

한반도 수도권 및 준 수도권 지역의 블랙 카본 측정 연구: 한-미 협력 국내 대기질 공동 조사 연구(KORea-US Air Quality Study, KORUS-AQ) 예비캠페인 기간을 중심으로

A Study of Black Carbon Measurement in Metropolitan Area and Suburban Area of the Korean Peninsula Performed during Pre KORea-US Air Quality Study (KORUS-AQ) Campaign

이정훈* · 정병주¹⁾ · 박다정²⁾ · 배민석²⁾

한국기술교육대학교 기계공학부, ¹⁾한국기술교육대학교 대학원 기계공학과

²⁾국립목포대학교 환경공학과

(2015년 9월 24일 접수, 2015년 10월 5일 수정, 2015년 10월 6일 채택)

Jeonghoon Lee*, Byeongju Jeong¹⁾, Da-Jeong Park²⁾ and Min-Suk Bae²⁾

School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education

¹⁾*Department of Mechanical Engineering,*

Graduate School of Korea University of Technology and Education

²⁾*Department of Environmental Engineering, Mokpo National University*

(Received 24 September 2015, revised 5 October 2015, accepted 6 October 2015)

Abstract

Black carbon (BC) aerosols were monitored at the KIST site (37.603°N, 127.046°E) and Cheonan-KOREATECH site (36.766°N, 127.281°E) during the pre KORea-US Air Quality Study (KORUS-AQ) campaign using a couple of Multi Angle Absorption Photometers (MAAP). BC mass concentrations were presented as $2.14 \pm 1.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $0.94 \pm 0.60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ at KIST site (Seoul) and KOREATECH site (Cheonan), respectively. BC mass concentrations measured at KIST and KOREATECH sites from 22:00 on May 22 to 12:00 on May 23, 2015 showed 80% and 72% higher than average BC mass concentrations measured during campaign period, respectively. It indicates both sites could be influenced by a remote source. Similar patterns of BC concentrations between two sites from 20:00 to 24:00 on June 6, 2015 implies that the BC could be transported into both sites and then be stagnant inside the Korean Peninsula. Diurnal variation of BC in weekdays and weekends were also presented for the KIST and KOREATECH sites. Morning rush hour peak was observed at KIST site located in metropolitan area though no distinct morning rush hour peak was not observed at KOREATECH site located in a suburban area. This study revealed transport pathways of BC near the Korean Peninsula using back-trajectory analysis of BC measured both in a metropolitan area and in a suburban area.

Key words : Black carbon (BC), Multiangle absorption photometer (MAAP), Back-trajectory analysis

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)41-560-1151, E-mail : jlee@koreatech.ac.kr

1. 서 론

블랙카본은 주로 탄화수소계열의 연료가 불완전 연소하면서 발생되며 외형적으로는 구형으로 가정할 수 있는 기본입자(primary particle)들이 사슬 모양의 집합체(aggregate) 형상을 하고 있다(Park *et al.*, 2004). 색깔은 검정색이며 가시광선 및 적외선 대역의 파장의 빛을 흡수하기 때문에, 지구 복사 강제력에 영향을 준다(Sadiq *et al.*, 2015). 특히, 대기 중의 블랙카본 농도가 증가하면 대기 에어로졸 흡수 계수가 증가하여 단산란알베도(single scattering albedo)는 감소한다. 대기 중의 블랙카본 입자는 태양광을 흡수하여 복사 평형에 직접적인 영향을 미치는 직접효과와, 구름응결핵으로 인해 지표로 향하는 태양광을 차단해 복사 평형에 간접적인 영향을 미치는 간접효과가 있다고 알려져 있다(Haywood and Boucher, 2000). 또한, 대기 중 블랙카본이 태양광을 흡수하면, 주변 온도가 상승되어 구름 증발 및 구름의 수명을 단축시킴으로써 지표로 향하는 태양광량을 증가시키는 등, 준직접인 영향을 주기도 한다(Lohmann and Feichter, 2001). 특히 여러 에어로졸 중에서도 지구온난화에 큰 영향을 미치는 블랙카본의 복사 강제력이 CO₂에 의해 유발되는 복사 강제력의 55% 정도라는 연구결과가 발표되면서, 대기과학자들 사이에서 대기 중 블랙카본의 농도 측정에 대한 관심이 갈수록 높아지고 있다(Ramanathan and Carmichael, 2008).

실시간으로 블랙카본을 측정하는 기기는 주로 필터 기반 기법을 채용하는 기기들이 사용되는데, 그 대표적인 예가 에살로미터(Aethalometer)이다(Hansen *et al.*, 1984). 그 밖에, Black Carbon Monitor(BCM), Tricolor Absorption Photometer(TAP), Multi Angle Absorption Photometer(MAAP) 등의 기기들이 상용화되어 블랙카본 측정에 사용되고 있다(Miyazaki *et al.*, 2008; Petzold and Schönlinner, 2004). 위에 제시한 기기들의 원리는 다음과 같다. 우선 연속적으로 일정량의 블랙카본을 필터에 포집한다. 이후 필터에 블랙카본이 실시간 누적 포집과 Beer 법칙에 의한 투과광의 강도의 상관관계에 따라 투과광의 강도 감소량을 측정하고, 이에 따른 흡수 계수를 도출하여 질량 흡수 단면적(mass absorption cross-section, MAC)에 의한 블랙카본 질량농도로 환

