

대도시 유해대기오염물질 관리를 위한 블랙카본 모니터링*

김 영 성**

Black Carbon Monitoring for Managing Hazardous Air Pollutants in the Metropolitan Area*

Young Sung Ghim**

요약 : PM은 오늘날 국제적으로 가장 널리 통용되는 먼지의 지표이다. 우리나라도 1995년 PM₁₀ 환경기준을 도입하였고 2015년부터 PM_{2.5} 환경기준을 시행하고자 준비 중이다. 그러나 PM 관리는 비산먼지, 장거리 이동, 2차 생성 등 까다롭고 복잡한 문제를 고려하여야 한다. 이번 논문에서는 서울을 비롯한 대도시에 대하여 BC 모니터링을 제안하였다. 경유차 배출과 생물성 연소 등 불완전 연소에 의한 유해물질을 포괄적으로 대변할 수 있고, CO₂ 다음으로 중요한 지구 온난화 물질이며, 입자의 화학성분임에도 다른 물질과 달리 비교적 저렴하게 농도를 감시할 수 있기 때문이다. 대도시는 인구 밀도가 높아 배출원에 인접한 고농도 지역에도 인구가 많으며 보호받아야 할 취약계층이 오히려 열악한 환경에 빈번하게 노출되는 문제를 안고 있다. 논문의 제안이 수용되어 BC 배출과 농도 분포를 파악하기 위한 조사가 실시되고 값싸고 간편한 측정장비가 갖추어진다면 도시 곳곳에서 BC를 모니터링함으로써 유해물질을 감시할 수 있다.

주제어 : 위해성 관리, 경유차 배출 입자, 광학적 측정, PM_{2.5}, 비산먼지

ABSTRACT : Particulate matter(PM) is widely used as an indicator of the airborne particles. Korea introduced a PM₁₀ air quality standard in 1995 and is preparing to introduce a PM_{2.5} air quality standard in 2015. However, PM management needs to consider difficult and complex issues such as fugitive dust, long-range transport, and secondary formation. In this paper, black carbon(BC) monitoring for metropolitan areas including Seoul is proposed. BC can broadly represent hazardous materials as a result of incomplete combustion such as diesel exhaust and biomass burning, is a significant contributor to global warming next to CO₂, and, albeit particles, can be monitored at low cost relative to other particle components which require detailed chemical analysis. In most metropolitan areas, high populations exist within and adjacent to emission sources around which low-income populations mainly live, and thus these populations are disproportionately affected by poor environmental conditions. If the studies investigating the spatial distribution of BC emissions and concentrations are performed, and inexpensive and simple devices for monitoring BC are available for the proposed work, hazardous materials can be monitored using BC as a surrogate as appropriate.

Key Words : risk management, diesel particulate matter(DPM), optical measurement, PM_{2.5}, fugitive dust

* 이 연구는 한국외국어대학교 교내학술연구의 일환으로 수행되었습니다.

** 한국외국어대학교 환경학과 교수(Professor, Department of Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies), E-mail: ysghim@hufs.ac.kr, Tel: 031-330-4993

I. 서론

유기물질이 불완전 연소되면 매연(soot)이 발생한다. 매연은 탄소가 농축된 물질이다. 경유차와 같이 온도가 높고 산소가 원활하게 공급되는 등 조건이 좋으면 불완전 연소라 하여도 대부분의 휘발분이 연소되어 거의 탄소만이 남는 데 비하여 노천소각과 같이 연소조건이 나쁘면 상당량의 휘발분이 잔류한다. 이에 따라 매연을 수소와 같은 휘발성 물질과 결합된 유기탄소(organic carbon, OC)와 원소탄소(elemental carbon, EC)로 구분한다(Chow et al., 2001; Watson et al., 2005). OC와 EC는 모두 연소과정에서 배출되지만 대부분이 탄소인 EC가 주로 빛을 흡수하는 데 비하여 OC는 탄소의 분율에 따라 빛을 산란시키거나 일부 흡수한다(Andreae and Gelencsér, 2006; Russell et al., 2010).

블랙카본(black carbon, BC)은 EC를 광학적 측면에서 지칭한 것이다. 그러나 OC와 EC가 화학적으로 엄밀하기보다 편의에 따라 구분된 만큼, BC와 EC도 정확히 일치하지 않는다. 최근에는 EC보다 BC가 더 많이 사용되는 경향을 볼 수 있다(Putaud et al., 2003; NARSTO, 2004). 기후변화에 대한 관심이 높아졌고, 화학적으로 EC를 정의하기보다 광학적으로 BC를 정의하는 것이 용이한 이유 등을 생각할 수 있지만 분명하지 않다.

