

ISSN 1738-8716(Print)

ISSN 2287-8130(Online)

Particle and Aerosol Research

Part. Aerosol Res. Vol. 13, No. 2: June 2017 pp. 97-104

<http://dx.doi.org/10.11629/jpaar.2017.6.30.097>

충청지역 블랙카본 농도 측정 및 PM₁₀, PM_{2.5} 농도와의 비교 분석 연구

차영범¹⁾ · 이시형¹⁾ · 이정훈^{1)*}

한국기술교육대학교 기계공학부¹⁾

(2017년 5월 18일 투고, 2017년 6월 13일 수정, 2017년 6월 13일 게재확정)

Measurement of Black Carbon Concentration and Comparison with PM₁₀ and PM_{2.5} Concentrations monitored at the Chungcheong Province in Korea.

Youngbum Cha¹⁾ · Shihyoung Lee¹⁾ · Jeonghoon Lee^{1)*}

1)School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education

(Received 18 May 2017; Revised 13 June 2017; Accepted 13 June 2017)

요 약

In order to characterize atmospheric aerosols in Chungcheong area, black carbon concentration, which is known to be closely related to global warming, was measured and compared with PM₁₀, PM_{2.5} concentrations and various meteorological parameters such as wind velocity and wind direction. Multi Angle Absorption Photometer (MAAP), a filter-based equipment, was used for the black carbon measurement, and the PM₁₀, PM_{2.5} concentrations, wind velocity and wind direction were provided by the local monitoring stations. Black carbon concentration was monitored to be high in spring and winter but low in fall. PM₁₀ concentration was observed to be high when westerly wind was strong.

Keywords: Black Carbon(블랙카본), MAAP(다중 각도 흡수 광도계), PM₁₀(미세먼지), PM_{2.5}(초미세먼지)

* Corresponding author.

Tel : +82-41-560-1151

E-mail : jlee@koreatech.ac.kr

1. 서론

원소탄소(Elemental carbon, EC)는 탄소성물질을 화학적으로 정의하는 개념인데 반해 블랙카본(Black carbon, BC)은 탄소성물질을 광학적으로 정의하는 개념이다. 블랙카본은 대기 에어로졸의 광흡수를 증가시키기 때문에 기후변화연구의 중요한 인자라고 알려져 있다(McMurry et al., 2004). 즉, 블랙카본은 지구온난화에 영향을 미치기 때문에 대기오염물질 중 가장 위험한 물질 중 하나라고 할 수 있다. 지구 온난화는 주로 온실가스에 의해서만 기인하는 것으로 알려져 왔으나, 화석연료 등의 불완전 연소로 인해 발생된 유색 매연 입자인 블랙카본에 의해 지구 대기의 온난화가 유발될 수도 있다는 연구가 진행되고 있다(Andreae, 2001). 블랙카본은 기체가 아닌 고체로서 온실가스와는 달리 태양광을 직접 흡수하는 방식으로 대기를 가열한다. 또한 대기 중에 짧은 기간 동안 존재하고 그 농도의 변화가 산업화 된 도시에서부터 멀리 떨어진 교외지역까지 매우 다양하기에 블랙카본에 의한 기후변화는 지역적이다(Chameides & Bergin, 2002). 블랙카본의 농도에 영향을 주는 요소들에 대한 선행연구도 활발히 이루어졌다. 산업화 이전에는 대규모의 산불로 인한 침엽수의 연소나 화산활동 등이 블랙카본 농도를 증가시키는 원인이었지만, 산업혁명 이후로는 석탄 및 석유등의 탄화수소계열 연료들의 직접적인 연소생성물로서의 입자 배출이 블랙카본 농도의 증가의 원인이 되었다(McConnell et al., 2007). 특히, 미세입자는 연료의 연소, 자동차 배출가스 및 화학물질의 생성과정에서 인위적인 발생원에 의한 것과 더불어 SO₂나 휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)등이 응축과정을 거쳐 입자상 물질로 2차 분진으로 생성된다(Kim, 1997). 따라서, 최근에는 2차 생성 에어로졸에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 즉, 자동차, 공장 등로부터의 직접적인 1차 생성 뿐만 아니라 대기중에서 간접적으로 2차 생성되고 있는 미세먼지에 대해 관심이 집중되고 있다.

