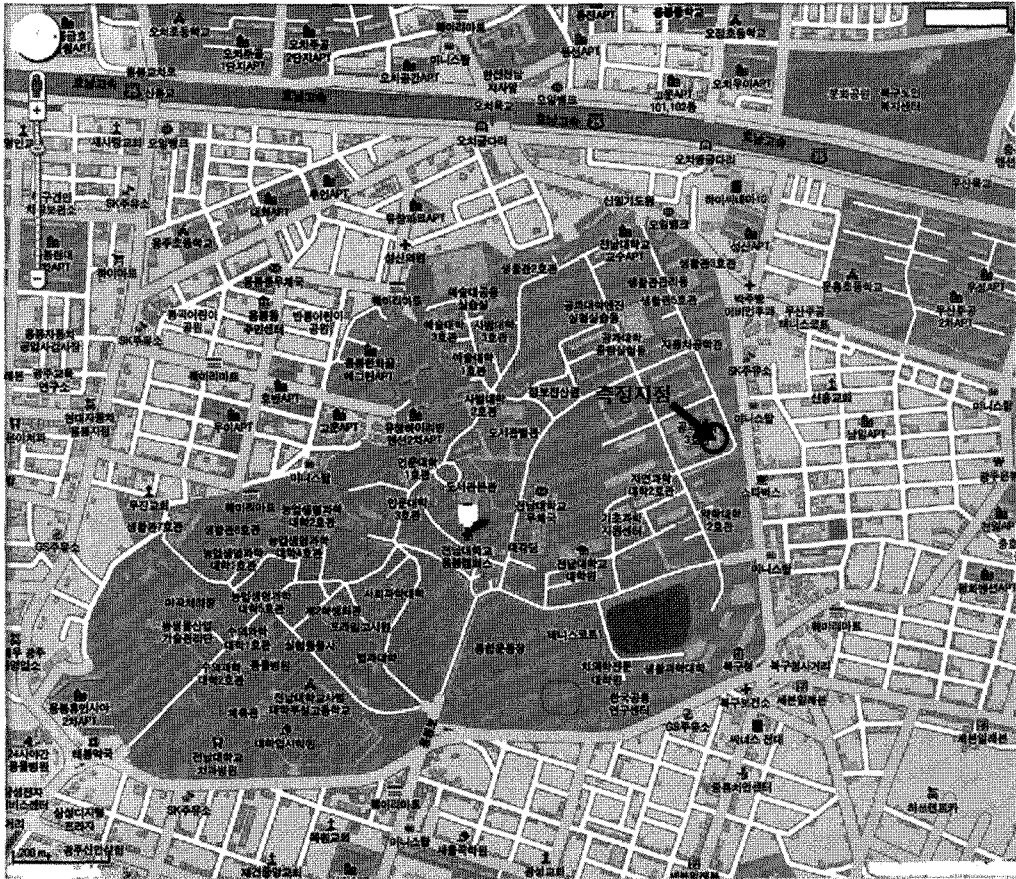


Fig. 1. Area map of sampling site in Gwangju.

여기서  $b_{ATN}$ : Aethalometer에서 측정된 미 보정 빛의 감쇄계수( $m^{-1}$ ), A: 필터 spot 면적( $m^2$ ), Q: 공기채취 유량( $L/min$ ),  $\Delta ATN$ : 입자채취 시간( $\Delta t$ , min) 동안 빛의 감쇄변화 및  $\sigma_{ATN}$ : 필터에서 BC의 감쇄효율로 880nm의 근적외선 파장에서  $16.6 m^2/g$ 를 사용한다.

그러나 식(1)의 원리는 빛의 감쇄치가 필터에 채취된 BC 양에 선형적으로 비례한다는 가정 하에 결정되며 광학적 영향에 의한 빛의 감쇄치(ATN)에 따라 측정되는 BC 에어로졸 입자의 질량농도의 감소 현상에 대한 보정은 이루어 지지 않고 있다. Virkkula *et al.* (2007)은 aethalometer와 PSAP (Particle Soot Absorption Photometer)의 작동원리가 매우 유사한 점에서 기인하여 필터가 깨끗할 때(ATN=0) aethalometer에 의해 얻어진 원시 BC자료는 정확하다는 가정 하에 실험적인 보상 식을 얻었다(Virkkula *et al.*,

2007). BC 농도는 빛의 감쇄계수( $b_{ATN}$ )로부터 계산되어지며, 감쇄계수는 공기 중 입자들의 실제 에어로졸 흡수계수와 상당히 차이가 있다고 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 BC 농도의 광학적 산란현상을 보상하기 위하여 Virkkula *et al.* (2007)이 제안한 aethalometer 감쇄측정을 실제 흡수계수로 변환하기 위해 적용한 보정계수 “k”값을 적용하였다. 보정된 빛의 감쇄계수는 식(2)와 같은 비선형관계를 따른다고 가정하며 보정된 BC 에어로졸 농도는( $BC_{corrected}$ ,  $\mu g/m^3$ ) 식(3)에 의하여 계산한다.

$$b_{ATN}(\text{corrected}) = (1 + k \cdot ATN) \cdot b_{ATN} \quad (2)$$

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

여기서  $\sigma_{ATN}$ : BC의 감쇄 효율, ATN: 석영 필터에 축적된 입자들에 의한 빛의 광학적 감쇄,  $BC_{raw}$ : aethalometer에 의해 측정된 보정되지 않은 BC 농도를 나타낸다. 입자의 광학적 포화정도에 의해 나타나는 spot loading 양은 “k”인자에 의해 설명되며, 이러한 현상은 대기 체류시간이 긴 (aged) 대기 에어로졸보다 “fresh”한 입자에서 잘 관찰된다고 보고되고 있다 (Weingartner *et al.*, 2003). 입자의 광학적 포화현상이 발생하면 실제 BC 농도보다 더 적은 값을 제공하므로 측정 자료를 활용하기 전에 반드시 원시 자료의 보정이 필요하다.