BC가 광학적으로 정의된 만큼 BC를 논의할 때는 기후변화가 중심이 되는 것이 보통이다(UNEP and WHO, 2011). 하지만 BC와 EC가 거의 동일한 물질임을 감안하면 BC로 대표되는 탄소물질은 대기오염물질 중 가장 위험한 물질의 하나이다. BC가 아니라 EC로 대표되는 물질이라고 한 것은 에어로졸의 성분별 위해성에 대한 연구가

아직 미흡한 데 비하여(NARSTO, 2004), 성분을 토대로 기원을 추정하여 기원별 위해성을 조사하고자 하는 시도가 활발하기 때문이다(Laden et al., 2000; Ito et al., 2006). 차량 배출 비중이 큰 도시에서 BC는 경유차 배출의 지표인데, 최근 LA 지역을 대상으로 한 조사에 의하면 유해대기 오염물질에 의한 추가 발암 위해성의 83%가 경유차 배출 입자(DPM, diesel particulate matter) 때문이었다(SCAQMD, 2008).

우리나라는 수도권의 대기환경을 개선하기 위하여 2005년부터 특별법을 시행하고 있으며 2014년까지 1차로 서울의 연평균 PM_{10} 을 $40\mu g/m^3$ 로 낮추기 위하여 노력하고 있다. 그러나 PM_{10} 의 상당 부분이 위해성이 크지 않은 토양물질이며, 토양물질의 기원인 비산먼지는 배출량이 많은 데 비하여 입경이 커서 체류 시간이 짧은 까닭에 대기 중 농도에 대한 기여도가 적고 배출의 형태가 다양하여 관리에 어려움이 많다. 정부에서는 2015년부터 비산먼지의 영향이 작고 위해성과 밀접한 $PM_{2.5}$ 에 대하여 환경기준을 도입하고자 준비하고 있다. 하지만 PM_{10} 보다 작더라도 $PM_{2.5}$ 에도 4~12%의 광물먼지가 포함되어 있고(한국대기환경학회, 2006; 서울시정개발연구원, 2010), 장거리 이동과 2차 생성의 비중이 커서 비산먼지에 못지 않게 대책이 쉽지 않다(김영성, 2005; 한국대기환경학회, 2009). 뿐만 아니라 2차 생성물질 중에서 비중이 큰 황산염, 질산염 등 2차 무기이온의 위해성도 문헌에 따라 차이가 크다(Ito et al., 2006; Maynard et al., 2007; Samat et al., 2008).

이 논문은 서울을 비롯한 대도시 지역에 대하여 BC 모니터링을 제안하기 위한 것이다. (1) 기계, 입자에 상관없이 도시지역의 많은 유해물질이 차량 배출의 비율이 높고(USEPA, 2000), (2) 벤젠,

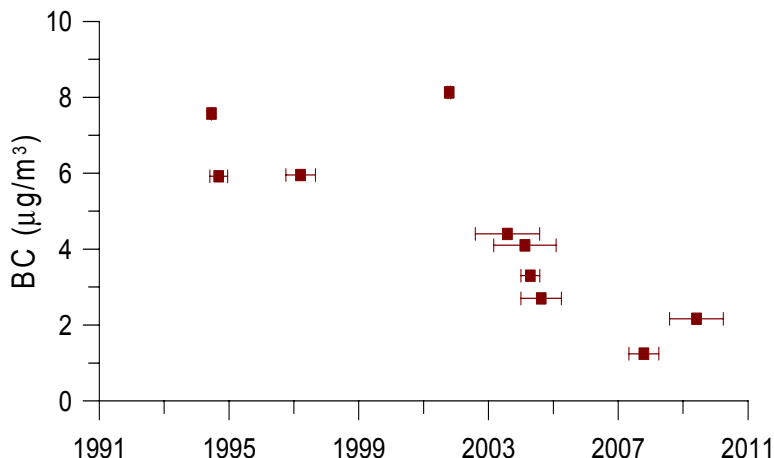
포름알데히드, 1,3-부타디엔, PAHs(polycyclic aromatic hydrocarbons) 등 차량 배출 비율이 높은 대부분의 유해물질이 경유차로부터 배출되며, (3) DPM은 경유차 배출의 척도이고(USEPA, 2002), (4) DPM을 직접 측정할 수 있는 기술이 아직 확립되지 않은 상황에서 BC가 DPM의 대표적인 지표이기 때문이다(SCAQMD, 2008). 요약하면 BC는 차량 배출의 영향이 큰 도시의 위해성을 가장 잘 대변할 수 있는 물질이다. 이번 논문에서는 수도권의 BC 농도 수준을 살펴보고, BC 모니터링의 타당성과 가능성을 점검한다.