이러한 대기 에어로졸의 특성중 1차 생성물의 대표적인 물질인 블랙카본의 지역적 배출을 파악하기 위하여 본 연구에서는 충청지역일대에서 2015년 9월~2016년 4월의 8개월 동안의 블랙카본 농도를 측정하였다. 또한 한국 환경공단과 기상청에서 측정한

미세먼지와 풍향, 풍속 데이터를 통하여 주변 환경에 따른 대기 에어로졸의 변화와 블랙카본, PM₁₀, PM_{2.5}의 상호 상관관계를 밝히고, 이 데이터들을 이용하여 풍향, 풍속 등의 환경이 PM₁₀, PM_{2.5}, 블랙카본 거동에 미치는 영향을 종합적으로 파악할 것이다.

2. 실험 방법 및 장치

본 연구에서 블랙카본측정에 사용된 Multi Angle Absorption Photometry(MAAP)은 광흡수 측정을 이용하는 필터 기반 측정장치로서 대기 중의 에어로졸을 포집하여 필터에 부착시키고 에어로졸이 부착되어있는 필터에 레이저를 입사시킨 후 필터에 의한 광 소멸 및 광산란 측정으로부터 블랙카본의 광흡수 계수를 측정하는 장치이다. 기존의 광흡수 측정 장치는 레이저를 입사시킨 반대편에 검출기가 있어서 빛의 산란효과를 고려하지 않았으나 본 연구에 사용된 MAAP은 산란되는 방향으로 특정 위치에 2개의 검출기를 추가하여 산란광을 보정함으로써 산란에 의한 영향을 최소화하는 기법이다(Petzold & Schonlinner, 2004). 본 연구에서는 이미 상용화된 기기(MAAP 5012, Thermo Scientific)를 사용하여 Fig.1에 나타나 있는 충청남도 천안시 병천면에 위치한 한국기술교육대학교에서 1분단위로 블랙카본을 측정하였다. 2015년 9월부터 2016년 4월까지 약 8개월간 블랙카본 농도를 모니터링하였다.

PM₁₀, PM_{2.5}측정에 사용된 장비는 베타선법(β -Ray Method)을 사용하는 장치로 미세먼지를 1시간동안 여과지 위에 포집하여 베타선을 투과시켜 조사된 베타선이 여과지 위의 미세먼지를 통과할 때 흡수 또는 소멸되는 베타선의 차이를 이용하여 중량농도를 측정한다. 본 연구에 활용되는 PM₁₀, PM_{2.5}농도 데이터는 한국 환경공단이 운영하고 있는 에어코리아(www.airkorea.or.kr)로부터 수집하였다. PM₁₀과 PM_{2.5}는 2015년 9월부터 2016년 4월까지 1시간 단위로, 충청북도 청주시 오창읍에서 무인 자동기상관측장비에 의해 수집된 데이터이다.

풍향 및 풍속은 충청남도 천안시 신방동에서 1시간 단위로 측정된 데이터로써 기상청(www.kma.go.kr)으로부터 수집하였다. 2015년 9월부터 2016년 4월까