**2. 2 24시간 필터기준 PM<sub>2.5</sub> 측정 및 탄소성분 분석**

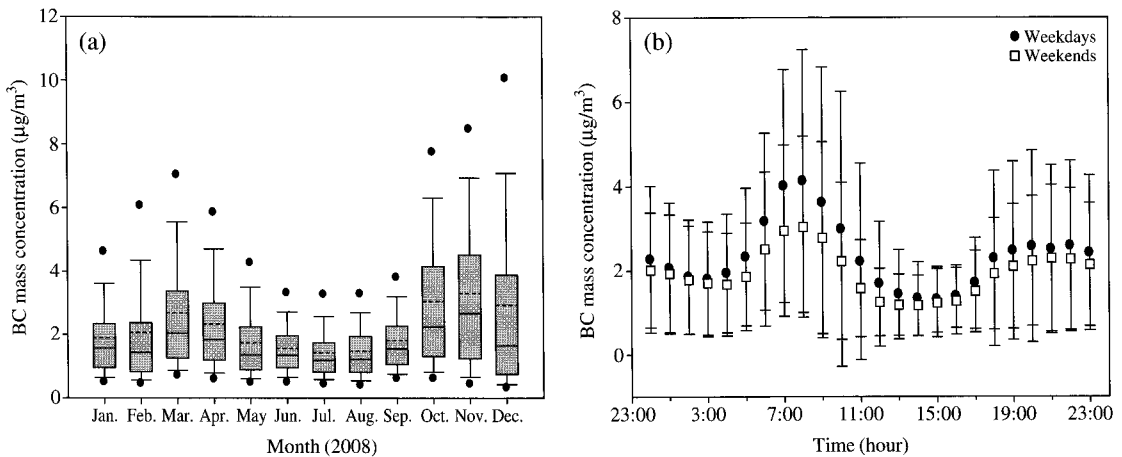
Aethalometer BC 원시 자료의 광학적 loading 효과에 대한 보정 결과의 신뢰성을 평가하기 위해 24시간 PM<sub>2.5</sub> 에어로졸 측정이 동일한 장소에서 여름 (2008년 6~8월)과 겨울(2008년 1~2월, 12월)에 실시되었다. 대기 중 에어로졸 입자의 채취는 PM<sub>2.5</sub> 사이클론(URG-3000) 샘플러를 이용하여 매일 아침 9시에 시작하여 약 24시간 동안 이루어졌다. PM<sub>2.5</sub> 사이클론 도입부는 16.7 L/min의 유량으로 에어로졸을 채취하도록 설계되어 있으며, 입자채취를 위해 사용된 여지는 47 mm 직경의 석영필터 (Pallflex Tissuquartz 2500 QAO, Whatman)로 사용 전 공 시료 (blank filter)에 존재할 수 있는 탄소성분양을 최소화하기 위

하여 ~500°C의 화로 내에서 약 10시간 동안 전처리 하였다. OC 및 EC 정량 분석은 NIOSH-5040 프로토콜을 기초로 한 열·광학적 투과법 (Thermal-optical transmittance: TOT)에 의하여 미국 Sunset Laboratory Inc.에서 이루어졌다. 분석결과에 대한 공 시료의 배경농도를 보정하기 위하여 전체 측정시료의 10%에 해당하는 공 시료를 분진 채취시료의 분석방법과 동일하게 정량화하여 사용하였다.

**3. 결과 및 고찰**

**3. 1 광주지역 PM<sub>2.5</sub> BC 농도 특성**

그림 2는 2008년 일 년 동안 aethalometer에 의하여 5분 간격으로 측정된 BC 자료의 월 평균, 주중 및 주말의 평균농도 분포를 보여준다. 광주지역 측정지점의 연평균 BC 농도는  $2.57 \pm 2.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 여름철인 6, 7, 8월에 비교적 낮은 BC 농도 경향을 보이며, 겨울에 고농도 경향을 보여주었다(그림 2(a)). 특히 12월 9일 오전 10:00~10:30 사이에 5분 평균 최고 농도는  $26.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 측정되었으며, 일평균 농도는  $8.70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 측정기간 중 가장 높게 나타났다. BC 입자의 농도는 여름에 비해 가을 및 겨울에 약 2배 정도 높게 나타났으며, 이러한 계절적 변동이 명확하게 나타나는 이유는 계절적인 기상요인들의 변화에 따른 오염물질의 확산정도차이와 주거지역의 화석연



