

교외지역 블랙카본 농도 측정

이기웅* · 한승철* · 이정훈**

* 한국기술교육대학교 기계공학부

Measurement of Black Carbon Concentration in Rural Area

Ki Woong Lee*, Seung Cheol Han* and Jeonghoon Lee**

* School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education

(Received March 21, 2013 ; Revised October 25, 2013 ; Accepted November 1, 2013)

Key Words: Black Carbon(블랙카본), MAAP(다중 각도 흡수 광도계), PM10(입자상 물질) Atmospheric Aerosol(대기 에어로졸)

초록: 본 연구에서는 교외지역 대기 에어로졸의 특성을 파악하기 위하여 지구온난화와 밀접한 관련이 있다고 알려진 블랙카본 농도를 측정하였고, 그 결과들을 기상 요소들과 비교하였다. 필터 기반 측정 장치인 MAAP (Multi Angle Absorption Photometer)를 이용하여 측정된 블랙카본 농도와 황산농도, 습도, 온도 및 풍속을 비교하였다. 블랙카본 농도는 4~5월에 높으며 6~9월에 낮은 경향을 보였다. 블랙카본 농도는 PM10 (직경 10 μ m 이하 입자상 물질) 농도 및 습도와는 비례관계를 보였으며 온도와는 반비례 관계를 보였다. 또한 디젤엔진에서 발생한 블랙카본의 직경 및 광흡수 계수 및 수농도를 측정하여 흡수 단면적을 도출 하였고 이를 통하여 교외 지역 블랙카본의 수준을 평가 할 수 있는 방법을 소개하였다.

Abstract: We measured black carbon concentration in rural area to understand the characteristic of atmospheric aerosol by comparing the black carbon concentration and meteorological factors such as PM10 concentration, relative humidity, temperature and wind velocity. A MAAP (Multi Angle Absorption Photometer) which is one of filter based equipments was used to measure black carbon concentration. Black carbon concentration was measured to be high from April to May and low from June to September. Black carbon concentration was proportional to PM10 concentration. Black carbon concentration was correlated to relative humidity. Black carbon concentration was inversely proportional to wind velocity and temperature. Finally, we suggest that the volume fraction of black carbon in the atmosphere can be estimated from the size, number concentration and absorption coefficient measured using the MAAP.

- 기호설명 -

Q_{abs} : 광흡수 계수
 σ_{abs} : 흡수 단면적
 N : 수농도
 V : 체적
 d_p : 입자의 직경

1. 서론

블랙카본 에어로졸이 지구온난화에 영향을 미

친다는 주장이 처음 제기된 이후로 지금까지 매우 다양한 연구들이 행해지고 있다. 이전까지의 연구에서는 지구 온난화에 영향을 미치는 온실가스와 태양광 산란으로 인한 지구 냉각효과에 영향을 미치는 황산염 에어로졸이 존재한다고만 고려하였다. 하지만 바이오매스나 화석연료 등의 불완전 연소로 인한 유색 매연 입자들은 대기를 냉각시키는 것이 아니라 오히려 대기를 온난화시킨다고 알려져 블랙카본의 중요성이 강조되었다.⁽¹⁾ 최근에는 블랙카본이 CO₂에 이어 두 번째로 지구온난화에 영향을 주는 물질이라는 주장이 제기되어 관련된 연구가 계속 진행될 것으로 판단된다.⁽²⁾ 블랙카본은 기체가 아닌 고체로서 온

† Corresponding Author, jlee@koreatech.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

실가스와는 달리 태양광을 직접 흡수하는 방식으로 대기를 가열하며, 대기 중에 짧은 기간 동안 존재하고 그 농도의 변화가 산업화 된 도시에서부터 멀리 떨어진 교외지역까지 매우 다양하기에 블랙카본에 의한 기후변화는 지역적이라는 것이었다.⁽³⁾ 이러한 특징을 갖고 있기에 당장이라도 배출량을 규제해야 할 것 같지만 사실 블랙카본에 의한 태양복사 효과는 정확하게 측정하기 어려운 측면이 있다. 이 때문에 배출량 규제 여부는 여전히 논란이 되고 있다.

에어로졸의 광흡수 측정 장치에는 필터 기반 측정 방법(Filter based measurements)과 광음향분광법(Photoacoustic spectrometer)이 있다. 필터 기반 측정방법은 에어로졸을 필터로 직접 포집하여 흡수계수를 측정하는 방법인데 에어로졸이 필터의 재료와 접촉하거나 서로 접촉할 때 광학적 특성이 변하는 단점이 있다. 광음향분광법은 에어로졸이 빛을 흡수할 때 발생하는 음파를 분석함으로써 에어로졸의 흡수를 측정하는 기법이다.⁽⁴⁾