II. BC 농도 수준

〈그림 1〉은 지난 20년간 수도권의 BC 농도 변화이다. 자료로는 강충민(2003), 박진수·김신도(2005), 서울시정개발연구원(2010), 이형우 외(2009), 한국대기환경학회(2006), 한진석 외(1996), Kang et al.(2004), Kim et al.(1999, 2006, 2007) 등을 이용하였다. 1994년부터 2010년까지 KIST를 비롯하여 건국대, 서울시립대 등에서 측정하였으며 대부분 서울 자

료이나 수원 경희대의 자료가 일부 포함되었다. 탄소 분석에는 IMPROVE(Interagency Monitoring of Protected Visual Environments, <http://vista.cira.colostate.edu/improve/>) TOR(thermal optical reflectance), NIOSH(National Institute of Occupational Safety and Health) TOT(thermal optical transmittance), TMO(thermal manganese dioxide oxidation) 등 다양한 방법이 사용되었다. 각각의 방법이 차이가 있는 만큼 비교 연구도 많으나(Watson et al., 2005) 지금 논문에서는 경향을 개략적으로 알아보고자 하였기 때문에 논문에 주어진 값을 그대로 이용하였다.

2000년대 이후 감소 경향이 뚜렷한데 CNG(compressed natural gas) 버스 보급이 본격화된 2002년 즈음부터(연합뉴스, 2010. 8. 10) BC 농도가 급격히 저하되는 등 정책의 효과를 짐작할 수 있는 부분도 있다. 실제 2002~2005년 기간 변화가 주로 서울시립대에서 측정되었고 서울시정개발연구원(2010)의 2008~2010년 자료는 서울 전역에 분포된 4개 측정소 평균으로 어느 자료보다 대표성이 있어 이와 같은 사실을 뒷받침하고 있



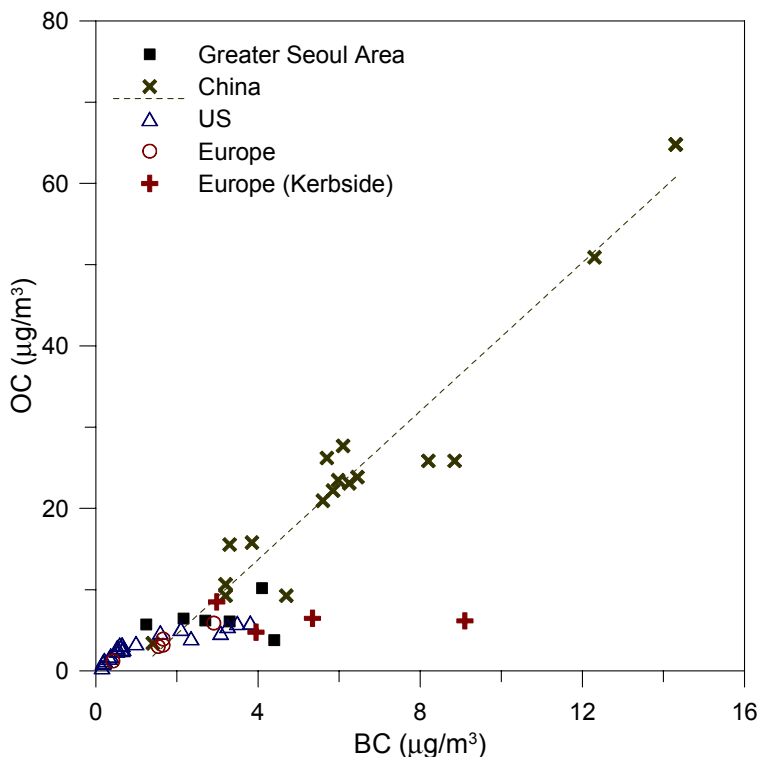
〈그림 1〉 지난 20년간 수도권 PM_{2.5} BC 농도 변화. 가로 선은 측정기간을 표시. 자료 출처는 본문 참조

다. 하지만 앞에서 언급한 분석 방법의 차이 외에 2002년 이전에는 고농도 시기를 중심으로 단기간을 측정된 경향이 있어 유의가 필요하다(한국의국어대학교, 2007).