**Fig. 2. (a) Monthly average of PM<sub>2.5</sub> BC concentration (b) Diurnal variations of PM<sub>2.5</sub> BC concentration for weekdays and weekends.**

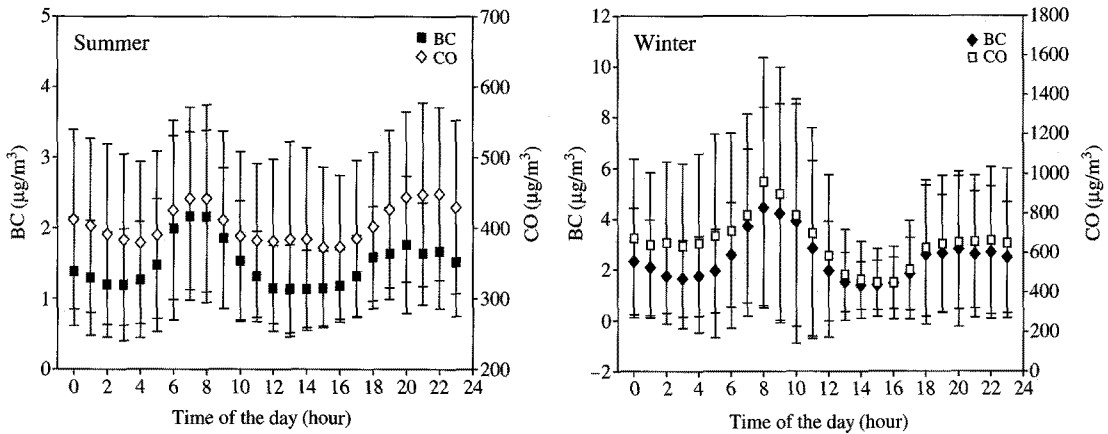


Fig. 3. Diurnal variation of BC mass and CO concentrations in summer and winter.

료 사용량 차이에 의해 기인된 것으로 판단된다. 광주지역 여름철의 주풍은 남서풍으로써 청정한 해양성 기단의 영향을 받으며, 대기 혼합고도가 높아서 입자의 확산이 활발할 뿐만 아니라 높은 강수량에 의한 습식침적에 의해서 농도가 비교적 낮게 나타났다. 주중(weekday)과 주말(weekend)의 BC 농도의 수준을 비교하기 위하여 시간별 평균농도추이를 그림 2(b)에 나타내었다. 주중(월요일~금요일)과 주말(토요일, 일요일)의 BC 농도의 절대치는 약간의 차이를 보이지만 시간변화에 따른 농도추이는 비슷하게 나타났다. 주중 BC 농도의 하루 사이클을 살펴보면, 오전 6:00부터 증가하기 시작하여 7:00~9:00 사이에 최고 농도를 보이며 점차적으로 감소하는 경향을 보여준다. BC 농도의 증가현상은 아침 출근시간과 일치하고 있으며 측정지점에서 약 100 m 떨어진 2차선 도로와 약 800 m 떨어진 호남고속도로에서의 자동차의 운행과 밀접하게 관련된다. 자동차 배출가스의 주요 기체상 물질인 CO의 시간별 농도추이에서도 비슷한 현상이 관찰된다(그림 3). 그리고 주중과 주말 모두 12:00시 이후 시간 진행에 따라 BC 농도는 최소값을 보이는데 이것은 낮 시간 동안 측정지점 주변의 차량통행의 감소, 대기 혼합고의 상승 및 오염물질의 원활한 확산에 의하여 나타나는 현상으로 설명이 가능하다. 또한 저녁시간에 나타나는 BC 농도의 완만한 증가현상은 퇴근시간에 운행되는 차량통행과 직접적으로 관련이 있지만 아침 출근시간에 나타나는 피크 농도 현상이 나타나지 않았다. 이유는

아침 출근시간과 달리 퇴근시간에는 차량운행이 짧은 시간 동안 집중되지 않고 장시간(오후 5~11시) 동안 분산되기 때문으로 판단된다.

### 3.2 PM<sub>2.5</sub> BC 농도에 미치는 기상학적 요인

오염원을 통하여 동일한 오염 물질이 일정한 비율로 대기 중으로 방출된다 할지라도 기온, 풍향, 풍속 등의 기상특성에 따라 대기오염이 이류, 확산되는 양상은 매우 다양하게 나타나며 이것은 결국 수용지역 오염물질 농도수준을 결정한다. 즉, 기상인자는 대기 중 오염물질의 수송, 확산 및 수용농도에 직접적으로 영향을 미치므로 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 BC 입자 측정지점으로부터 약 1.0km 떨어진 광주지방기상청에서 측정된 기상자료를 이용하여 풍향, 풍속, 상대습도 및 일기유형의 기상요인들이 측정지점 BC 입자의 농도수준에 미치는 영향을 평가(그림 4(a)~(d))하였다. 또한 BC 입자의 고농도 현상을 유발하는 기상상태를 분석하였다.