필터 기반 측정 장치로는 MAAP(Multi Angle Absorption Photometer), PSAP(Particle Soot Absorption Photometer), Aethalometer가 있다. MAAP는 투과 및 산란 된 빛을 검출하여 흡수계수를 도출함으로써 산란의 영향을 최소화 하고 보정이 필요 없다.⁽⁵⁾ PSAP는 투과된 빛만을 검출하여 흡수계수를 도출하기 때문에 산란의 영향을 받는다.⁽⁶⁾ Aethalometer는 산란광만을 검출하여 흡수계수를 도출하는데 산란의 영향은 개선되었으나 필터 면적 및 유량에 따른 보정이 요구된다.⁽⁷⁾ 또한 MAAP는 670 nm 파장의 광원을, PSAP는 467 nm, 530 nm, 660 nm 파장의 광원을, Aethalometer는 370 nm, 470 nm, 520 nm, 590 nm, 660 nm, 880 nm, 950 nm 의 7가지 파장의 광원을 사용하고 있다.

블랙카본의 농도에 영향을 주는 요소들에 대한 선행연구 역시 활발히 이루어졌다. 산업화를 기준으로 이전에는 대규모의 산불로 인한 침엽수의 연소나 화산활동 등이, 산업혁명 이후로는 비해양염(Non-Sea-Salt Sulfur) 입자 등의 배출이 블랙카본 농도의 증가에 원인이 되었다.⁽⁸⁾

본 연구에서는 충남 천안시 병천면 주변의 대기 에어로졸의 특성을 파악하기 위하여 2012년 4월~9월의 6개월 동안의 블랙카본 농도를 측정하였으며 교외지역의 블랙카본의 수준을 평가할 수

있는 방법을 제안하고자 한다.

2. 실험방법 및 장치

MAAP에 장착된 검출기의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. MAAP는 광흡수 측정 장치 중 하나로써 대기 중의 에어로졸을 포집하여 필터에 부착시키고 에어로졸이 부착되어있는 필터에 레이저를 입사시킨 후 필터에 의한 광소멸로부터 블랙카본의 광흡수 계수를 측정하는 장치이다. 기존의 광흡수 측정 장치는 레이저를 입사시킨 반대편에 검출기가 있어서 빛의 산란효과에 대해 무시한 것에 반하여 산란되는 방향으로 2개의 각도에 대한 검출기를 추가하여 산란광을 보정함으로써 산란에 의한 영향을 최소화 하였다.⁽⁵⁾ 본 연구에는 Thermo scientific 사의 5012 제품을 사용하였다.

에어로졸의 수농도 측정을 위하여 응축핵 계수기(Condensation particle counter, TSI 3775)를 사용하였다. 에어로졸의 흡수계수와 수농도로부터 흡수 단면적을 결정하였다. Differential Mobility Analyzer(동성산업)를 이용하여 디젤입자의 크기 분포를 측정하였다.

디젤엔진에서 발생하는 블랙카본 농도 측정을 위해 최대출력 10HP, 정격 회전수 1800rpm인 ETK Power Machinery사의 186FS 경운기 디젤엔진을 사용하였다.

MAAP 장치를 이용하여 병천면 인근의 블랙카본 농도를 측정하였다. MAAP는 1분 간격으로 24시간 연속 측정되며 이 지역의 지역적 특성으로 인하여 주변공장의 영향을 무시할 수 있는 낮