〈그림 2〉는 2002년 이후 수도권의 BC 농도를 세계 다른 지역과 비교한 것이다. OC 농도를 함께 표시하였는데 차량 배출 비중이 클 때에는 OC/EC 비가 낮지만 노천소각이나 바이오매스 연소 비중이 클 때에는 OC/EC 비가 커지는 등 BC 기원에 대한 정보를 알 수 있기 때문이다(Watson et al., 1998). 기온이 높아 광화학 반응이 활발하거나 장거리 이동에 따라 대기 중 체류시간이 길 때에도 2차 생성 OC가 더해지며 OC/EC 비가 커진다(Turpin and Huntzicker, 1995; Lim and Turpin,

2002). 중국은 14개 도시 2003년 1월과 6~7월 평균 농도이다(Cao et al., 2007). 2002년 이후 우리나라 수도권의 평균이 BC $1.2\sim 4.4\mu\text{g}/\text{m}^3$, OC $3.8\sim 10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 데 비하여 중국의 BC, OC는 각각 $3.2\sim 14\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $9.3\sim 65\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 중간값 기준 OC는 3.8배, BC는 2.0배 높다. Cao et al.(2007)은 OC가 높은 원인으로 Duan et al.(2004), Ma et al.(2003) 등이 주목한 바이오매스 혹은 바이오 연료 연소 대신 주거지역 석탄사용을 지적하였는데 측정 지점이 도시지역이었기 때문으로 추정된다.

미국은 1999~2003년 미국 남동부 8개 지점(Edgerton et al., 2005), 1995.1~1996.2 기간 남부 캘리포니아 SCAB(South Coast Air Basin) 5개 지점(Kim et al., 2000), 1999년 여름 미국 북동부

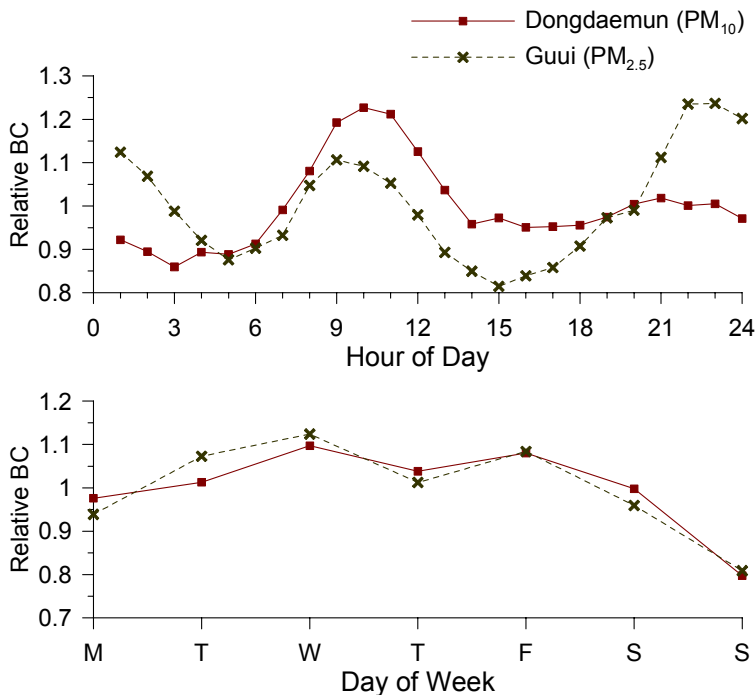


〈그림 2〉 지역별 $\text{PM}_{2.5}$ OC와 BC 농도. 수도권은 〈그림 1〉의 2002년 이후 자료. 중국 자료에서 점선은 최적합치선. 자료의 출처는 본문 참조

부터 태평양 연안까지 5개 구역(Yu et al., 2004) 평균 농도이다. 구역 평균은 배경 지역을 대상으로 한 IMPROVE 자료가 많아 농도가 가장 낮고, SCAB 지점의 농도가 대체로 높다. SCAB은 2002년 이후 수도권과 비교하여 중간값 기준 OC 84%, BC 106%로 유사하다. 유럽은 지점에 따라 차이가 있으나 대략 1990년대 중반부터 2000~2001년 기간 시골과 도시, 도로변 등 8개 지점의 자료이다(Putaud et al., 2003). 시골과 도시의 OC와 EC는 미국과 유사하다. 도로변 2개 지점에서는 차량 배출의 영향으로 BC가 특히 높다. 서울시정개발연구원(2010)에서도 도로변을 측정하였으나 OC/EC 비가 도시대기를 측정한 다른 지점과 크게 다르지 않았다. 도로변 측정 지점이 교차로에 인접하여 주행 중 배출 특성이 뚜렷하게 반영되지

못한 결과일 수 있다.