#### 3.2.1 풍향

그림 4(a)는 풍향에 따른 BC 농도 변화를 보여주며 전체 자료에 대한 산술평균값과 백분위수로 나타내었다. 2008년 광주지역의 풍향은 계절에 따른 풍계가 뚜렷하게 나타나며, 여름에는 남서풍 계열이 주풍을 이루고 겨울에는 북동풍계의 바람이 부는 것으로 나타났다. 그림 4(a)에서 볼 수 있듯이 BC 농도는 정온(Calm)구간에서  $3.9 \pm 2.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 평균농도를 보였으며, 정온 구간을 제외하고는 서풍계

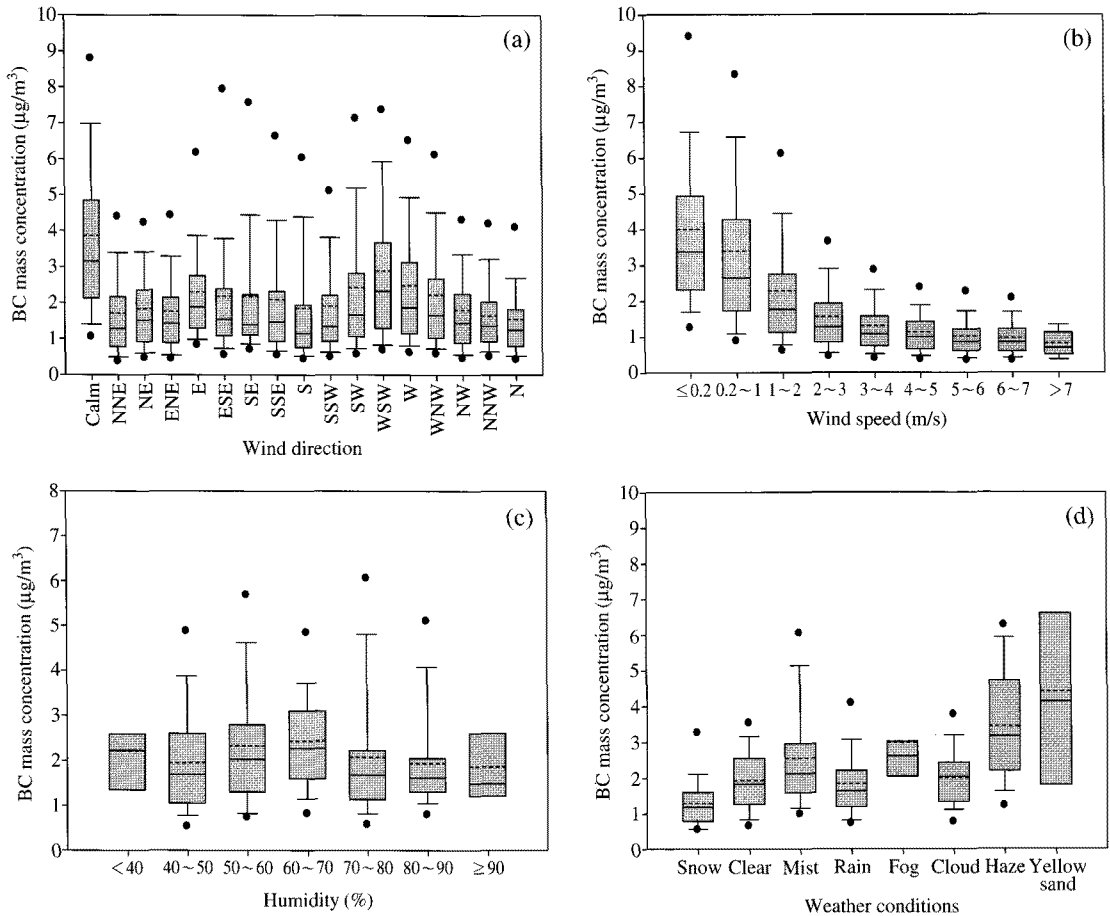


Fig. 4. Variation of BC mass concentration by meteorological factors; (a) wind direction (b) wind speed (c) relative humidity (d) weather conditions.

열인 서남서풍과 서풍 구간에서 각각  $2.9 \pm 2.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $2.5 \pm 2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 높은 농도를 나타냈다. 북풍계열의 북동풍과 북북동풍 구간은 발생 빈도수(11.8%, 11.4%)는 높았으나 각각  $1.8 \pm 1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $1.7 \pm 1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 비교적 낮은 BC 농도분포를 보였다.

### 3.2.2 풍속

풍속별 PM<sub>2.5</sub> BC 질량농도 분포를 그림 4(b)와 같이 살펴보았다. 봄과 겨울철의 평균 풍속은 각각  $2.1 \pm 1.5 \text{ m/s}$ ,  $2.1 \pm 1.9 \text{ m/s}$ 로 나타났으며, 가을철은 평균  $1.6 \pm 1.1 \text{ m/s}$ 로 비교적 낮은 평균풍속을 보였으며, 여름에는 평균  $2.3 \pm 1.4 \text{ m/s}$ , 최대 8.6 m/s의 강한 바람이 분 것으로 나타났다. BC와 풍속과의 관계는 예상

대로 0.2 m/s 이하의 무풍 구간에서  $4.0 \pm 2.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높고 7 m/s를 초과하는 구간에서  $0.8 \pm 0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 낮은 농도분포를 보였으며, 풍속이 증가함에 따라 BC의 질량농도가 감소함을 확인할 수 있었다. BC 농도와 풍속사이의 상관관계를 살펴보면 음의 상관관계( $r = -0.58$ )를 나타내고 있는데, 이것은 낮은 풍속에서는 오염물질의 대기확산이 느려 지역적으로 생성된 BC 입자의 축적이 증가되고 풍속이 증가함에 따라 대기 환기량이 증가하기 때문에 낮은 BC 농도를 보이는 것으로 판단된다.