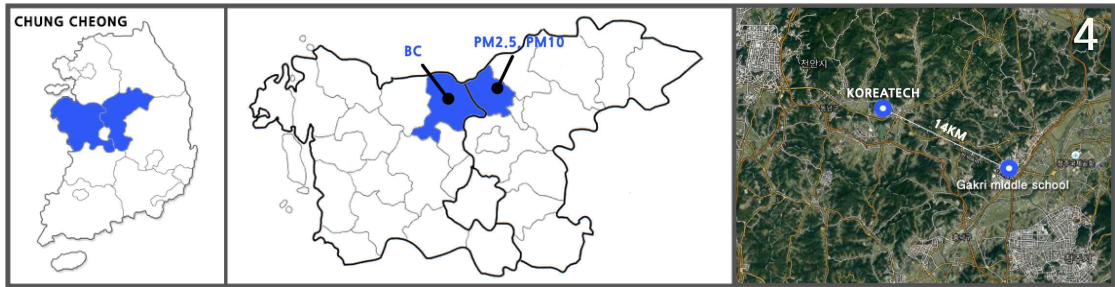


Fig. 1. Location of monitoring site

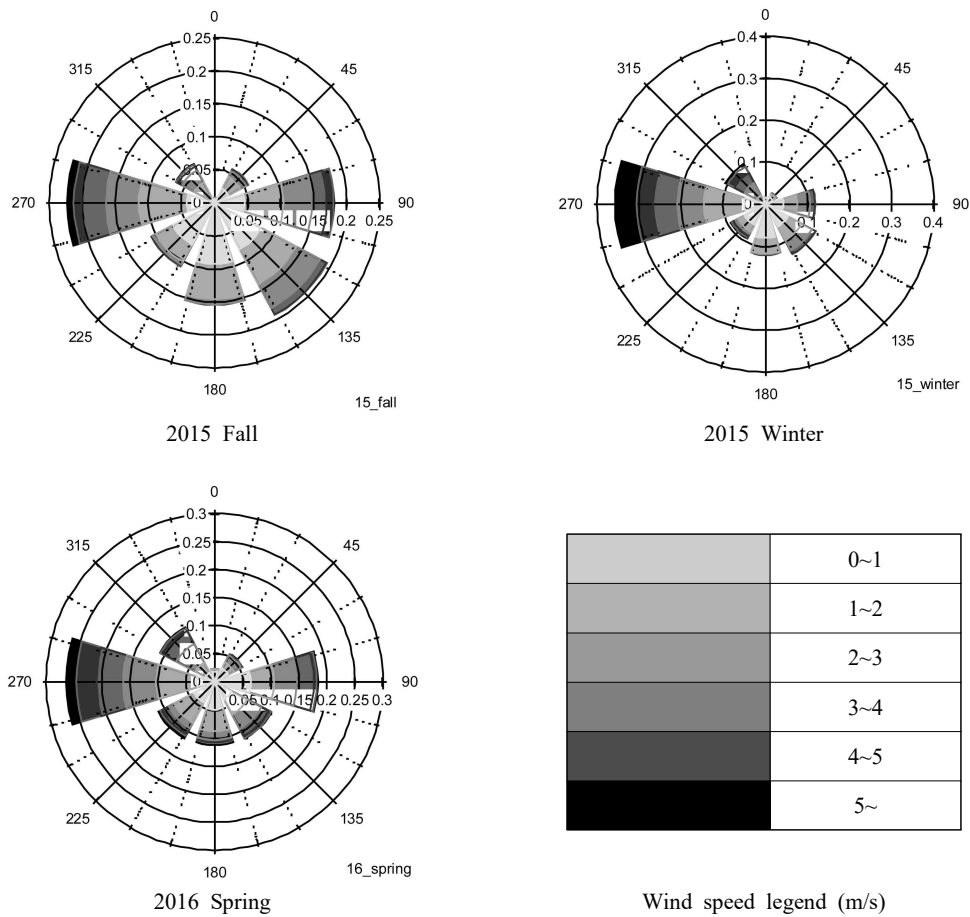


Fig. 2. Windrose diagrams for 3 seasons

지 획득된 풍향 및 풍속에 대한 바람장미(Windrose) 그림을 Fig. 2에 나타내었다. 이 바람장미 그림은 오로지 바람의 세기 및 방향만 나타내며 BC의 농도를 나타내는 것은 아니다. 2015년 가을에는 서풍 및 남

동풍이 우세하였고, 2015년 겨울에는 서풍이 매우 우세하였으며 2016년 봄에도 서풍 및 남동풍이 우세하여 측정기간 전반적으로 서풍이 지배적인 것으로 나타났다.

Table 1. Monthly average for BC, PM₁₀ and PM_{2.5} Concentrations (unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Month	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.
PM ₁₀	31.6	43.6	34.9	52.9	48.6	44.8	63.8	69.0
PM _{2.5}	21.2	37.0	34.6	40.5	38.9	33.7	44.1	39.6
eBC in PM _{2.5}	0.79	1.71	1.67	1.41	1.21	2.08	2.15	2.44

3. 결과 및 토의

3.1 블랙카본(Black Carbon, BC) / PM₁₀ / PM_{2.5} 농도 측정 결과 및 분석

2015년 9월부터 2016년 4월까지의 블랙카본(Black Carbon, BC), PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 농도 변화 추이를 분석하였다. Table 1은 블랙카본, PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 월별 평균을 나타낸다. Table 1의 값을 계절로 다시 구분하여 평균값을 비교하였다. 블랙카본의 분기 평균 농도는 2015년 가을($1.39\mu\text{g}/\text{m}^3$), 2015년 겨울($1.57\mu\text{g}/\text{m}^3$), 2016년 봄($2.3\mu\text{g}/\text{m}^3$), 측정되었다. PM₁₀의 경우, 가을($36.69\mu\text{g}/\text{m}^3$), 겨울($48.78\mu\text{g}/\text{m}^3$), 봄($66.41\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 측정되었다. PM_{2.5}의 경우, 가을($30.89\mu\text{g}/\text{m}^3$), 겨울($37.72\mu\text{g}/\text{m}^3$), 봄($41.87\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 측정되었다. 그 결과 블랙카본, PM₁₀, PM_{2.5}의 기본적인 변화 추이는 비슷하였다. 평균 농도는 3물질 모두 봄(3월~4월)에 가장 높고, 가을(9월~11월)에 낮은 농도 분포를 보였다. 봄철 가장 높은 농도 수치를 보이는데 이는 중국의 황사의 영향이 큰 것으로 사료된다. Fig.2에 나타낸 바와 같이 2016년 서풍의 영향을 받아 중국 발생 1차 연소 물질과 스모그가 국내로 유입되어 BC, PM₁₀, PM_{2.5}의 농도가 증가한 것으로 판단된다.