산하는 원리이다. 이때, MAC 값은 Aethalometer, BCM, TAP 모두 상이한 값을 사용하고 있으며 기기 제작시 최적화된 값들이다. 하지만 필터기반 기기들은 모두 필터 자체에 의한 산란, 포집된 블랙카본에 의한 산란, 그리고 필터 및 블랙카본간의 상호작용에 의해 왜곡된 흡수 계수를 도출하는 문제점이 있다(Collaud Coen *et al.*, 2010). 이러한 산란에 의한 문제를 극복하기 위해 투과광의 강도뿐만 아니라 산란광의 강도를 여러 지점에서 측정한 후 투과광의 강도를 보정하는 기법을 채용한 기기가 MAAP이다. 필터기반 블랙카본 측정 기기 중 가장 많은 연구가 진행된 것은 에살로미터이다. 에살로미터에서 측정된 질량농도는 측정시간이 지남에 따라 감소하다가 새로운 필터로 교체될 때 급격히 증가하는 데, 이를 보정하기 위한 노력이 진행되어 왔다(Jung and Park, 2010; Park *et al.*, 2009). 대기 에어로졸에 대하여 여러 에살로미터에 대한 상호비교 연구도 진행되었다(Jung *et al.*, 2011). 한편, 레이저유도백열법(Laser Induced Incandescence)을 채용한 Single Particle Soot Photometer(SP2)가 상용화되어 있어, 블랙카본 단일입자에 대한 측정이 가능하다(Lee *et al.*, 2010). 최근에는 SP2를 이용하여 블랙카본의 코팅 두께를 측정하여 aging 정도 및 오염 배출원에 대한 특성을 파악하고자 하는 연구가 진행되었다(Oh *et al.*, 2015).

대기 중 에어로졸의 화학적 성분에 대한 정보는 대기 배출 오염원, 오염원 기여도, 대기 중에서의 화학 반응, 이동 경로 및 거동 특성, 인체에 대한 유해성 등을 파악하고 예측하는 데 중요한 자료로 활용할 수 있고, 더 나아가 지역 및 광역적 대기질 관리를 위한 본질의 배출원 제어 전략을 수립하는 데 유용하게 쓰일 수 있다. 이 중, 블랙카본은 화학적 안전성으로 인하여 1차 오염물질 발생원을 추적하는 중요한 추적물질로 활용할 수 있다. 이에 지름 2.5 μm 이하 블랙카본의 거동 특성을 조사하기 위하여 서울 한국과학기술연구원(KIST) 및 천안 한국기술교육대학교(KOREATECH) 측정소에서 한-미 협력 국내 대기질 공동 조사 연구(KORUS-AQ) 예비 캠페인 기간인 2015년 5월 20일부터 23일 동안 블랙카본을 측정하였다. 측정된 블랙카본 농도를 비교 분석하여 소농도 및 거동 특성을 고찰하였다. 이는 (1) 공간 분석 기법을 기반으로, (2) 측정기간 중 지역 간 농도변화 추이 및 블랙카본 농도의 일변화를 이해하여, (3) 장거리 및 광범위 블랙카본 고농도 특성을

파악하기 위함이다.

한편, KOREATECH 측정소의 경우, 2012년 및 2015년 5월과 6월 사이 측정된 데이터를 기반으로 대기 중 블랙카본의 농도 변화 추이를 분석하였다. 5월과 6월의 대한민국의 대기환경은, 국내에서 발생하는 대기 오염 물질과 더불어 서쪽에서 불어오는 중국발 장거리 이동 물질에 의해 높은 미세먼지 지수를 기록하고 있어 동기간의 블랙카본을 측정하였다.

2. 실험 방법

블랙카본 측정을 위하여 MAAP(Thermo Scientific 5012)을 활용하였다. PM_{2.5} 사이즈 컷을 위해 WINS PM_{2.5} 임팩터를 입구에 설치하였다. 입구를 통해 기기로 유입되는 공기의 유량은 16.7 L/min이고 입구 전단에 프리 히터를 설치하여 기기로 유입되는 대기 온도를 섭씨 35~40도로 유지하였다. MAAP에 사용된 광원의 파장은 670 nm로, 검출되는 데이터는 적색 가시광선 영역의 광흡수 특성을 나타낸다. 그림 1에 제시한 바와 같이 MAAP은 블랙카본이 포집된 필터를 투과하는 광의 강도뿐만 아니라 여러 각도로 산란된 광의 강도를 측정하여 투과광을 보상해주는 기법을 사용한다. 보상된 투과광의 시간에 따른 감쇄량으로부터 흡수계수를 도출하여 질량농도로 환산하는 과정은 기존의 필터기반 블랙카본 측정기와 유사하다. 실시간 측정 데이터는 시리얼 포트를 통해 하이퍼 터미널 및 ComMaster (Ver. 1.0, MyRobot Team, KAIST, Korea) 소프트웨어를 이용하여 수집하였다. 측정 간격은 1분이며, 일부 그래프 작성시 데이터의 선명도 처리를 위해 60분 상자 평균(Box averaging) 기법을 사용하였다. 데이터는 매일 00:00에서 23:59까지 매 분마다 저장되었다. KORUS-AQ 예비 캠페인 기간 동안에 측정된 일일 데이터 중 일부는 각각 주간 데이터와 주말 데이터로 분리하였다. 분리된 주간 데이터와 주말 데이터는 00:00에서 23:59까지의 매분 평균 데이터로 나타내었다.

측정 위치는 서울 성북구 화랑로에 위치한 한국과학기술연구원(KIST) 측정소(37.603°N, 127.046°E)와 충남 천안 병천면 충절로에 위치한 한국기술교육대학교(KOREATECH) 측정소(36.766°N, 127.281°E)로 그림

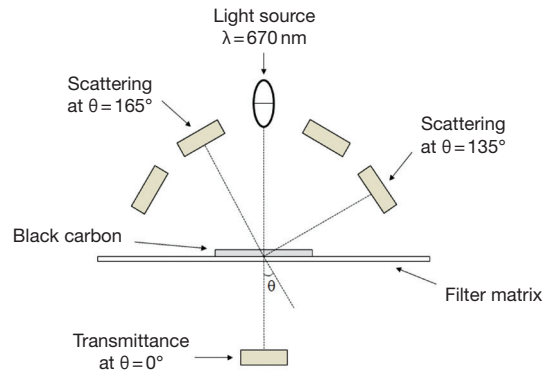


Fig. 1. Schematic of the principle of MAAP.