### 3.2.3 상대습도

그림 4(c)는 상대습도 변화에 따른 BC 농도의 분

포를 나타낸다. 상대습도 60~70% 범위에서 가장 높은 BC 농도( $2.4 \pm 1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )를 보였으며 대체적으로 70% 이하 구간에서 높은 농도분포를 보여주었다. >80%의 구간에서는 BC 질량농도가 감소하는 경향을 보이는데 이것은 강우에 의한 세정작용(wash out) 때문으로 판단된다. 강우에 의한 영향을 배제한 결과, 상대습도  $\leq 40\%$  구간을 제외하고 전반적으로 상대습도가 증가할수록 BC의 농도가 증가하는 경향을 보였으며, >40%부터 상대습도가 10% 증가할 때마다 평균  $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (9.2%)가 상승한 것으로 분석되었다.

3.2.4 일기유형

광주지역 2008년 일기유형을 분석해보면 눈 4.8% (25회), 맑은 날 14.5% (75회), 박무 32% (166회), 비 24.9% (129회), 안개 1.5% (8회), 연무 15.8% (82회), 황사 1.5% (8회)로 나타났다. 그림 4(d)(황사 발생일 제외)에서 보는 바와 같이 BC 입자의 오염도는 연무 ( $3.4 \pm 1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 안개 ( $3.0 \pm 1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 박무 ( $2.6 \pm 1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 순으로 높게 나타났으며, 눈 또는 비의 일기유형을 보일 때  $1.3 \pm 0.7, 1.8 \pm 1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 낮은 BC 농도를 나타냈다. 대기 정체현상과 관련된 일기유형인 연무, 안개, 박무현상이 대기 중 BC 질량농도를 증가시키는 방향으로 작용했음을 짐작할 수 있다. 2008년 광주지역 황사 발생일수는 8일(2월 29일, 3월 2일, 3월 3일, 5월 30일, 5월 31일, 12월 2일, 12월 3일, 12월 9일)로, 황사 발생 시 BC 일평균 질량농도의 최소, 평균, 최고농도는 각각 1.7, 4.4,  $8.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 총 황사 발생일 중 황사만 발생했을 경우는 평균 약  $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 BC 농도의 뚜렷한 증가현상을 찾아볼 수 없었으며, 박무나 연무가 함께 동반되었을 경우에만 고농도 현상이 관측되었다. 이것은 BC 질량 농도에 대한 순수 황사의 영향보다 도로의 차량 운행에 따른 배출가스, 주거지역의 화석연료사용량 증가, 기상요인 등에 의한 영향 때문으로 판단된다.

3.2.5 BC 입자의 고농도현상 발생에 미치는 기상학적 요인분석

표 1은 BC 입자의 고농도(high case) 현상 발생을 야기하는 기상상태를 정리한 표이다. 2008년 광주지역  $\text{PM}_{2.5}$  BC 연평균 질량농도와 표준편차를 더한 값인  $4.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과한 날에 대해 고농도 현상으로 정의하였다. 1년의 BC 입자 측정 기간인 349일 중 고농도 경우는 26일로 분류되었으며, 평균 BC 질량

Table 1. Classification of high BC case according to weather conditions.

	High case
BC mass concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	$5.78 \pm 1.00$
Occurrence frequency of yellow sand events (day)	4
Ambient temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	5.5~18.1
Relative humidity (%)	64.0
Visibility (km)	5.6~12.6
Wind speed (m/s)	1.3
Wind direction	Calm, WSW
Weather condition	Mist, Haze

농도는  $5.78 \pm 1.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었다. 상대습도 60~70%에서 고농도 분포를 보였으며 고농도의 최대 풍향은 정온(Calm)과 서남서풍이 각각 19.6%, 17.9%로 높게 나타났다. 고농도는 높은 BC 오염도로 인해 3시간 평균 시정거리 범위가 5.6~12.6 km로 정상시에 비해 평균 38.5% 감소하는 것으로 나타났다. 고농도의 경우 낮은 풍속과 함께 기상정체와 관련된 박무와 연무가 50% 이상 빈번하게 관측되었다. 여러 기상여건을 살펴본 결과 BC 입자의 고농도 현상은 주로 대기정체현상과 관련해서 낮은 풍속과 박무 또는 연무, 안개 등의 일기유형이 두 가지 이상 복합적으로 나타날 때 발생했음을 확인할 수 있었다.