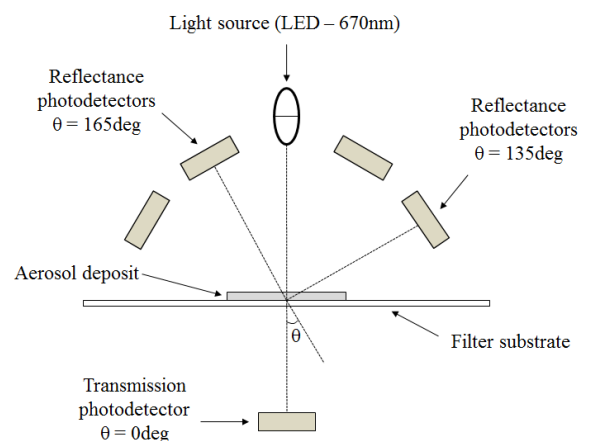


Fig. 1 Schematic diagram of the MAAP detector

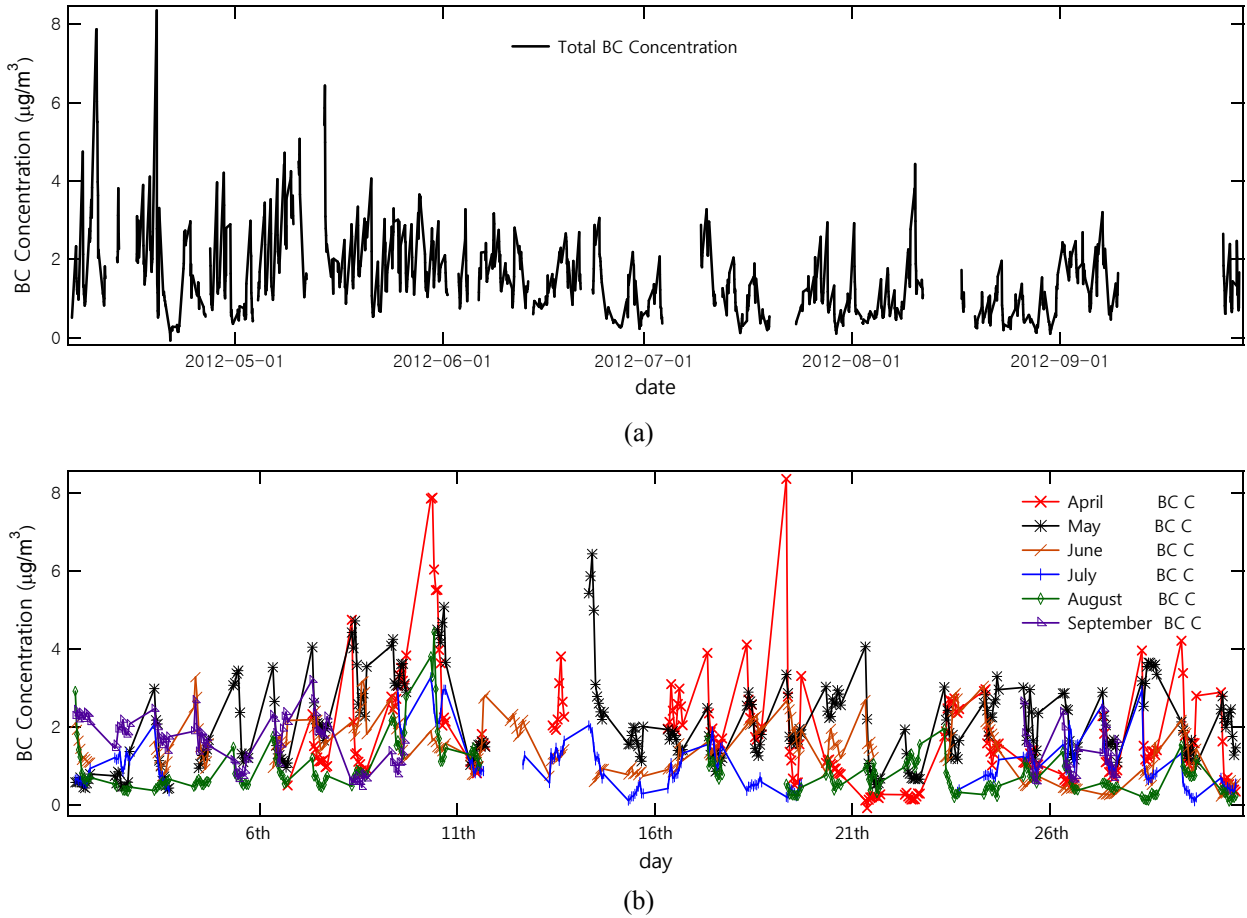


Fig. 2 Variation of black carbon concentration ; (a) from April to September, 2012. Consecutive variation (b) variation of each month

동안의 데이터가 좀 더 유의미하기에 인간 활동이 많은 시간대인 08시~18시 사이의 데이터들을 본 연구에 이용하였다.

또한 본 연구에는 기상청 데이터가 이용되었다. 블랙카본 농도에 영향을 줄 수 있는 객관적인 요소들로써 온도, 풍속, 습도 등이 활용되었으며 블랙카본 농도와 황사와의 관계를 파악하기 위하여 PM10(대기 먼지입자 중 크기가 $10\mu\text{m}$ 이하인 미세분진) 측정 자료가 활용되었다.

3. 실험 결과 및 토의

3.1 전체/월별/주별 블랙카본 농도 측정 결과

2012년 4월~9월 동안 1분 간격으로 측정된 MAAP 데이터의 분석을 위하여 08시~18시 총 하루 10시간 동안 비교 추출하고 그 데이터를 1시간 간격으로 평균하여 Fig. 2에 나타내었다.

전체 블랙카본 농도 측정 결과는 Fig. 2(a)와 같

다. 전체적인 경향을 관찰했을 때 4월~5월이 농도의 변동이 크고 평균적으로 높은 블랙카본 농도를 보이고 있으며 6월~9월은 농도의 변동도 적은 편이며 평균 블랙카본 농도도 낮은 편이다. 더 자세한 분석을 위하여 각 월별 1일~30일까지의 블랙카본 농도를 하나의 그림으로 나타내었다. Fig. 2(b)에 제시한 바와 같이 4, 5월을 제외하고는 그다지 큰 폭의 변화는 없다. 6월~9월에 비해 4월~5월의 블랙카본 농도가 평균적으로 더 높게 나타나는데 이는 봄의 꽃샘추위로 인하여 난방을 했을 가능성을 고려하면 교외지역의 난방장치로부터의 배출물로 인한 블랙카본 농도증가의 영향이라 할 수 있다. 6월~9월의 블랙카본 농도는 평균 $1.15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 인데, 이는 여름철 강 수량으로 인하여 전체적으로 입자의 농도 자체가 낮아졌기 때문에 낮은 농도로 관측되었다고 판단된다. 4월~5월의 평균 강수량은 4mm이고 6월~9월의 평균 강수량은 24mm이다.