2에 자세히 나타내었다. KIST 측정소는 대도시 서울에 위치하고 있어 도심지를 통행하는 자동차에 의한 이동 오염원으로부터 블랙카본이 기인하기 쉬운 위치이다. 반면, KOREATECH 측정소는 논과 산, 하천 및 2차선 도로, 그리고 관광지 등이 인근에 위치해 있기 때문에 고정오염원과 이동오염원이 상존해 있다.

국소 지역 및 광역적 대기질 관리를 위해 배출원 제어 전략을 수립하는 데 유용하게 쓰일 수 있는 물리·화학적 성분 중 블랙카본은 화학적으로 안전성이 확보되어 있어 1차오염물질 발생원을 추적하는데 중요한 미량 물질로 활용될 수 있다. 연구에서 대기 기원의 특성을 규명하고자 유입 공기의 흐름을 분석하기 위해 NOAA의 HYSPLIT model을 사용하여 500 m 고도를 기준점으로 각각 두 측정소에서 동시간 역궤적 분석(back-trajectory analysis)을 수행하였다(Draxler and Rolph, 2015).

MAAP을 비롯한 필터기반 광흡수 특성 장비는 장비 제조사에서 제시하는 질량 흡수 단면적(mass absorption cross-section, MAC)을 이용해 질량농도를 산출하여 표시한다. MAC은 흡수 물질의 단위질량당 흡수 단면적을 의미한다. 이때 제조사에서 제시한 MAC은 제조 지역의 기후, 기상 조건에 따라 산출된 값이므로 타 지역에서는 다를 수 있다. 따라서 블랙카본의 측정 데이터는 질량농도보다 흡수계수(B_{abs})로 표현하는 것이 타당하다. 다만, 두 가지 기기를 상호 비교하는 목적의 실험에서는 흡수계수나 질량농도 둘 중 어느 것을 사용하여도 무방하다. 본 연구에서는 기기 비교의 목적이 아닌 경우에는 흡수 계수를 이용하여 블랙카본

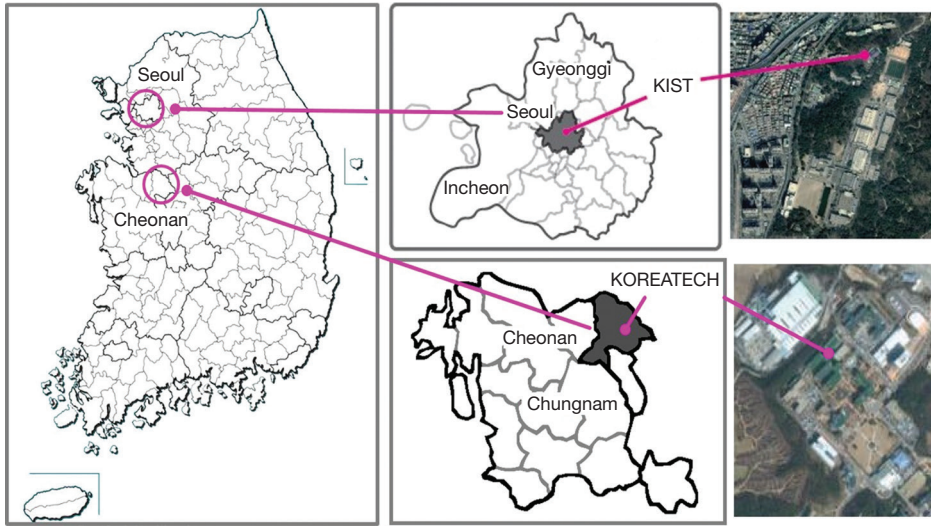


Fig. 2. Locations of BC monitoring at Seoul (KIST) and Cheonan (KOREATECH) sites.

측정값을 표시했으며, 기기 비교의 경우에는 질량농도를 이용하여 표시하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 블랙카본 질량 농도와 배출원 역추적

KORUS-AQ 예비 캠페인 기간 동안 KIST 측정소와 KOREATECH 측정소에서 측정된 블랙카본 농도를 그림 3(a)에 나타내었다. 서울에 위치한 KIST 측정소에서의 블랙카본 농도가 교외지역에 위치한 KOREATECH 측정소에서 측정된 블랙카본 농도보다 높게 나타났다. KIST에서 측정된 블랙카본 농도는 평균 2.14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고 표준편차는 1.06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 순간적으로 측정된 최대 블랙카본 농도는 11.22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다. KOREATECH에서 측정된 블랙카본 농도는 평균 0.94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고 표준편차는 0.60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 순간적으로 12.16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 최대 블랙카본 농도 값을 보였다. KIST 측정소에서 측정된 블랙카본 농도가 KOREATECH 측정소에서 측정된 블랙카본 농도보다 대략 2.3배 이상의 높은 값을 보였으며, 통계적으로 유의수준내에서 두 지역의 농도가 다른 값을 나타내었다. 이는 서울 지역에서의 교통량이 많다는 것을 방증한다. 이에 측정 기간 동안의 각 성분별 평균 질량농도를 표 1에 나타

Table 1. Summary of statistical results for the Black Carbon (BC) mass concentrations at the Seoul (KIST) site and the Cheonan (KOREATECH) site. (unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Measurement sites	Mean	Standard deviation	Sample variance	Maximum
Seoul (KIST)-MNU	2.14	1.06	1.13	11.22
Cheonan-KOREATECH	0.94	0.60	0.36	12.16

내었다.

그림 3은 두 측정소에서의 블랙카본 질량농도 시계열 변화(a), 시간평균 일변화(b) 및 두 측정소간 농도변이에 따른 두 사례(c, d)를 선정하여 나타낸 것이다. 측정기간 중 두 측정소에서 관측한 블랙카본의 상당 부분이 서로 다른 농도 변이를 나타내었다. 이는 블랙카본이 자동차 배기가스 등의 지역적 일차오염물질의 영향을 상대적으로 많이 받고 있음을 의미한다.