3.3 원시 BC 자료의 광학적 효과 분석 및 보정

Aethalometer는 필터 상에 축적된 입자에 의한 빛의 감쇄정도와 BC 입자 농도사이에 선형적인 관계가 성립됨을 전제로 하고 있으나 석영 필터에 BC 입자가 축적됨에 따라 기존 입자들이 새로 채취된 입자를 가림으로 새로운 입자들이 이전의 입자들과 동일한 빛의 세기에 노출되지 않아 롤 필터(roll tape filter)가 이동하기 전까지의 시료에 대해서 실제 BC 농도보다 낮은 BC 농도를 보일 수 있다. 따라서 필터에 입자의 축적이 증가함에 따라 빛의 감쇄정도와 BC 입자의 질량사이에 선형성이 성립되지 않는다. 본 연구에서는 월별 BC 입자의 광학적 산란효과(비선형성)를 조사하기 위하여 빛의 감쇄(ATN)변화에 따른 BC 평균 질량농도를 살펴보았다.

그림 5는 2008년 광주지역에서 측정한 봄, 여름, 가을, 겨울 ATN 변화에 따른 각각의 ATN 간격에 대한 BC 평균 질량농도 해석을 보여주는 그림이다. 표 2에서 보는 바와 같이 ATN 변화에 따라 월별 차이

는 있지만 확실하게 감소하고 있음을 알 수 있다. 이것은 필터 상에 광학적 “saturation” 효과가 확실하게 존재하여 빛의 감쇄 값과 BC 농도사이에 선형적인 비례관계가 성립되지 않음을 의미한다.

그림 5에서 볼 수 있듯이 aethalometer에 의해 측정된 BC 질량농도의 상대적 감소는 최소 5% (6월)에서 최대 50% (12월) 사이로 확인되었다. 또한 원시 BC 자료와 보상 BC 자료의 편차 [(원시 BC - 보상 BC)/보상BC × 100]는 최소 -1.8% (6월)에서 최대 -23.1% (12월)로 나타났다. Virkkula *et al.* (2007)에 의하면 “k”값은 입자의 광학적 포화정도에 따라 차이를 보이며 본 실험 결과에서도 비슷한 현상이 관측되었다. 여름에 해당하는 6월의 “k”값은 0.0003으

로 입자의 광학적 포화현상이 거의 나타나지 않았다. 반면 겨울철 12월에는 “k”값은 0.0036으로 입자의 광학적 포화정도가 매우 높게 조사되었다.

대체적으로 여름에 필터 spot의 광학적 loading 효과가 작고 겨울에 비교적 큰 것으로 나타났다. 계절에 따른 BC 입자의 광학적 산란효과 차이는 측정지역 주변의 1차 오염원의 배출량, 에어로졸 입자의 화학적 성상, 오염물질의 대기확산 차이 등에 의하여 기인된다고 할 수 있다. 겨울 동안 측정된 BC 에어로졸은 대기 상층부보다 낮은 지표면 온도도 인해 오염물질의 확산이 활발하지 못하므로 인접한 오염원에 의해 배출된 입자이거나 오염원을 통해 배출된 지 얼마 되지 않은 즉, 대기체류시간이 짧은 “fresh”