이와는 반대로 가을철에는 블랙카본, PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도가 낮게 나타났는데, 이는 앞에 설명한 겨울철 중국에서의 난방용 연소 물질 사용의 급격한 증가에 따른 미세물질 배출이나 봄철 황사가 나타나지 않았기 때문이라 판단되며, 겨울 및 봄에 측정된 데이터와 비교했을 때 상대적으로 블랙카본, PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 농도를 높일 요인이 적었기 때문에 낮은 농도를 나타낸 것으로 보인다.

Fig. 3은 8개월의 측정 기간동안 수집된 데이터를 24시간 이동 평균(Running average)한 그래프이다. 블랙카본 농도의 단절이 나타난 것은 블랙카본 측정기의 유지보수를 위해 측정이 일시적으로 중단되었기 때문이다. PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도 변화 추이는 블

랙카본과 대략적으로 유사한 형태를 보였다. PM_{2.5}는 블랙카본을 포함하고 있기 때문에 농도 변화 추이가 대략적으로 유사할 수도 있지만, 블랙카본 이외의 물질이 대부분이어서 반드시 변화 추이가 유사하지는 않다. PM_{2.5}과 블랙카본의 농도 변화 경향은 배출원의 위치 또는 분포에 따라 지역적으로나 시간적으로 다를 수 있으며 이 경향은 Fig. 3에서도 확인된다.

Fig. 4는 월간 총 미세먼지 농도에서 각 물질이 차지하는 비율을 나타낸다. 특히하게도, PM_{2.5}가 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, PM₁₀와 BC 순의 비율을 보였다. PM_{2.5}가 PM₁₀보다 높은 농도를 보이는 현상의 원인을 파악하는 것은 본 연구의 범위를 벗어 나고 있어, 향후 이에 대한 원인을 밝혀낼 수 있는 후속 연구가 필요하다고 판단된다.

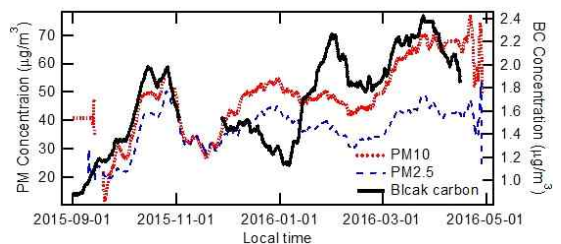


Fig. 3. BC, PM₁₀ and PM_{2.5} Concentrations monitored for 8 months.

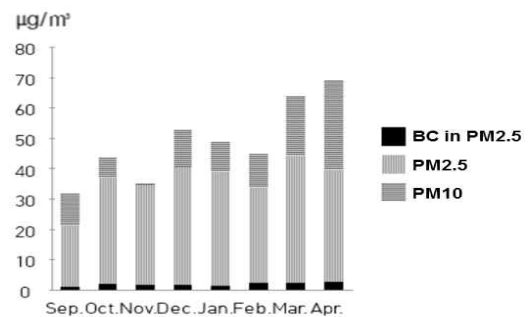


Fig. 4. Monthly composition of mass concentration for eBC in PM_{2.5}, PM₁₀ and PM_{2.5}

Table 2. Correlation coefficients (R^2) between PM₁₀ and BC, PM_{2.5} and BC, PM₁₀ and PM_{2.5}

	2015 Fall	2015 Winter	2016 Spring
BC-PM ₁₀	0.52	0.31	0.40
BC-PM _{2.5}	0.47	0.45	0.58
PM ₁₀ -PM _{2.5}	0.53	0.90	0.61

3.2 블랙카본(Black Carbon, BC) / PM₁₀ / PM_{2.5} 상관관계 분석

선형회귀분석을 통하여 BC-PM₁₀-PM_{2.5} 상호 상관관계를 분석하였다. 비교방법은 계절별로 동 시간대에 측정된 데이터를 상호 대응시킨 후 상관관계결정계수(R^2)를 산출하였다.