시간별 일변화(그림 3b)를 살펴보면, KIST 측정소에서는 블랙카본의 농도가 오전 5시부터 서서히 증가하기 시작하여 오전 8시~9시에 평균 3.44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최대치를 나타낸 반면, KOREATECH 측정소의 블랙카본 농도는 오후 7시부터 서서히 증가하기 시작하여 새벽 2시~3시경 평균 1.34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최대치를 나타내고 이후 감소하여 다시 오전 5시부터 서서히 증가하기 시작

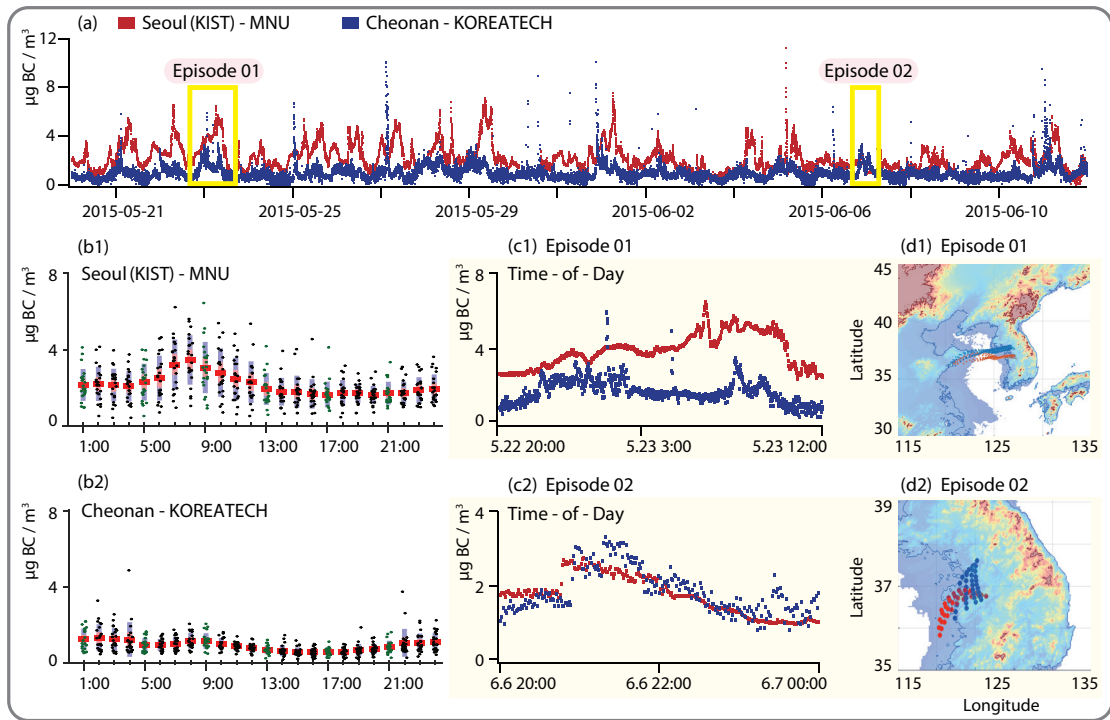


Fig. 3. (a) Time series traces for the minute Black Carbon (BC) concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) measured by the two MAAPs at the Seoul (KIST) site and the Cheonan (KOREATECH) site, (b) hour-of-day series by MAAPs, (c) time series of the BC for the two selected episodes, and (d) back-trajectories of the air mass during the episode periods.

하여 오전 8시~9시에 평균 $1.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 두 번째 일 중 최대치를 나타내었다. 이는 KIST 측정소에서 주위 교통량 등을 고려할 때, 지역적 자동차 배기가스가 주 원인임을 알 수 있다. 반면, KOREATECH 측정소의 블랙카본 농도는 오전시간의 지역적 자동차 배기가스가 주원인과 더불어, 야간 시간 기온 역전 등 기상현상과 주위 산업체 야간 배출 영향 등을 고려하여, 심야 고농도에 따른 원인 분석에 대해 추가적인 연구가 요구된다고 하겠다.

예비 캠페인 기간 동안 블랙카본 고농도 특성을 분석하고자 두 사례 기간을 선택하여 분석하였다. 첫 번째 사례는 5월 22일 오후 8시부터 23일 정오 12시까지 선정하였다. 이 기간 동안 (1) 평균농도는 각각 $3.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $1.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 전체 평균값에 비해 고농도로 약 80%, 72% 동시에 높게 측정되었고, (2) 증가 시점에서의 상관관계계수(r^2)가 0.7 이상 높게 나타났다. 이는 두 측정소 간 거리가 100 km 이상 떨어져 있음에도 불

구하고 같은 원인에 의해 장시간 영향을 받을 가능성이 크다고 하겠다.

이에 그림 3(d1)에서 나타냈듯이, 첫 번째 사례 측정 기간 동안 유입된 기류의 궤도는, 두 측정소 모두 중국 칭다오 지역에서 동해상을 거쳐 유입된 기류라고 판단된다. 즉, 본 사례기간의 블랙카본은 중국으로부터 한반도를 거쳐 유입된 것으로 분석할 수 있다.