〈그림 1, 2〉의 탄소 농도가 지금까지 대부분의 연구와 같이 필터팩을 이용하여 24시간 평균을 측정한 데 비하여 서울시정개발연구원(2010)에서는 연속 측정 장비를 이용하여 1시간 평균을 측정하였다. 〈그림 3〉은 도로변인 동대문과 도시대기를 측정한 구의의 하루 중 시간대별과 요일별 평균 농도이다. 변화 모습을 비교하기 위하여 측정소별 평균에 대한 상대농도를 표시하였다. 요일별 변화에서는 일요일 농도 저하가 뚜렷하고 측정소별 차이가 크지 않다. 시간대별 변화에서는 아침 피크만이 유사할 뿐 이후에는 다르다. 보편적으로 차량 배출물질의 농도 변화에서 나타나는 아침 피크는 출근 시간대 차량 배출이 특별히 많기보다 혼잡도가 아직 발달하지 않은 상태에서 배출이 증가



〈그림 3〉 동대문과 구의 측정소의 BC 변화. 동대문은 PM₁₀, 구의는 PM_{2.5} 중 BC를 측정. 각각의 평균 농도는 3.54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 2.05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. 시간대별과 요일별 평균 농도를 측정소별 평균 농도로 나눈 상대 농도를 표시, 자료 : 서울특별시보건환경연구원

하기 때문이다. 이후 차량 배출은 거의 일정하여도 혼합고가 상승하면서 농도가 저하되고 저녁 때 혼합고가 낮아지며 농도가 상승하며, 한밤에는 차량 통행량과 함께 배출이 줄면서 농도도 낮아진다. 구의의 변화 모습과 거의 유사하다. 구의에서는 아침 피크보다 늦은 밤시간대 피크가 큰데 차량 외 연소 배출의 영향이 있을 수 있다. 계절별로 시간대별 변화를 조사할 때 밤시간대 피크는 주로 겨울에 두드러진다(Park et al., 2006; Rattigan et al., 2010). 동대문의 아침 피크는 구의보다 늦게 나타나는데 일사(solar insolation)뿐 아니라 차량 통행에 의하여 혼합고가 발달되면서 나타난 현상으로 추정되지만 명확하지 않다.

III. BC 모니터링

도시지역 유해물질의 가장 중요한 기원이 차량이고 BC가 차량 배출 중 가장 위대한 경유차 배출 입자의 중요한 지표라는 점에서 BC 모니터링이 필요함을 서론에서 설명하였다. 지금 논문에서는 PM_{10} 이나 $PM_{2.5}$ 가 위해성을 충분히 대변하지 못하기 때문에 BC 모니터링을 제안하였다. 그러나 유럽에서는 PM 이전에 이미 유해물질로서 BS(black smoke)를 광범위하게 측정하였으며 대부분의 나라가 PM_{10} 농도를 보고한 OECD(2002)에도 영국, 터키, 폴란드 등 다수의 나라가 BS로 농도를 보고하였다. BC가 주로 $1\mu m$ 이하 미세입자에 존재하기 때문에 $PM_{2.5}$ 를 측정하고자 하는 데 비하여 BS는 $4.5\mu m$ 보다 작은 입자의 반사를 측정하는 정도가 다를 뿐 두 물질이 유사하다(Anderson et al., 2004; Hoek et al., 1997). 유럽에 PM_{10} 이 보급되기 시작한 1990년대 이후에도 다수의 논문이 BS와 PM_{10} 의 위해성을 비교하며 연소

배출물의 지표인 BS가 위해성과 상관성이 높음을 지적하였고(Bremner et al., 1999; Katsouyanni et al., 2001), WHO(2003)에서는 대기질 지침을 BS로 제시하는 방안을 검토하도록 권고하기도 하였다.

유럽에서는 차량 배출과 함께 석탄 연소가 BS의 주요 기원으로 거론되는데 우리나라에서는 차량 배출 외 바이오매스 연소와 고기구이 등 생물성 연소를 BC의 기원으로 생각할 수 있다(한국대기환경학회, 2009). 서울시정개발연구원(2010)에서는 구의에서 BC가 밤에 상승하는 원인으로 생물성 연소를 추정하였다. 실제 인도 북부에서 개량된 연소로를 보급하여 BC 배출 저감 효과를 조사하는 Surya 프로젝트는 개발도상국에서 많이 이용되는 바이오 연료가 대상이다(<http://www.projectsurya.org/>; Kar et al., 2012). 도시지역에서 가장 위대한 경유차 배출 입자의 지표로서 BC를 주목하였지만 경유차 외에도 불완전 연소에 따른 유해물질을 대변할 수 있음을 보여주는 결과이다. 이와 같은 BC의 모습은 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 가 국제적으로 통용되며 우리나라에 도입하였으나 위해성이 낮은 비산먼지의 비율이 높고 규제가 어려운 장거리 이동의 영향이 커서 어려움을 겪고 있는 것과는 다르다.