Table 2의 BC-PM₁₀-PM_{2.5} 상관관계결정계수는 2015년 겨울 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도의 경우를 제외하고는 낮게 산출되었기 때문에 연관관계가 적은 것으로 판단된다. 이미 Fig. 3에 나타난 바와 같이, 2015년 9월 1일부터 4월 30일까지 8개월 동안 측정된 BC, PM₁₀ 및 PM_{2.5}농도는 전체적으로 서로 유사한 경향을 보이지만, 월별 데이터의 일부는 뚜렷한 상관성을 발견할 수 없었다.

(1) BC-PM₁₀

2015년 9월부터 2016년 4월까지 측정된 BC-PM₁₀ 농도 데이터를 바탕으로 선형회귀분석을 도출하였다. Fig.5에 나타난 바와 같이, 측정된 모든 기간동안 BC와 PM₁₀농도 사이의 관계는 정비례 관계이다. 상관관계결정계수의 값은 전반적으로 낮게 산출되었는데 이는 PM₁₀의 경우 상당 부분이 토양물질 또는 토양 물질의 기원인 비산먼지로 배출량이 많은 데 비해 큰 입경으로 체류시간이 짧아 농도에 대한 기여도가 적고 배출형태가 다양한 반면 BC의 경우 입경 1 μ m이하의 물질로 상당 부분 탄소의 불완전 연소에 의해 발생된 초미세먼지이기 때문인 것으로 판단된다(Kim,2012). 이런 주 오염발생원 차이로 인하여 두 물질의 연관성이 약하게 나타난 것으로 사료된다. 이와 더불어 측정 장소가 대도시가 아닌 지방 중소도시로 비포장 도로가 많아 비산먼지가 상대적으로 많으며, 이동 오염원이 상대적으로 적다는 점도 두 물질간의 상관관계를 약하게 한 것으로 판단된다.

Table 2에 나타난 바와 같이 상관관계결정계수의

값이 2015년 겨울철에 다른 계절보다 낮게 나타났다. 이는 동절기에 발생하는 미세먼지는 블랙카본과는 관련이 적다는 사실을 나타낸다. 즉, 블랙카본과 PM₁₀ 미세먼지는 구성 성분 및 배출원이 서로 다르다는 사실을 보여준다.

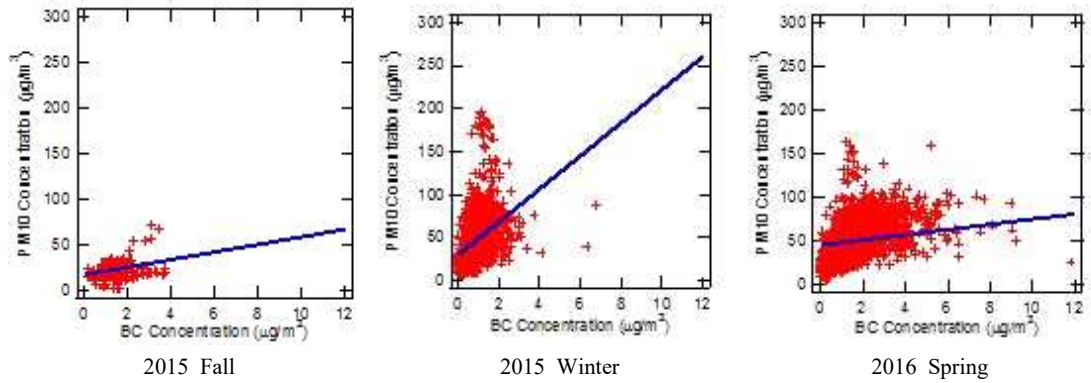
(2) BC-PM_{2.5}

2015년 9월부터 2016년 4월까지 측정된 BC-PM_{2.5} 농도 데이터를 바탕으로 선형회귀분석을 도출하였다. Fig. 5에 나타난 바와 같이, 측정된 모든 기간동안 BC와 PM_{2.5}농도 사이의 관계는 정비례 관계이다. 정비례 관계가 나타나는 이유는 Fig. 3에서 설명되었듯이 8개월간 BC, PM₁₀ 및 PM_{2.5}농도에 변화 추이가 전체적으로 유사함으로부터 유추할 수 있다. 더불어 BC와 PM_{2.5}간의 상관관계결정계수의 값이 2015년 가을(9월~11월)에는 0.47이고, 2015년 겨울(12월~2월)에는 0.45이고, 2016년 봄(3월~4월)에는 0.58으로 도출되었다. 이 상관관계결정계수값들은 BC-PM₁₀ 사이의 관계로부터 얻어진 값들보다는 높지만 여전히 상대적으로 낮은 값을 나타내고 있음을 보여준다. 측정지역에서 2.5 μ m이내의 초미세먼지 중 BC가 많이 포함되어 있지 않으며 상관관계가 그렇게 크지 않음을 나타낸다. 블랙카본의 경우 주 오염발생원은 특히 이동오염원(경유차량)에 의한 것으로 밝혀져 있다(Lee et al., 2014). 반면 PM_{2.5}는 주로 공장 굴뚝 또는 황사의 영향으로 알려져 있다. 측정이 이루어진 장소는 대도시가 아닌 지방 중소도시로 이동오염원의 영향을 비교적 많이 받지 못한다는 점에서 PM_{2.5}내에서의 BC의 기여도가 낮은 것으로 판단된다.