다음의 사례는 6월 6일 오후 8시부터 동일 자정 12시까지로, 짧은 시간동안 매우 높은 상관관계와 함께 각각 $1.91 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $1.96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 거의 같은 농도 값을 나타내었다. 이에 역궤적 분석 결과, 그림 3(d2)에서 볼 수 있듯이, KIST 측정소의 사례 측정 기간 동안 충청남도 천안 지역 등에서 유입 기류 궤도를 확인할 수 있다. 이는 (1) 충청남도 천안 지역 등에서 발생한 블랙카본 원인물질이 KIST 측정소로 유입될 가능성과, (2) 천안지역을 포함한 서울, 경기 전역에서 동시에 고농도 블랙카본 현상이 나타날 수 있는 두 가지 가능성으로

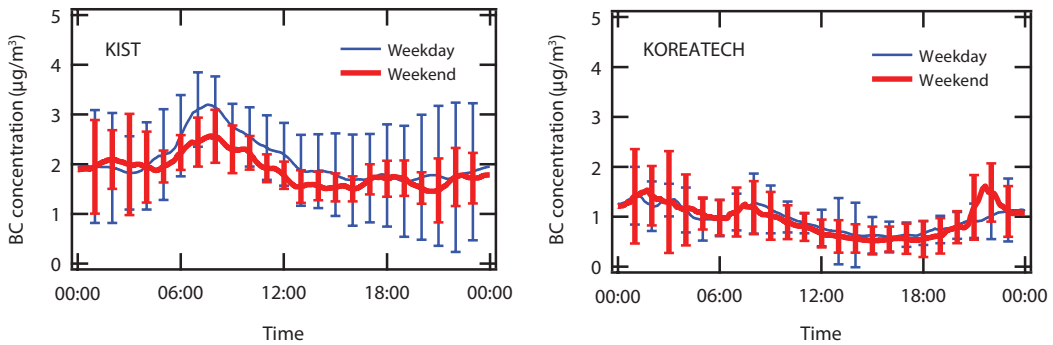


Fig. 4. Diurnal variations of black carbon concentrations measured at KIST and KOREATECH sites for weekday and weekend.

해석할 수 있다.

또한, KORUS-AQ 예비 캠페인 기간 중 측정된 블랙 카본 농도를 기반으로 24시간 동안의 시간평균 일변화 평균 그래프를 주중과 주말로 나누어 그림 4에 나타내었다. 주중에 KIST 측정소에서 측정된 블랙카본 농도의 평균값은 $2.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 표준편차는 $0.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였으며, 오전 7시경에 최대 $3.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 평균 농도값을 보였다. 이는 앞서 설명한 것과 같이 오전 출근 교통량에 따른 지역적 자동차 배기가스가 주원인임을 알 수 있다. BC 농도의 일평균 최소값은 오후 7시경에 나타났으며, $1.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 측정되었다. 한편, KOREATECH 측정소에서 측정된 블랙카본 농도의 주중 평균값은 $0.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 표준편차는 $0.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였으며, 오후 6시경부터 서서히 증가하기 시작하여 오전 1시경에 $1.73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 일중 최대 농도값을 보였다. 블랙카본 농도의 일평균 최소값은 오후 3~4시경에 나타났으며, $0.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 측정되었다. 오전 1시경의 일중 최대 농도값을 나타낸 것은 심야 기온 역전 현상과 더불어 고정 오염원 및 이동 오염원의 1차 배출 영향으로 판단되며, 이동 오염원 배출에 대한 고찰은 다음 절에서 후술하기로 한다.

주말에 KIST 측정소에서 측정된 블랙카본 농도의 평균값은 $1.87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 표준편차는 $0.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였으며, 오전 7시경에 최대 $2.70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 평균 농도값을 보였다. 이는 오전 출근 교통량 때문이라 판단된다. 블랙카본 농도의 일평균 최소값은 오후 8~9시경에 나타났으며, $1.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 측정되었다. 한편, KOREATECH 측정소에서 측정된 블랙카본 농도의 평균값은 $0.94 \mu\text{g}/$

m^3 이고, 표준편차는 $0.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였으며, 오전 7시에 순간적으로 최대 $2.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 평균 농도값을 보였다. 오전 7시 전후로는 대략 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 수준을 유지하고 있어 오전 교통량 증가에 의한 영향은 상대적으로 미비한 것으로 판단된다. 블랙카본 농도의 일평균 최소값은 오후 6시경에 나타났으며, $0.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 측정되었다. 전체적으로 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 값을 보였으며, 오후 9시경에 $2.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 일중 최대값을 나타내 주중에 측정된 블랙카본 농도의 패턴과는 다른 양상을 보였다. 이는 측정소 위치가 교내에 있는 것으로 감안할 때, 금요일에 귀가 학생들을 위한 주말 오후 9시~10시경 학교로 도착하는 셔틀버스에서 배출되는 블랙카본에 의한 영향으로 판단된다.

3.2 블랙카본 흡수 계수

KIST 측정소 및 KOREATECH 측정소에서 측정된 블랙카본 흡수 계수의 요일별 그래프를 그림 5에 나타내었다. 사용된 광원의 파장은 670 nm 이다. KIST 측정소에서 측정된 블랙카본 흡수 계수는 평균 13.82 Mm^{-1} 으로 나타났고, 6월 5일 4시경에는 최대 74.1 Mm^{-1} 를 기록하였다. 한편, KOREATECH 측정소에서 측정된 블랙카본 흡수 계수는 평균 6.19 Mm^{-1} 로 나타났으며, 05월 28일 4시경에는 최대 80.3 Mm^{-1} 를 기록하였다. 6월 1일, 11일, 12일에 각각 $66.0, 62.7, 56.8 \text{ Mm}^{-1}$ 의 높은 값들이 측정되었다. MAAP을 사용하여 측정된 타지역 사례들과 비교해보면, 2009년 5월과 6월에 일본 후쿠에에서 측정된 블랙카본 흡수 계수의 평균값은 각각 $5.02, 4.16 \text{ Mm}^{-1}$ 이며, 2010년 6월과 7월에 일본 도쿄에서 측