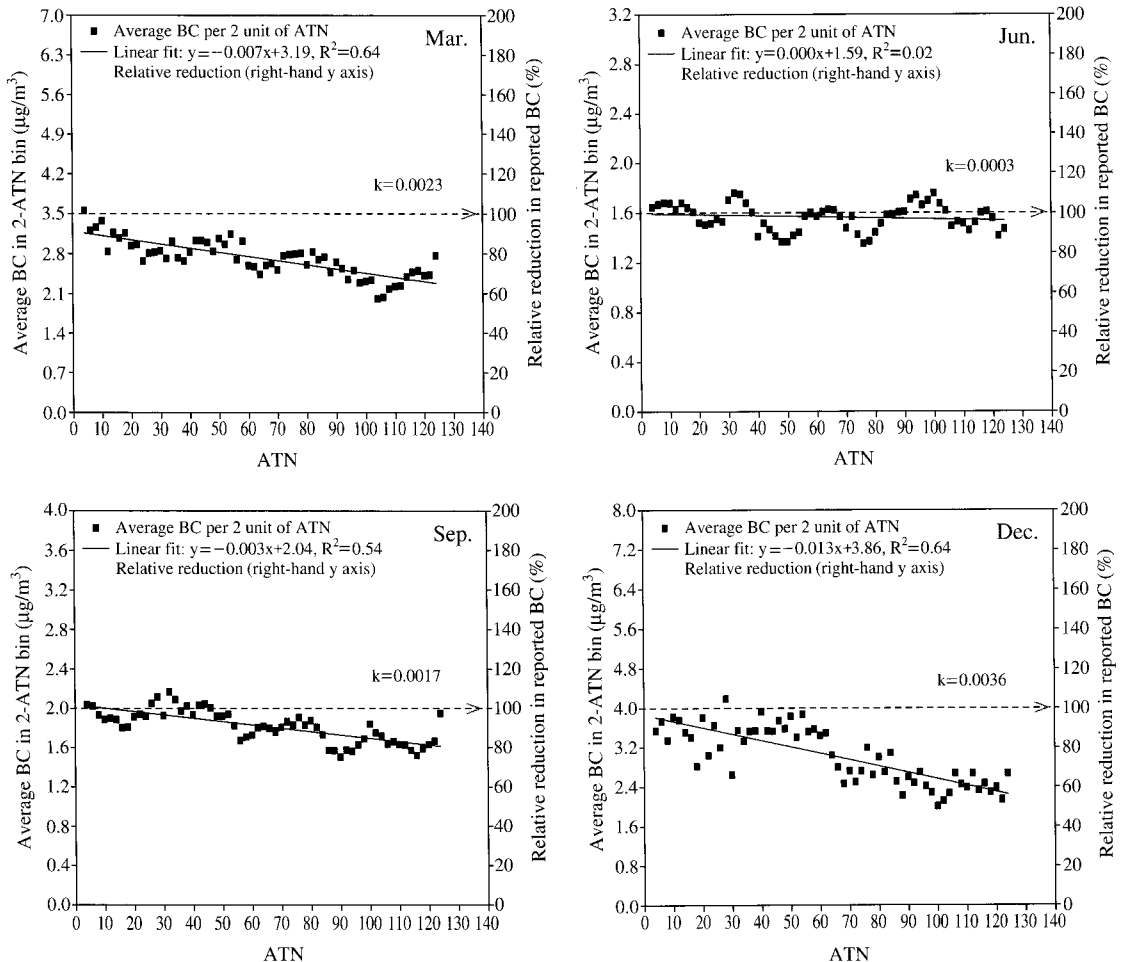
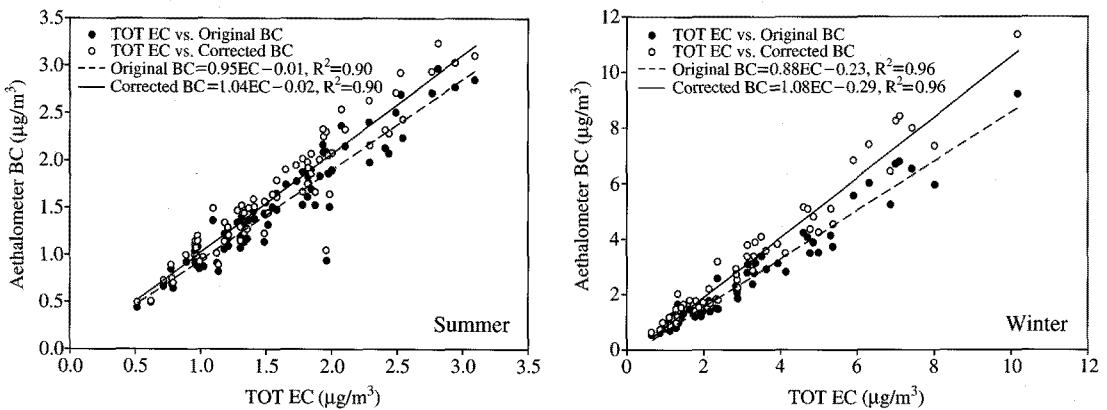


Fig. 5. Seasonal variations of average BC concentration with increasing ATN.



**Table 2. Analysis of monthly actual BC data in Gwangju in 2008.**

Date	Raw BC ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Compensated BC ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Regression analysis	k	Deviation (%)
Jan.	1.9 ± 1.4	2.3 ± 1.7	$y = -0.007x + 2.35$	0.0028	-18.3
Feb.	2.1 ± 2.1	2.4 ± 2.4	$y = -0.005x + 2.45$	0.0022	-14.5
Mar.	2.7 ± 2.2	3.2 ± 2.5	$y = -0.007x + 3.19$	0.0023	-15.4
Apr.	2.3 ± 1.7	2.8 ± 2.0	$y = -0.007x + 2.80$	0.0024	-15.8
May	1.7 ± 1.2	2.2 ± 1.5	$y = -0.006x + 2.16$	0.0028	-19.0
<b>Jun.</b>	<b>1.6 ± 0.9</b>	<b>1.6 ± 0.9</b>	<b><math>y = -0.000x + 1.59</math></b>	<b>0.0003</b>	<b>-1.8</b>
Jul.	1.4 ± 0.9	1.7 ± 1.1	$y = -0.004x + 1.71$	0.0025	-16.5
Aug.	1.5 ± 1.0	1.6 ± 1.0	$y = -0.002x + 1.59$	0.0009	-5.9
Sep.	1.8 ± 1.1	2.0 ± 1.2	$y = -0.003x + 2.04$	0.0017	-10.9
Oct.	3.0 ± 2.4	3.4 ± 2.7	$y = -0.006x + 3.41$	0.0017	-10.9
Nov.	3.3 ± 2.7	3.7 ± 2.9	$y = -0.006x + 3.75$	0.0016	-10.2
<b>Dec.</b>	<b>2.9 ± 3.4</b>	<b>3.8 ± 4.4</b>	<b><math>y = -0.013x + 3.86</math></b>	<b>0.0036</b>	<b>-23.1</b>



**Fig. 6. Relationship between 24-hr integrated EC and corrected BC concentrations.**

한 입자로 판단된다. 반면 여름 동안 측정된 BC에 에어로졸 입자는 상대적으로 높은 혼합고에 의해 대기 중에 오랫동안 체류한 (aged particles) 입자이거나 광학적으로 산란하는 성분(황산염, 질산염, 유기탄소 입자)이 많이 혼합된 입자로 간주할 수 있을 것이다.