주별 블랙카본 농도 측정 결과는 Fig. 3 과 같

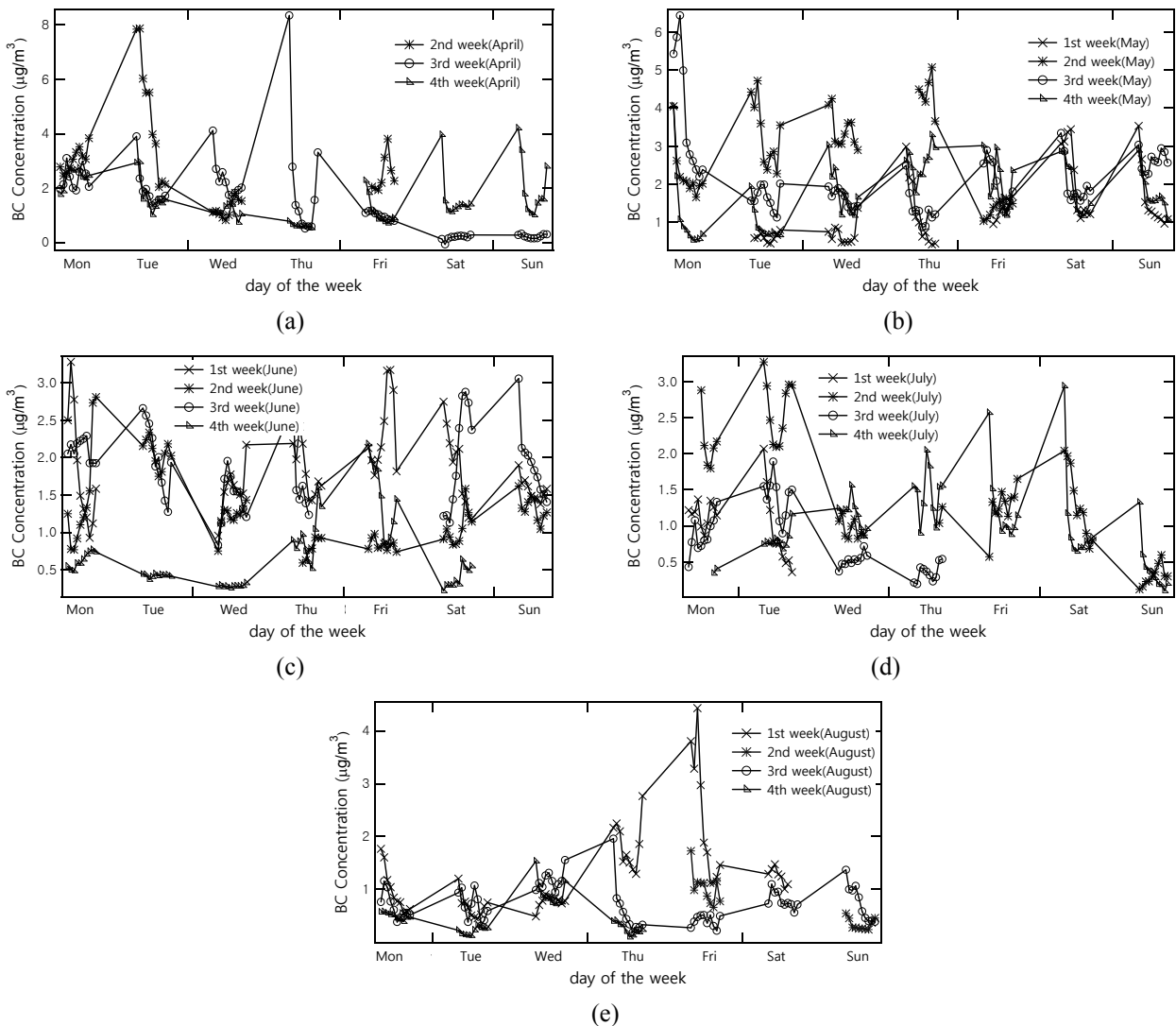


Fig. 3 Variation of black carbon concentration ; (a) April, (b) May, (c) June, (d) July and (e) August

다. 4월~8월의 요일별 블랙카본 농도를 비교한 결과 월요일에 $1.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높게 나타났고 일요일에 $1.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 낮게 나타났다. 월요일에 블랙카본의 농도가 가장 높게 나타난 것은 교통량 증가 때문으로 판단된다. Fig. 3(d),(e)에 나타난 바와 같이 7월 마지막 주와 8월 첫째 주에 전체적인 7월~8월의 블랙카본 농도 변화에 비하여 큰 차이를 보이고 있는데, 이는 성수기 휴가철로 인한 교통량 증가를 그 이유로 예상할 수 있다.