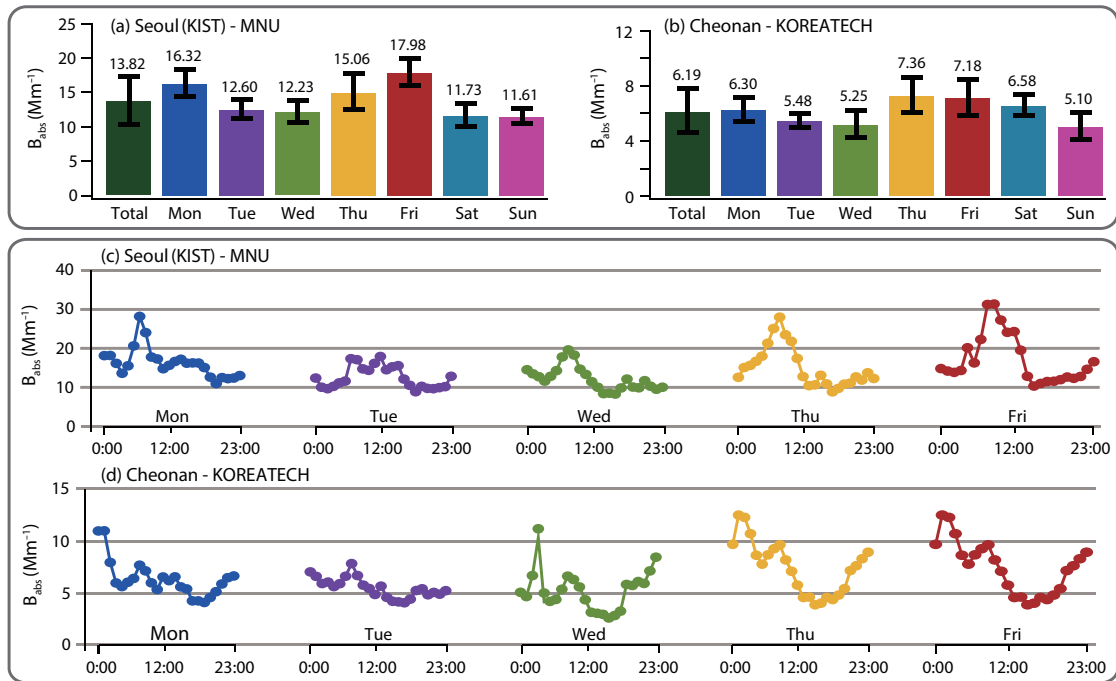


Fig. 5. (a) Day-of-week average of absorption coefficient B_{abs} (Mm^{-1}) and (b) Hour-of-day weekly series of absorption coefficient B_{abs} (Mm^{-1}) in $PM_{2.5}$ at (c) the Seoul (KIST) site and (d) the Cheonan (KOREATECH) site.

정된 평균값은 $4.29 Mm^{-1}$ 이었다(Kanaya *et al.*, 2013). KIST 측정소에서 측정된 블랙카본 흡수 계수는 도쿄에서 측정된 값보다 3.2배 높았으며 KOREATECH 측정소에서 측정된 값도 1.5배 높았다. 스페인 바르셀로나에서 측정된 블랙카본 흡수 계수는 대략 $11.2 Mm^{-1}$ 로 보고되었다(Reche *et al.*, 2011). 이는 KIST 측정소에서 측정된 값보다 대략 19% 낮은 값이지만 연평균 데이터이므로 KIST 측정소에서 측정된 값과 동등수준으로 고려될 수 있다.

블랙카본 흡수 계수의 요일별 일변화 그래프를 그림 5에 나타내었다. 표현된 블랙카본 흡수 계수는 1분 측정 결과를 각각 요일별 평균(그림 5(a),(b)) 및 요일-시간별(그림 5(c),(d))로 나타낸 것이다.

KIST 측정소에서 측정된 블랙카본 흡수 계수는 금요일에 주중 최대값($17.98 Mm^{-1}$)과 월요일에 두번째 높은 값($16.32 Mm^{-1}$)을 나타내었다. 또한, 수요일에 주말을 제외한 주중 최소값($12.23 Mm^{-1}$)을 나타내었다. 요일의 일변화를 살펴보면, 오전 8시~9시에 일 최대값 변화와 주중 최대값 변화가 일치함을 확인할 수 있

다. 이는 지역적 교통량에 따른 자동차 배기가스가 주원인임을 알 수 있다. 즉, KIST 측정소의 경우, 월요일과 금요일에 교통량 증가로 인해 블랙카본 배출이 증가하였으며 이에 따른 대기 에어로졸의 흡수 계수 또한 직접적인 영향을 받았다고 할 수 있다.

KOREATECH 측정소에서 측정된 블랙카본 흡수 계수는 KIST 측정소에서의 경우와는 달리 목요일에 주중 최대값($7.36 Mm^{-1}$)과 금요일에 두번째 높은 값($7.18 Mm^{-1}$)을 나타내었다. 주중 최소값은 KIST 측정소에서의 경우와 마찬가지로 수요일에 나타났으며 그 값은 $5.25 Mm^{-1}$ 이었다. 외국 사례를 살펴보면, 스페인 바르셀로나, 스위스 베른 등의 도회지 지역에서는 월요일에서 금요일로 갈수록 점점 블랙카본 흡수 계수가 증가하는 것을 확인할 수 있다(Reche *et al.*, 2011). 이는 서울과 타지역 도시에서의 교통 패턴이 다르기 때문인 것으로 보인다. 즉, 서울에서는 월요일과 금요일에는 자가용을 많이 이용하지만 주중에는 대중교통을 많이 이용하기 때문에 수요일에 항상 최소값을 나타내며, 유럽의 경우 자가용 출퇴근이 주중에도 일상적으

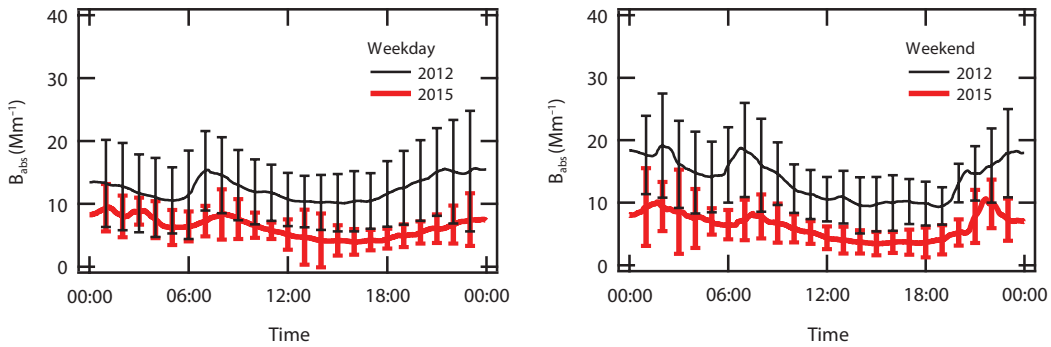


Fig. 6. Diurnal variations of black carbon absorption coefficients measured on weekday and weekend at KOREATECH site from May 19 to June, 12 in both 2012 and 2015.