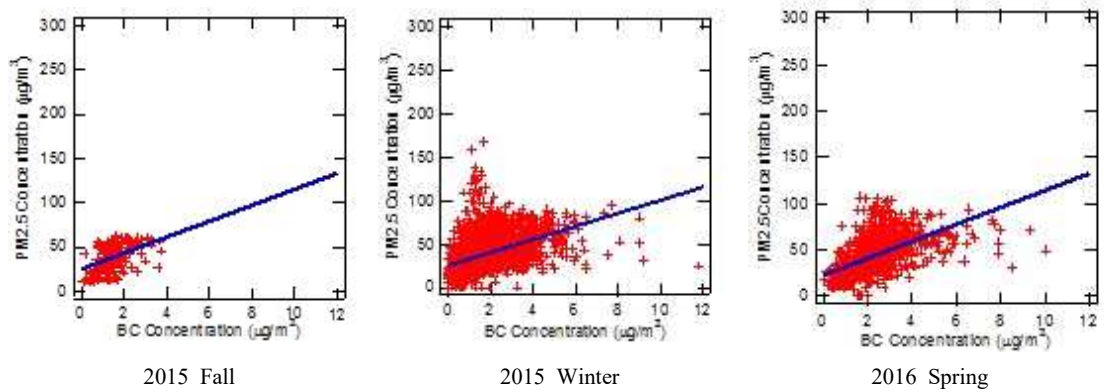
(3) PM₁₀-PM_{2.5}

2015년 9월부터 2016년 4월까지 측정된 PM₁₀-PM_{2.5} 농도 데이터를 바탕으로 선형회귀분석을 도출하였다. Fig. 5에 나타난 바와 같이, 측정된 모든 기간 동

(a) PM₁₀-BC



(b) PM_{2.5}-BC



(c) PM₁₀-PM_{2.5}

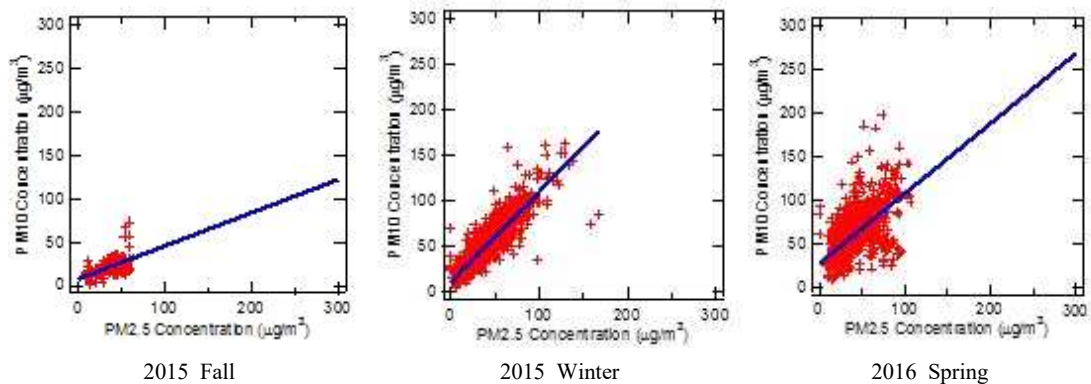


Fig. 5. Correlation graphs for (a) PM₁₀ concentration vs. BC concentration, (b) PM_{2.5} concentration vs. BC concentration, (c) PM₁₀ concentration vs. PM_{2.5} concentration

안 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도 사이의 관계는 정비례함을 보여준다. 2015년 가을(9월~11월)의 상관관계결정계수는