3.2 PM10 농도와 블랙카본 농도와의 관계

일별 블랙카본 농도 측정 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 일반적인 농도 분포를 보이고 있는 6

월 10일과 극단적인 농도 분포를 보이는 4월 10일의 모습을 나타내었다. 6월 10일의 일반적인 농도 분포 경향을 살펴보면 출근시간인 8시경에 블랙카본의 농도가 가장 높고, 점점 감소하다가 퇴근시간인 6시경에 다시 증가하는 모습을 보인다. 4월 10일의 블랙카본 농도 분포 경향 역시 아침 8시경에 높았다가 점점 감소하고 6시경에 다시 증가하는 모습을 보이나 그 변화의 폭이 매우 큰 모습을 관찰할 수 있다. 이에 블랙카본의 농도변화에 영향을 줄 수 있는 요인인 PM10의 농도를 변인으로 하여 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)에 나타나 있듯이 PM10의 농도가 높으면 블랙카본의 농도도 높아지는 것을 관찰할 수 있었다. 이를 좀 더 자세히 분석하기 위하여 5월 5

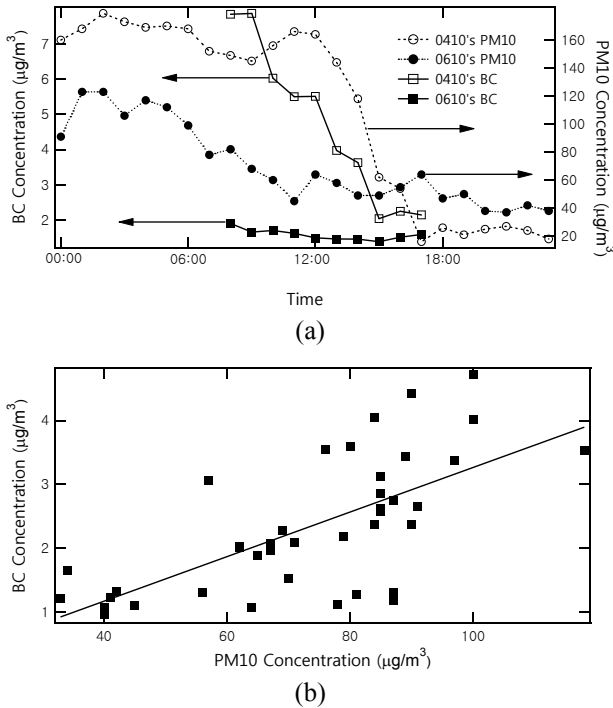


Fig. 4 Comparison of black carbon vs PM10 ; (a) diurnal variation of black carbon concentration and PM10 concentration, (b) relation between PM10 concentration and black carbon concentration

일~8일 4일 동안 PM10의 농도에 따른 블랙카본의 농도를 Fig. 4(b)에 나타내었다. 선형회귀분석 (Linear curve fitting) 결과, 블랙카본과 PM10의 상관관계수는 0.68로 나타내 대략적인 비례관계가 성립하는 것으로 판단된다.

3.3 기상요소와 블랙카본 농도와의 관계

블랙카본 농도에 영향을 줄 수 있는 또 다른 요인으로 기상요소를 고려하였다. 기상요소 중 상대습도, 온도, 풍속과 블랙카본 농도의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 그 중에서 상대습도와 온도는 7월 27일~29일의 3일간의 데이터를, 풍속은 8월 27일~28일의 데이터를 사용하여 각각의 요소 인자와 블랙카본의 농도와의 관계를 선형회귀분석하였다.

우선 상대습도와의 관계를 관찰하면 Fig. 5(a)에 나타나 있듯이 전체적으로 상대습도가 높을 때 블랙카본의 농도가 높으며 상대습도가 낮을 때 블랙카본의 농도가 낮은 경향을 나타내었다. 블랙카본과 상대습도의 상관관계를 파악하기 위하여 상대습도에 따른 블랙카본의 농도를 선형회

귀분석 하였으며 상관관계수는 0.60이 도출되었다. 이를 통하여 상대습도와 블랙카본 농도와의 관계는 비례하다고 판단 할 수 있다. 그런데 MAAP과 같은 필터기반 광흡수 측정 장치의 중요한 특성 중 하나는 습도가 높을 때 블랙카본의 농도가 과도하게 높게 측정된다는 것이다.^(4,9) 이러한 현상은 필터 기반 광흡수 측정 장치에 사용되는 필터가 섬유 필터이기 때문에 발생한다. 섬유 필터는 상대 습도가 높을 때 다량의 수분을 흡수하는데, 수분에 의해 입사광이 소멸되어 블랙카본 농도가 높게 측정되는 것이다. 따라서 본 연구에서도 상대습도가 높을 때 광흡수 계수가 인위적으로 높게 측정된 것으로 판단된다.