로 일반화되어 있기 때문인 것으로 보여진다. 각 요일의 일변화를 살펴보면, 새벽 2시~3시경에 최대값을 기록하였으며, 이후 감소하여 다시 오전 8시~9시에 두 번째 일중 최대값을 나타내었다. KOREATECH 측정소에서 12 km 서쪽에 위치한 환경부 천안 측정소 및 12 km 동쪽에 위치한 오창읍 측정소에서 측정된 PM₁₀ 농도는 새벽 2시~3시경에 최대값을 나타내지 않았고, 최대값들은 월요일부터 금요일까지 오전 러시아워, 점심시간 및 오후 러시아워에 나타났다(<http://www.airkorea.or.kr/>). 즉, 새벽에 블랙카본 농도가 최대값을 나타낸 것은 PM₁₀의 영향은 아닌 것으로 판단된다. 하지만 2010년에서 2013년까지 4년간 KOREATECH 측정소 서쪽 5~8 km에 위치한 경부고속도로 목천 요금소에서 천안 분기점을 통과한 대형차량의 수를 조사하여 평균값을 산출한 결과, 새벽 2시~3시 사이에 20여대에서 80대로 급증하였고, 새벽 6시까지 대략 80대로 유지되는 경향을 보였다(<http://www.road.re.kr/>). 따라서, 대형트럭에서 배출되는 디젤배기물에 의해 새벽 2시~3시경에 블랙카본 농도가 최대값을 기록한 것으로 판단된다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 야간 기온 역전, 주위 산업체 야간 배출 영향 또는 주변 농업 지역에서의 소각 등을 고려한 원인과 오전시간의 지역적 자동차 배기가스에 의한 주원인이 복합적으로 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

전체적으로, 2015년 한-미 협력 국내 대기질 공동조사 연구 예비 캠페인 기간 중, 블랙카본 흡수 계수의 패턴은 평일과 주말에 큰 차이를 보이지는 않았으나, 평일보다 주말에 일일변동폭이 다소 크게 나타났다.

평일에 측정된 흡수 계수의 평균값은 6.29 Mm⁻¹였고, 표준편차는 1.67 Mm⁻¹, 일일평균값에 대한 일일변동폭은 3.36에서 11.4 Mm⁻¹로 나타났다. 2015년 주말에 측정된 흡수 계수의 평균값은 6.23 Mm⁻¹였고, 표준편차는 2.29 Mm⁻¹, 캠페인 기간 동안의 일일평균값에 대한 일일변동폭은 1.98부터 16.7 Mm⁻¹까지 나타났다.

그림 6에 나타낸 바와 같이 특이한 점은, 2012년에는 본 예비 캠페인과 동일 기간인 5월 19일에서 2012년 6월 12일까지 KOREATECH 측정소에서 측정된 블랙카본 흡수 계수는 2015년 예비 캠페인 기간동안 측정된 블랙카본 흡수계수보다 높게 측정되었다는 사실이다. 2012년에 측정된 평일 블랙카본 흡수계수의 평균값은 12.4 Mm⁻¹였고, 표준편차는 1.86 Mm⁻¹였으며, 해당 기간 동안의 일일평균값에 대한 일일변동량은 9.54에서 18.7 Mm⁻¹까지 측정되었다. 2012년 주말에 측정된 블랙카본 흡수 계수의 평균값은 13.8 Mm⁻¹로 측정되었고, 표준편차는 3.39 Mm⁻¹였으며, 해당 기간 동안의 일일평균값에 대한 일일변동폭은 8.16에서 26.3 Mm⁻¹까지로 나타났다. 2012년에는 평일보다 주말에 측정된 블랙카본 흡수계수가 다소 높았으며, 일일변동폭도 주말의 경우가 더 크게 나타났다. 2012년과 2015년의 측정에서의 특이 사항은 주말에 블랙카본 측정값의 일일변동폭이 크다는 사실이다. 이는, KOREATECH 측정소 주변 반경 15킬로미터 이내에는 독립기념관, 유관순 기념관, 워터파크 및 리조트 등의 관광지가 있어 주말에 측정 지역 주변에 이동 오염원의 변동량에 따른 영향으로 해석할 수 있다.