0.53, 2015년 겨울(12월~2월)의 상관관계결정계수는 0.90, 2016년 봄(3월~4월)의 상관관계결정계수는

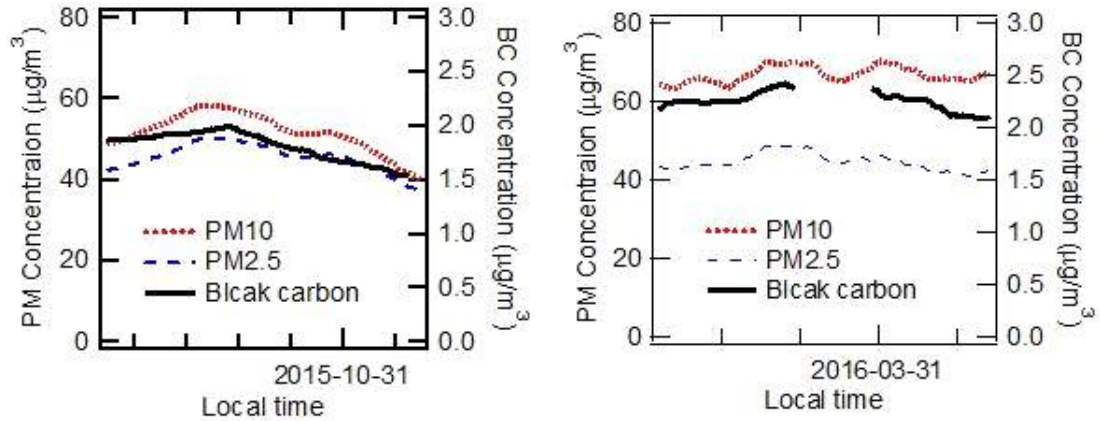


Fig. 6. BC, PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations on two event days

0.61으로 산출되었다. 2015년 겨울에 상관관계결정 계수가 높게 나타난 이유는 동절기 난방을 위한 화석연료 사용 증대로 인해 발생한 1차 오염물질들이 서풍을 타고 한반도로 유입되면서 2차 생성 물질로 변화했기 때문인 것으로 판단된다(Choi, 2008).

이와는 반대로 가을철에 상관관계결정계수의 값이 0.53으로 가장 낮게 도출되었다. 그 이유는 겨울철에 비해 상대적으로 적은양의 화석연료사용과 우리나라가 중국으로 영향을 받기위한 바람의 방향 서풍이 아닌 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 가을철 남서풍의 영향으로 인해 2.5µm이내의 초미세먼지가 국내로의 유입이 덜 되어 PM₁₀내에서의 PM_{2.5}의 기여도가 낮아진 것으로 판단된다.

3.3 고농도 측정일 분석

Fig. 3을 통해 과도하게 고농도로 측정된 시기를 도출하고, 그 원인을 기상청 월간 기후 보고 자료를 통해 원인을 분석하였다. Fig. 6을 통해 2015년 10월 하순부터 11월 초 까지 다른 때 보다 PM₁₀, PM_{2.5}, BC가 농도가 높아지는 것을 관찰 할 수 있었다. 그 이유를 월간 기후 보고 자료를 통해 확인해본 결과, 10월 26일 내몽골에서 발원한 황사가 남동진하여 서해상을 지나 황사가 관측되고 10월 황사의 경우 관측된 사례는 2009년, 2014년 이후로 3번째로 나타난 기상이변사례이다. Fig. 6에서 블랙카본 농도의 단절이 나타난 것은 블랙카본 측정기의 유지보수를 위해 측정이 일시적으로 중단되었기 때문이다.

2016년의 경우 3월 말 경우 역시 Fig. 6을 통해 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 농도가 높아지는 것을 관찰할 수 있었다. 월간 기후 보고 자료를 통해 확인한 결과 4월 말경 황사가 발생하였다. 이 황사는 몽골과 내몽골 고원 및 중국 북부에서 발원하여 북서풍을 타고 우리나라로 유입된 것으로 발표 되었고 이에 따라 PM의 농도가 높게 검출된 것으로 보인다.

결 론

1) 블랙카본, PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 8개월간(2015.09 ~ 2016.04) 농도 변화 추이를 분석한 결과 봄-겨울-가을 순으로 농도가 높은 것으로 관찰 되었다. 봄철에는 중국에서 발생하는 황사가 계절풍(서풍)을 타고 한반도에 영향을 미쳐 농도가 상승한 것으로 판단 된다. 겨울철에는 중국의 난방용 화석연료 연소가 증가하고, 이로 인한 배출물질이 북서풍을 타고 한반도로 유입되어 높은 농도를 보이는 것으로 판단 된다. 가을철에는 봄, 겨울에 비해 상대적으로 미세먼지 농도를 높일 요인이 적어 농도가 낮게 분포한 것으로 보인다. PM_{2.5}의 농도변화 추이는 블랙카본과 매우 유사한 형태를 보였다(9월~12월). 이는 PM_{2.5}가 블랙카본을 포함하고 있어 농도 변화 추이가 유사하게 나타나는 것으로 사료된다.