다음으로 온도와와의 관계를 관찰하면 Fig. 5(b)에 나타나 있듯이 온도가 높을 때 블랙카본의 농도는 낮으며, 온도가 낮을 때 블랙카본의 농도가 높은 경향을 확인할 수 있다. 상대습도와 마찬가지로 온도와 블랙카본의 농도를 선형회귀분석 하였으며 상관관계수는 0.76이 도출되었다. 이를 통하여 온도와 블랙카본 농도와의 반비례관계가 성립한다는 사실을 확인하였다. 이와 같은 결과의 원인은 대기 온도의 증가로 상대습도가 감소하여 필터에 유입되는 수분이 줄어들기 때문이라고 판단된다. 필터가 흡수하는 수분이 줄어들면 앞에서 설명한대로 투과광의 강도가 증가하고 최종적으로 산출되는 블랙카본의 농도 값도 낮게 측정된다.^(4,9) 이는 모든 필터기반 측정기법의 최대 단점이기도 하다.

또한 같은 시기의 온도와 상대습도는 Fig. 5(c)에 나타나 있듯이 반비례 관계가 성립하는데, 이 사실과 본문에서 언급한 상대습도가 낮은 환경에서는 블랙카본농도가 낮다는 사실을 통하여 온도가 높아서 상대습도가 낮은 건조한 환경에서는 블랙카본농도가 낮다고 판단된다.

풍속과의 관계를 관찰하였다. 실제 8월 28일 경에는 태풍 ‘볼라벤’이 실험결과에 큰 영향을 미쳤으며 정확한 고찰을 위하여 풍속에 한해서는 8월 27일~28일 2일 동안의 48시간의 데이터를 이용하여 자세히 분석 하였다. Fig. 5(d)에서 확인할 수 있듯이 풍속이 높을 때 블랙카본의 농도가 전반적으로 낮은 경향을 관찰할 수 있다. 선형회귀분석한 결과 상관관계수는 0.62가 도출되었으며 풍속과 블랙카본 농도와의 관계는 반비례관계가 성립한다는 사실을 확인할 수 있었다. 풍속이

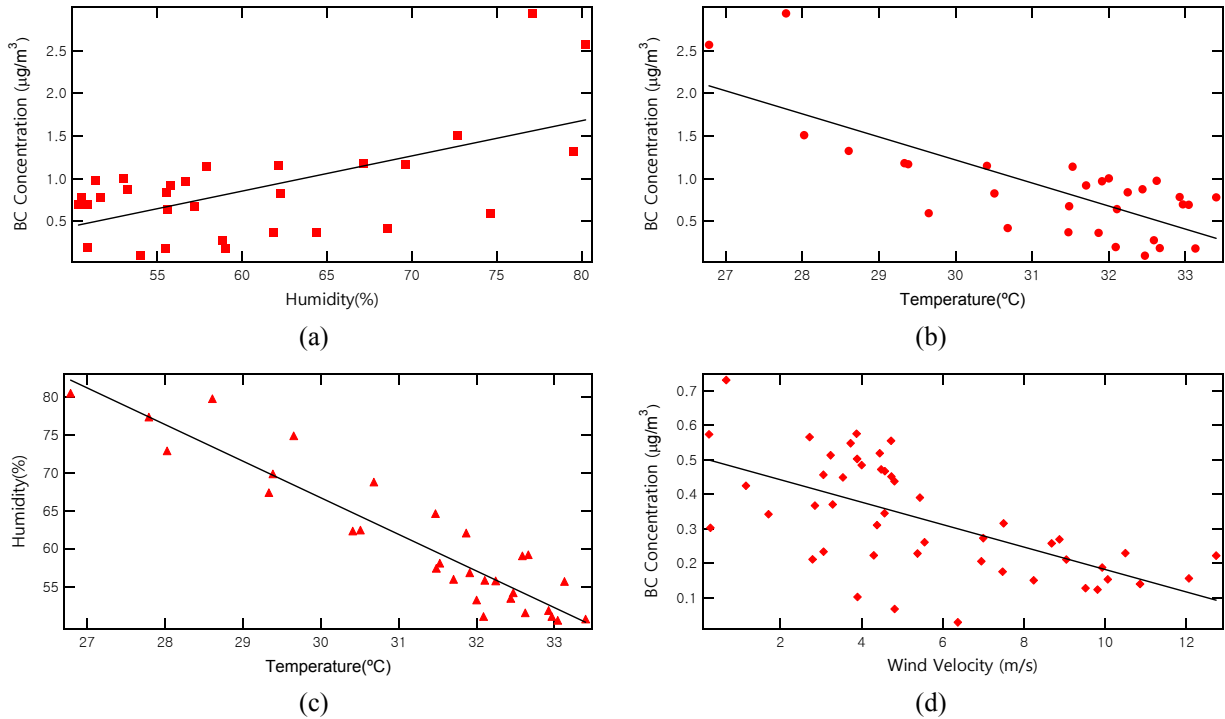


Fig. 5 Comparison of black carbon and meteorological factors ; (a) relation between relative humidity and black carbon concentration, (b) relation between temperature and black carbon concentration, (c) relation between relative humidity and temperature, (d) relation between wind velocity and black carbon concentration