서론에서 잠시 언급하였지만 최근 국제 학계의 BC에 대한 관심은 주로 기후변화 때문이다. BC가 기후변화에 미치는 영향에 대하여 다양한 연구들이 진행되고 있으며(예를 들면, Menon et al., 2002; Evan et al., 2011) 빛의 흡수에 의한 온난화 효과만을 보아도 CO_2 의 약 55%로 CO_2 외 다른 어떠한 온실가스보다 크다(Ramanathan and Carmichael, 2008). 많은 대기오염물질과 CO_2 가 연소 과정에서 배출되기 때문에 온실가스를 효과적으로 감축할 수 있는 수단으로 대기오염물질과 CO_2 의 통합 관리가 시도되고 있다. 하지만 작은

양으로도 위대한 오염물질과 절대량의 감축이 중요한 CO₂의 통합관리는 생각과 같이 간단하지 않다(한국대기환경학회, 2009). BC는 의무감축 대상물질이 아니지만 학계에서 논의되는 것과 같이 기후변화에 미치는 영향이 크다면 BC 감축은 위해성뿐 아니라 온난화 대응을 위하여서도 필요하다(Baron et al., 2009; Molina et al., 2009).

Surya 프로젝트에서는 열악한 환경의 개발도상국 시골 부락을 대상으로 기후변화 대응과 함께 위해성 저감을 위하여 BC 감축을 추진하고 있다. 차량 배출 비중이 큰 서울에서 BC를 감축한다면 도로변의 BC 농도 저감이 1차 목표일 수 있다. 국내에서는 구체적 자료를 발견하기 어려우나 미국이나 유럽에서는 도로변에 가난한 취약 계층이 거주함으로써 유해물질 노출이 많다는 연구결과가 적지 않다(Gunier et al., 2003; Ponce et al., 2005). Surya 프로젝트에서는 시골 부락 실내의 구형 연소로와 인근의 고속도로 차량 등에 의한 BC 농도를 상용화된 기기뿐 아니라 소형 간이 기기와 휴대전화 카메라를 이용하여 측정하였다(Ramanathan et al., 2011; Rehman et al., 2011). 서울이라면 교통이 혼잡한 도로변이나 고체 연료 사용이 많은 상업지역이나 주거지역을 대상으로 배출 저감을 추진하고 농도 감소를 점검할 수 있다. CNG 버스의 보급과 경유차 저공해화, 고체연료 사용 제한 등 이미 많은 대책이 수행된 상황에서 추가로 BC 배출을 줄여야 한다는 점에서는 Surya 프로젝트보다 월등하게 어렵다. 하지만 차량 배출의 경우도 운행 관리를 병행하고, 고농도 노출 지점에 대해서는 노출을 제어할 수 있는 방안을 함께 고려한다면 배출 저감만을 추진할 때보다 효과적일 수 있다. Surya 프로젝트에서 볼 수 있는 것과 같이 BC가 입자의 화학성분임에도 광

학적으로 측정이 용이하기 때문에 상대적으로 저렴하게 필요한 곳에서 노출을 감시하고 대책의 효과를 점검할 수 있다는 것은 BC 모니터링의 큰 장점이다.

IV. 맺는 말

서울을 비롯한 대도시에 대하여 BC(black carbon)의 모니터링을 제안하였다. 환경기준 시행을 준비 중인 PM_{2.5}는 PM₁₀에 비하여 위해성과 밀접하고 비산먼지의 비중이 작으나 장거리 이동과 2차 생성의 영향이 커서 PM₁₀에 못지않게 대책이 쉽지 않다. BC는 경유차 배출을 비롯하여 생물성 연소 등 불완전 연소에 의한 유해물질을 포괄적으로 대변할 수 있다. 뿐만 아니라 CO₂ 다음으로 중요한 지구 온난화 물질이다. 입자의 화학성분임에도 다른 물질과 달리 비교적 저렴하게 농도를 감시할 수 있다. BC의 장거리 이동에 관한 연구는 많지 않다. 2차 이온 등에 비해서는 반응성이 크지 않기 때문에 장거리 이동이 용이하다고 생각할 수 있으나(Park et al., 2005), 오염물질의 건강 영향에서는 국지배출이 중요한 것이 보통이다(Mauzerall, 2011). 고농도가 강조되기 때문으로 추정되나 확실하지 않다. 도시지역에서는 BC 배출이 많으므로 더욱 국지배출의 영향이 크다(Cao et al., 2007).