2) 선형회귀분석을 통하여 BC, PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농

도의 상관관계를 분석한 결과, 대부분 수치가 낮게 산출되었다. 이는 각 물질간의 연관관계가 적은 것으로 판단된다. BC 농도와 PM₁₀ 농도는 정비례관계를 보여주고 있지만 상관관계 결정계수는 낮게 산출되었다. 그 이유는 PM₁₀은 비산먼지에 의해 주로 배출이 되며 배출형태가 다양한 반면 BC의 주 배출원은 이동오염원(디젤 엔진)으로 배출원과 구성성분이 다르기 때문이다. BC 농도와 PM_{2.5} 농도의 상관관계는 BC 농도와 PM₁₀ 농도와와의 상관관계와 마찬가지로 정비례 관계를 나타내지만 상관관계 결정계수의 값이 0.5 정도로 낮게 나타났다. 이는 주 오염물질 발생원의 차이로 인한 결과로 사료된다. PM_{2.5}는 주로 공장 굴뚝 또는 황사로 인하여 발생되지만 BC는 이동오염원(경유차량)에 의해 발생되기 때문이다. PM_{2.5}내에서의 BC의 기여도가 낮은 것은 측정장소가 이동오염원의 영향이 적은 중소도시이기 때문인 것으로 판단된다. PM₁₀ 농도와 PM_{2.5} 농도의 상관관계도 정비례 관계를 보여주고 있다. 하지만 위의 상관관계 분석과는 다르게 2015년 겨울철 상관관계결정계수가 0.9로 높게 산출되었다. 중국의 난방용 화석연료 사용으로 인해 발생한 1차 오염물질이 서풍을 타고 한반도로 유입되면서 2차 생성 물질로 변해 상관관계가 높아진 것으로 사료된다. 이와는 반대로 가을철 상관관계결정계수의 값은 0.53으로 낮게 산출되었다. 이는 서풍이 아닌 남서풍의 영향을 받아, 중국으로부터 황사와 화석연료 연소물질이 유입되지 못하였기 때문인 것으로 판단된다.

3) BC의 경우는 2015년에 10월 하순 ~ 11월 초 사이에 높게 측정되었다. 고농도가 측정된 날을 기상청 월간 기후 보고 자료를 통해 분석한 결과, 중국에서 발생한 황사가 이 기간동안에 증가하였다. 2016년 4월에도 몽골과 내몽골 고원 및 중국 북부에서 발원한 황사가 서풍을 타고 우리나라로 유입된 것으로 나타나, 블랙카본과 황사와의 상관성을 좀더 상세히 연구할 필요성이 있다고 하겠다.

감사의글

본 연구는 한국기술교육대학교 교육연구진흥비의

지원을 받아 수행되었으며, 연구의 일부분은 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2016RID1A1B03931654)의 일환입니다.

References

- Andreae, M. O. (2001). The Dark Side of Aerosols, *Nature*, 409, 671~672.
- Chameides, W.L., and Bergin, M. (2002). Soot Takes Center Stage, *Science*, 297, 2214~2215.
- Choi, H. (2008). Comparison of PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ Concentration in a Mountainous Coastal City, Gangneung Before and After the Yellow Dust Event in Spring, *the Environmental Sciences*, 17, 633~645.
- Kim, Y.S. (2012). Black Carbon Monitoring for Managing Hazardous Air Pollutants in the Metropolitan Area, *Seoul Studies*, 13, 175~186.
- Kim, W.S. (1997). Seoul Particulate Matter reduction and management plan, *The Seoul Institute*, 182, 1~19.
- Lee, C.S., Kim, H.H., Kwak, Y.K., Son, H.R., and Im, Y.W. (2014). Black Carbon Exposure to the Elementary School Location Characteristics, *Korea Society for Atmospheric Environment*, 189~189.
- McMurry, P., Shepherd, M., and Vickery J. (2004). Particulate Matter Assessment for Policy Maker: A NARSTO Assessment, 1st Ed, Cambridge, Cambridge University Press.
- 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*, 317, 1381~1384.
- 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.*, 35, 421~441.