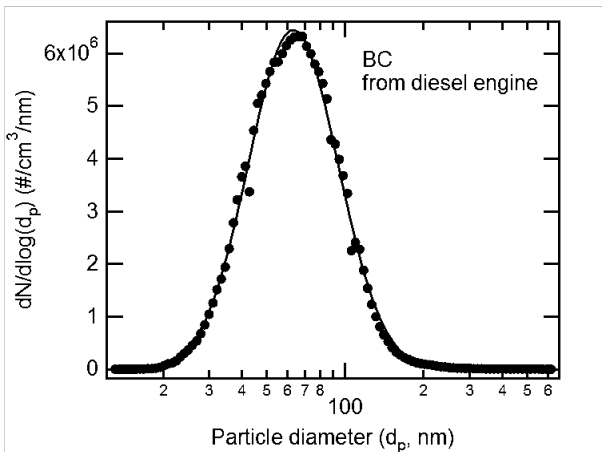


Fig. 6 Size distribution of black carbon generated from diesel engine

증가하면 이로 인하여 블랙카본과 공기의 혼합이 활발해 지고 블랙카본 이외의 입자들도 혼합되어 블랙카본의 농도가 낮아지게 되는 것이라고 판단 된다.

3.4 디젤엔진 블랙카본의 광흡수 계수

경운기 디젤엔진에서 발생하는 배기 배출물의 입자크기 분포도를 Fig. 6에 나타내었다. 공회전

운전 시 배출된 블랙카본의 평균 직경은 66.1 nm로 나타났다. 에어로졸의 광흡수 계수는 에어로졸의 흡수 단면적과 수 농도의 곱으로 표현된다.

$$Q_{abs} = \sigma_{abs}N \quad (1)$$

여기서 Q_{abs} 는 광흡수 계수, σ_{abs} 는 흡수 단면적이고 N 은 수농도이다. 66.1 nm 크기의 디젤 입자에 대하여 여러 수농도에 따른 광흡수 계수를 측정하였고, 식 (1)을 이용하여 선형회귀분석을 통해 흡수 단면적을 도출하였다. 디젤엔진에 의해 발생된 66.1 nm 크기의 블랙카본 입자에 대한 흡수 단면적은 $1.13 \times 10^{-14} \text{m}^2/\text{part}$ 로 산출되었다. 여기서 만약 병천면의 대기 전체가 66.1 nm의 블랙카본 입자로만 구성되어 있다고 가정한다면, 대기 입자의 흡수 단면적은 디젤 입자에 의한 흡수 단면적인 $1.13 \times 10^{-14} \text{m}^2/\text{part}$ 라고 할 수 있다. Q_{abs} 는 측정값이고 σ_{abs} 는 기지의 값이므로 식 (1)에 의해 대기 입자의 수 농도 N 을 구할 수 있다. 이렇게 도출된 수농도는 위의 가정에 의해 병천 지역 대기 중에 존재하는 디젤 입자의 수 농도라고 할 수 있다. 이러한 과정을 통해 도출된 수농도는 병천 지역의 블랙카본의 수준을 나타내는 척

Table 1 Number concentration, standard deviation and volume fraction from particular day

	N [part./cc]	standard deviation	volume fraction
Day	2732	2.2	6.08×10^{-13}
Night	4018	1.0	4.13×10^{-13}

도로 이용될 수 있다. 그리고 공기 중 디젤입자의 체적 분율(volume fraction)은 공기의 단위체적당 디젤 입자가 차지하고 있는 체적의 비율로서 본 연구에서 측정된 디젤입자의 부피와 수 농도로부터 도출할 수 있다.

$$\text{volume fraction} = V \times N \quad (2)$$

여기서 V 는 입자의 부피이고, N 은 수 농도이다. 만약 디젤 입자가 구형입자라 가정하면, 디젤 입자의 부피는 다음 식으로 나타낸다.

$$V = \frac{\pi}{6} d_p^3 \quad (3)$$

여기서 d_p 는 입자의 직경으로 본 연구에서는 디젤입자의 직경인 66.1 nm를 의미한다. 이렇게 도출된 디젤 입자의 체적 V 와 식 (1)에 의해 도출된 수농도 N 을 이용하여 디젤 입자의 체적 분율을 구하였다.