### 3.4 보상 BC 농도의 정확도 평가

Virkkula *et al.* (2007)이 제안한 보정 알고리즘을 이용하여 aethalometer BC 원시 자료를 보정한 후 여름 및 겨울(약 5개월)에 24시간 기준으로 필터에 입자를 채취하여 분석한 원소탄소(EC) 농도와 비교를 통하여 BC 농도의 보정결과 신뢰성을 평가하였다. 그림 6은 여름 및 겨울철 24시간 평균 EC 농도와 보정 전·후 BC 농도사이의 상관관계를 보여준다. 그림에서 보여주듯이 여름 및 겨울 모두 aethalometer

BC와 TOT EC는 매우 높은 상관관계(여름  $R^2=0.90$ , 겨울  $R^2=0.96$ )를 가지며, aethalometer BC 원시 자료의 보정 후 기울기가 보정 전보다 높게 조사되었다. 이것은 BC 농도와 EC 농도사이의 일치도가 향상되었음을 의미하며 향후 확실하게 aethalometer BC 원시 자료의 보정이 필요하다는 것을 암시한다. 보정되지 않는 BC 자료는 보정된 BC에 비해 평균 13.5% (여름 8.1%, 겨울 18.6%) 저평가되었다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 2008년 1년 동안 광주광역시의 한 도로변에서 약 200 m 떨어진 한 건물 3층 옥상에서  $\text{PM}_{2.5}$  BC 에어로졸 입자농도를 5분 간격으로 측정하

었다. 측정 자료를 활용하여 광주지역 1년 동안의 BC 입자의 일반적 특성, 기상학적 요인에 의한 영향 및 BC 입자의 광학적 산란현상을 분석하였다.

광주지역 PM<sub>2.5</sub> BC 에어로졸 입자의 연 평균농도는  $2.57 \pm 2.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 다른 도시지역에 비해 비교적 낮은 오염수준을 보였으며, 가을은 여름에 비해 약 2배 높게 관측되었다. BC 입자는 아침 6:00~9:00 사이의 출근시간에 고농도 현상을 보였으며, 자동차 배출가스의 주요 기체상 물질인 CO와 매우 유사한 거동특성을 나타내었다. BC 입자의 대기오염도에 영향을 미치는 기상인자들의 평가결과에 의하면 계절에 따라 풍계의 차이를 보였으며 무풍을 제외하고는 서풍 구간에서 BC 입자의 농도는  $2.5 \sim 2.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 높은 농도 경향을 나타냈으며, 낮은 풍속에서 높은 BC 농도분포를 확인할 수 있었다. 대기 정체현상과 관련된 연무, 안개, 박무 현상이 대기 중 BC 입자의 농도를 증가시키는데 직접적으로 기여하고 있었으며, 비나 눈과 같은 강수현상은 대기 중 BC 입자의 농도를 감소시키는 데 역할을 하는 것으로 조사되었다.

월별 BC 입자의 광학적 산란효과를 분석한 결과에 의하면 광학적 loading 효과를 설명하는 “k”값은 월별기준으로 0.0003~0.0036으로 분포하고 있으며 12월에 가장 높은 “k”값(0.0036)이 조사되었다. 대체적으로 여름에 비해 겨울에 BC 입자의 광학적 산란현상이 크게 나타나고 있는데 이것은 겨울철 aethalometer 측정 BC 값들이 실제 BC 농도 값에 비해 상당히 저평가될 수 있음을 의미한다. 1년 기준으로 aethalometer 원시 BC 자료는 석영필터의 spot loading 효과에 의하여 실제 농도보다 평균 13.5% 저평가되었다.

## 감사의 글

본 연구는 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R01-2008-000-10775-0).

## 참고 문헌

- 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.
- Arnott, W., K. Hamasha, H. Moosmuller, P.J. Sheridan, and J.A. 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 Technology*, 39, 17-29.
- 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.
- Horvath, H. (1993) Atmospheric light absorption: a review, *Atmospheric Environment*, 27A, 293-317.
- Hwang, Y.J., S.J. Lee, D.H. Kang, T.J. Son, T.K. Kwon, J.Y. Han, H.U. Park, and S.H. Jang (2008) The analysis of PM<sub>10</sub> data and the evaluation of influences by meteorological factors on PM<sub>10</sub> in Deagu during 2004-2007, *Proceeding of the 46th Meeting of KOSAE*, Sejong University, 521-523.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2001) *Climate Change 1995: The Science Climate Change*, Cambridge University Press, New York.
- 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.
- Lee, H.W., Y.K. Kim, N.S. Jang, and Y.H. Lee (1999) The effect of meteorological factors on variation and temporal and spatial characteristics of NO<sub>2</sub> concentration in pusan area, *Journal of Korean Environmental Sciences Society*, 8(4), 465-471.
- 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)
- Park, S.S., A.D.A. Hansen, and S.Y. Cho (2010) Measurement of real time black carbon for investigating spot loading effects of Aethalometer data, Atmospheric Environment, 44, 1449-1455.
- Shin, M.K., C.D. Lee, H.S. Ha, C.S. Choc, and Y.H. Kim (2007) The influence of meteorological factors on  $PM_{10}$  concentration in Incheon, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 23(3), 322-331. (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, 1445-1463.