인체 위해성과 밀접한 까닭에 BS(black smoke)를 관리하던 유럽에서 1990년대 이후 PM을 관리하고 있는 이유에 대해서는 좀더 조사가 필요하다. 하지만 위해성 저감이 목적이라면 비산먼지와 장거리 이동, 2차 생성 등 하나같이 쉽지 않은 많은 문제를 고려하여야 하는 PM보다 직접적인 효과를 기대할 수 있는 BC를 관리하는 것이 합당하다. 다른 선진국에서 PM₁₀, PM_{2.5}를 관리하는 상

황에서 당장 BC 관리가 어려울 수 있다. 그러나 미국 동부와 서유럽과 같은 지역은 비산먼지 영향이 거의 없을 뿐 아니라 오랜 기간 대기환경관리를 위하여 노력한 까닭에 장거리 월경 대기오염에 관한 제네바 협약(Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution, <http://www.unece.org/env/lrtap/welcome.html>) 등 장거리 이동과 2차 생성에 대한 대응체계도 갖추어져 있다. 이들 지역에서 PM 관리는 위해성을 포함한 다양한 오염현상을 함께 관리할 수 있으므로 오히려 유리할 수 있다.

Prospero et al.(2002)의 먼지 벨트에서 볼 수 있는 것과 같이 비산먼지는 미국 동부와 서유럽을 제외한 많은 지역에서 중요하다. 또 다른 지역에서는 바이오매스/바이오연료 연소에 의한 탄소물질 문제가 심각하다(Eck et al., 2010). 미국과 서유럽 밖에 위치한 우리나라에서 수도권 특별법을 시행하며 먼저 맞닥뜨렸을 뿐 비산먼지, 장거리 이동, 2차 생성은 많은 나라에서 취급이 까다롭고 당장의 효과를 기대하기 어렵다. 반면 Surya 프로젝트에서 볼 수 있는 것과 같이 탄소물질에 대한 조치는 지금 필요하고 효과를 확인하기도 용이하다. 대도시는 인구 밀도가 높아 도로변과 같이 배출원에 인접한 고농도 지역에도 인구가 많고 보호받아야 할 취약계층이 방어 능력이 부족한 까닭에 오히려 열악한 환경으로 내몰리는 구조적 문제를 안고 있다. 대도시 BC 모니터링은 지역을 막론하고 앞으로 더욱 심화될 대도시 문제를 완회시키는 중요한 발걸음이 될 수 있다는 점에서도 의미가 크다.

이번 논문에서 BC 모니터링을 제안하였으나 엄밀하게 이야기하면 유해물질 관리를 위한 BC 모니터링에 대하여 논의할 것을 제안한 것이다.

논문에서 제시한 필요성과 타당성, 가능성은 긍정적인 측면이며 본격적으로 논의가 진행된다면 다양한 문제들이 제기될 수 있다. 논문에서의 설명에도 불구하고, 아직 세계 어느 지역에서도 BC 모니터링을 본격적으로 실시하고 있지 않다든지, BC가 유해물질을 얼마나 대변할 수 있는지 등은 여전히 중요한 문제이다. 논문에서 언급하지 않았으나 관점에 따라서는 BC 자체의 위해성이 아직 명확하게 밝혀지지 않았다는 점도 논란이 될 수 있다. 본격적 논의를 거쳐 BC 모니터링을 실시한다면 우선적으로 대상지역의 BC 배출과 농도 분포를 파악하기 위한 조사와 함께 BC 측정 장비 개발이 필요하다. 측정 장비가 충분히 값싸고 간편하다면 범죄 예방을 위한 CCTV(closed-circuit television)와 같이 도시 곳곳에서 BC를 측정함으로써 유해물질을 감시할 수 있다.