4. 결 론

KORUS-AQ 예비 캠페인 기간 동안 서울 KIST 측정소와 천안 KOREATECH 측정소에서 MAAP을 이용해 대기 중 블랙카본의 농도를 측정한 KIST 측정소와 KOREATECH 측정소 평균 (\pm 표준편차) 값은 각각 $2.14 \pm 1.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $0.94 \pm 0.60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 측정되어 통계적으로 유의수준 내에서 다른 값을 나타내었다. 전체 관측 기간 동안 블랙카본 질량 농도는 각각 최대 $11.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $12.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 높게 나타났다. 장거리 및 광범위 블랙카본 고농도 특성을 분석하고자 두 사례 기간을 선택하여 분석하였다. 첫 번째는 2015년 5월 22일 오후 8시부터 23일 정오 12시까지 선정하였다. 사례기간 중 평균농도는 각각 $3.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $1.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 전체 평균값에 비해 약 80%, 72% 높게 측정되었고 상관관계도 높게 나타났다. 즉, 두 측정소 간 거리가 100km 이상 떨어져 있음에도 불구하고 같은 원인에 의한 장거리 이동 물질의 영향을 받을 가능성이 크다고 판단되어 역궤적 분석을 시도한 결과, 유입된 기류의 이동 경로는 두 측정소 모두 중국 칭다오 지역에서 동해상을 거쳐 유입된 기류임이 밝혀졌다. 즉, 사례 기간중 측정된 블랙카본은 중국으로부터 한반도를 거쳐 유입된 것으로 판단된다. 다음의 사례로 6월 6일 오후 8시부터 동일 자정 12시까지 짧은 시간 동안 매우 높은 상관관계와 함께 각각 $1.91 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $1.96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 거의 같은 농도 값을 나타내었다. 역궤적 분석 결과, KIST 측정소로 충청남도 천안 지역 등에서 유입 기류 궤도를 확인할 수 있었다. 이는 (1) 충청남도 천안 지역 등에서 발생한 블랙카본 원인물질이 한국과학기술연구원 측정소로 유입될 가능성과, (2) 천안지역을 포함한 서울, 경기 전역에서 동시에 고농도 블랙카본 현상이 나타날 수 있는 두 가지 가능성으로 해석할 수 있다. 마지막으로 KOREATECH 측정소의 경우, 2012년도와 2015년도의 해당기간 동안 측정된 블랙카본 흡수계수를 비교해 본 결과 2015년도에 측정된 블랙카본이 2012년에 측정된 블랙카본 흡수계수보다 낮게 측정되었다.

감사의 글

본 연구는 환경부 환경융합신기술개발사업(201300

1650004)의 지원을 받은 연구입니다. 특히, KIST 측정소에서의 측정 및 운영에 관하여 국립환경과학원의 안준영 박사에게 감사드립니다. KOREATECH 측정소에서 일부 데이터를 수집한 차영범 군계도 감사드립니다.

References

- Collaud Coen, M., E. Weingartner, A. Apituley, D. Ceburnis, R. Fierz-Schmidhauser, H. Flentje, J.S. Henzing, S.G. Jennings, M. Moerman, A. Petzold, O. Schmid, and U. Baltensperger (2010) Minimizing light absorption measurement artifacts of the Aethalometer: evaluation of five correction algorithms, *Atmos. Meas. Tech.*, 3, 457-474.
- Draxler, R.R. and G.D. Rolph, HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (<http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>). NOAA Air Resources Laboratory, College Park, MD, 2015.
- Hansen, A.D.A., H. Rosen, and T. Novakov (1984) The aethalometer-an instrument for the real-time measurement of optical absorption by aerosol particles, *Sci. Total Environ.*, 36, 191-196.
- Haywood, J. and Olivier Boucher (2000) Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review, *Rev. Geophys.*, 38, 513-543.
- Jung, J.H. and S.S. Park (2010) Characteristics of black carbon in $\text{PM}_{2.5}$ observed in Gwangju for year 2008 and examination of filter loading effect, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 26, 392-402. (in Korean with English abstract)
- Jung, J.H., S.S. Park, K.H. Yoon, S.Y. Cho, and S.J. Kim (2011) Inter-comparison of two Aethalometer for aerosol black carbon measurements, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 27, 201-208. (in Korean with English abstract)
- Kanaya, Y., F. Taketani, Y. Komazaki, X. Liu, Y. Kondo, L.K. Sahu, H. Irie, and H. Takashima (2013) Comparison of black carbon mass concentrations observed by Multi-Angle Absorption Photometer (MAAP) and Continuous Soot-Monitoring System (COSMOS) on Fukue Island and in Tokyo, Japan, *Aerosol Sci. Technol.*, 47, 1-10.
- Lee, S., Y.S. Ghim, S.-W. Kim, and S.-C. Yoon (2010) Capability of accumulation mode aerosols containing black carbon as CCN observed during the PACDEX

- campaign, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 26, 380-391. (in Korean with English abstract)
- Lohmann, U. and J. Feichter (2001) Can the direct and semi-direct aerosol effect compete with the indirect effect on a global scale?, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 159-161.
- Miyazaki, Y., Y. Kondo, L.K. Sahu, J. Imaru, N. Fukushima, and A. Kanno (2008) Performance of a newly designed Continuous Soot Monitoring System (COSMOS), *J. Env. Monit.*, 10, 1195-1201, doi:10.1039/b806957c.
- Oh, J., J. Park, S. Lee, J. Ahn, J. Choi, S. Lee, Y. Lee, H. Kim, Y. Hong, J. Hong, J. Kim, S.-W. Kim, and G.-W. Lee (2015) Characteristics of black carbon particles in ambient air using a Single Particle Soot Photometer (SP2) in May 2013, Jeju, Korea, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 31, 255-268. (in Korean with English abstract)
- Park, K., D.B. Kittelson, and P.H. McMurry (2004) Structural properties of diesel particles measured using TEM: relationships to particle mobility and mass, *Aerosol Sci. Technol.*, 38, 881-889.
- 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, 571-578. (in Korean with English abstract)
- Petzold, A. and M. Schönlinner (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.
- Ramanathan, V. and G. Carmichael (2008) Global and regional climate changes due to black carbon, *Nature Geoscience*, 1, 221-227.
- Reche, C., X. Querol, A. Alastuey, M. Viana, J. Pey, T. Moreno, S. Rodríguez, Y. González, R. Fernández-Camacho, A.M. Sánchez de la Campa, J. de la Rosa, M. Dall'Osto, A.S.H. Prévôt, C. Hueglin, R.M. Harrison, and P. Quincey (2011) New considerations for PM, black carbon and particle number concentration for air quality monitoring across different European cities, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 6207-6227.
- Sadiq, M., W. Tao, J. Liu, and S. Tao (2015) Air quality and climate responses to anthropogenic black carbon emission changes from East Asia, North America and Europe, *Atmos. Environ.*, 120, 262-276.