2012년 4월 9일~4월 10일에서 18시~08시 데이터를 밤 데이터로, 08시~18시 데이터를 낮 데이터로 하여 각 데이터를 평균을 낸 뒤, 각각의 수 농도와 체적 분율을 도출하여 Table 1에 나타내었다. Table 1에 나타나 있듯이 낮과 밤의 표준편차가 다른 이유는 인간 활동이 활발한 낮에 출근시간 대의 차량 증가 등 더 많은 변수가 작용하여 밤 시간대에 비해 변동에 영향을 준 것으로 판단된다. 또한 낮 시간대에 비해 오히려 밤 시간대에 수 농도 및 체적 분율이 높게 나타는데 이는 병천면 근처에 브레이크 패드 및 라이닝 등 마찰재를 전문으로 생산하는 공장이 위치함으로 인하여 그곳에서 발생하는 공장연기가 실험에 영향을 줄 수 있다는 지역적 특색에서 기인한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 교외지역의 대기 에어로졸의 특

성을 파악하기 위해 블랙카본 농도를 측정하였다. 측정결과를 기상청 데이터와도 함께 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

전체적으로는 봄철에 블랙카본 농도가 높으며 여름철에 블랙카본 농도가 낮다. 월별로는 4, 5월이 높으며 6~9월이 낮다. 주별로는 성수기철인 7월 마지막 주와 8월 첫째 주에 블랙카본 농도가 높으며 전반적으로 교통량이 증가하는 월요일과 수요일에 그 농도가 높다.

이러한 블랙카본 농도의 변화에 영향을 주는 요소로는 황사요소와 온도, 상대습도, 풍속 등이 있으며 블랙카본 농도와 황사요소인 PM10 농도, 상대습도와는 비례관계가, 온도와 풍속과는 반비례 관계가 성립함을 도출하였다.

또한 디젤엔진 실험을 통하여 디젤 입자의 직경과 흡수단면적을 도출하였고, 가정을 통하여 체적 분율도 도출할 수 있었다.

후 기

이 논문은 환경부 환경융합신기술개발사업으로 지원받은 연구임(2013001650004). 본 연구는 한국기술교육대학교 교육연구진흥비 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

- (1) Andreae, M. O., 2001, "The Dark Side of Aerosols," *Nature*, Vol. 409, pp. 671~672.
- (2) Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., DeAngelo, B. J., Flanner, M. G., Ghan, S., Kärcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P. K., Sarofim, M. C., Schultz, M. G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., Bellouin, N., Guttikunda, S. K., Hopke, P. K., Jacobson, M. Z., Kaiser, J. W., Klimont, Z., Lohmann, U., Schwarz, J. P., Shindell, D., Storelvmo, T., Warren, S. G. and Zender, C. S., 2013, "Bounding the Role of Black Carbon in the Climate System: A Scientific Assessment," *J. Geophys. Res.*, doi:10.1002/jgrd.50171
- (3) Chameides, W. L. and Bergin, M., 2002, "Soot Takes Center Stage," *Science*, Vol. 297, pp. 2214~2215.
- (4) Arnott, W. P., Moosmüller, H., Sheridan, P. J.,

- Ogren, J. A., Raspet, R., Slaton, W. V., Hand, J. L., Kreidenweis, S. M. and Collett, J. L. Jr., 2003, "Photoacoustic and Filter-based Ambient Aerosol Light Absorption Measurements: Instrument Comparisons and the Role of Relative Humidity," *J. Geophys. Res.*, Vol. 108, No. D1, 4034, pp. 15-1~15-11.
- (5) Petzold, A. and Schönlinner, M., 2004, "Multi-angle Absorption Photometry—A New Method for the Measurement of Aerosol Light Absorption and Atmospheric Black Carbon," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 35, pp. 421~441.
- (6) Bond, T. C., Anderson, T. L. and Campbell, D., 1999, "Calibration and Intercomparison of Filter-Based Measurements of Visible Light Absorption by Aerosols," *Aerosol Sci. Tech.*, Vol. 30, pp. 582~600.
- (7) Hansen, A. D. A., Rosen, H. and Novakov, T., 1984, "The Aethalometer – An Instrument for the Real-time Measurement of Optical Absorption by Aerosol Particles," *Sci. Total Environ.*, Vol. 36, pp. 191~196.
- (8) McConnell, J. R., Edwards, R., Kok, G. L., Flanner, M. G., Zender, C. S., Saltzman, E. S., Banta, J. R., Pasteris, D. R., Carter, M. M. and Kahl, J. D. W., 2007, "20th-Century Industrial Black Carbon Emissions Altered Arctic Climate Forcing," *Science*, Vol. 317, pp. 1381~1384.
- (9) Nessler, R., Weingartner, E., Baltensperger U., 2005, "Effect of Humidity on Aerosol Light Absorption and its Implications for Extinction and Single Scattering Albedo Illustrated for a Site in the Lower Free Troposphere" *J. Aerosol Sci.*, Vol. 36, pp. 958~972