참고문헌

- 강충민, 2003, "Characteristics of the fine particles and source apportionments using the CMB model in Seoul area", 건국대학교 박사학위논문.
- 김영성, 2005, "수도권 대기질 관리의 쟁점과 과제", 『환경정책연구』, 4(1): 1~19.
- , 2011, "황사의 대기환경영향", 『한국대기환경학회지』, 27: 255~271.
- 박진수·김신도, 2005, "서울과 인천지역 PM10과 PM2.5 중 2차생성 탄소성분 추정", 『한국대기환경학회지』, 21: 131~140.
- 서울시정개발연구원, 2010, 『서울시 대기 중 미세먼지의 상세모니터링을 통한 미세먼지 특성조사 연구』, 서울특별시.
- 이형우·이태정·김동술, 2009, "PMF 모델을 이용한 미세먼지의 오염원 확인과 기여도 추정: 탄소성분을 이용한 휘발유 및 경유차량 오염원의 분리", 『한국대기환경학회지』, 25: 75~89.
- 한국대기환경학회, 2006, 『대도시 대기질 관리방안 조사 연구(IV): 미세먼지 생성과정 규명과 저감대책 수

- 립], 국립환경과학원.
- _____, 2009, 『수도권 대기환경관리 기본계획 개선·보완 대책 마련을 위한 연구』, 환경부.
- 한국의국어대학교, 2007, 『서울시 미세먼지 특성분석 기본 연구』, 서울특별시.
- 한진석·김병곤·김신도, 1996, “1994년 수도권 지역에서 의 시정과 미세 입상물질 화학조성과의 관계해 석”, 『한국대기보전학회지』, 12: 377~387.
- Anderson, H.R., Atkinson, R.W., Peacock, J.L., Marston, L., and Konstantinou, K., 2004, *Meta-analysis of Time-series Studies and Panel Studies of Particulate Matter(PM) and Ozone(O₃)*, Report of a WHO(World Health Organization) task group, WHO Regional Office for Europe: Copenhagen, Denmark.
- Andreae, M.O., and Gelencsér, A., 2006, “Black carbon or brown carbon? The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols”, *Atmos. Chem. Phys.*, 6: 3131~3148.
- Baron, R.E., Montgomery, W.D., and Tuladhar, S.D., 2009, *An Analysis of Black Carbon Mitigation as a Response to Climate Change*, Copenhagen Consensus Center: Frederiksberg, Denmark.
- Bremner, S.A., Anderson, H.R., Atkinson, R.W., McMichael, A.J., Strachan, D.P., Bland, J.M., and Bower, J.S., 1999, “Short term associations between outdoor air pollution and mortality in London 1992-4”, *Occup. Environ. Med.*, 56: 237~244.
- Cao, J.J., Lee, S.C., Chow, J.C., Watson, J.G., Ho, K.F., Zhang, R.J., Jin, Z.D., Shen, Z.X., Chen, G.C., Kang, Y.M., Zou, S.C., Zhang, L.Z., Qi, S.H., Dai, M.H., Cheng, Y., and Hu, K., 2007, “Spatial and seasonal distributions of carbonaceous aerosols over China”, *J. Geophys. Res.*, 112: D22S11, doi:10.1029/2006JD008205.
- Chow, J.C., Watson, J.G., Crow, D., Lowenthal, D.H., and Merrifield, T., 2001, “Comparison of IMPROVE and NIOSH carbon measurements”, *Aerosol Sc. Technol.*, 34: 23~34.
- Duan, F., Liu, X., Yu, T., and Cachier, H., 2004, “Identification and estimate of biomass burning contribution to the urban aerosol organic carbon concentrations in Beijing”, *Atmospheric Environ- ment*, 38: 1275~1282.
- Eck, T.F., Holben, B.N., Sinyuk, A., Pinker, R.T., Goloub, P., Chen, H., Chatenet, B., Li, Z., Singh, R.P., Tripathi, S.N., Reid, J.S., Giles, D.M., Dubovik, O., O'Neill, N.T., Smirnov, A., Wang, P., and Xia, X., 2010, “Climatological aspects of the optical properties of fine/coarse mode aerosol mixtures”, *J. Geophys. Res.*, 115: D19205, doi:10.1029/2010JD014002.
- Edgerton, E.S., Hartsell, B.E., Saylor, R.D., Jansen, J.J., Hansen, D.A., and Hidy, G.M., 2005, “The Southeastern Aerosol Research and Characterization Study: Part II. Filter-based measurements of fine and coarse particulate matter mass and composition”, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 55: 1527~1542.
- Evan, A.T., Kossin, J.P., Chung, C.E., and Ramanathan, V., 2011, “Arabian Sea tropical cyclones intensified by emissions of black carbon and other aerosols”, *Nature*, 479: 94~97.
- Gunier, R.B., Hertz, A., von Behren, J., and Reynolds, P., 2003, “Traffic density in California: socioeconomic and ethnic differences among potentially exposed children”, *J. Exposure Anal. Environ. Epidemiol.*, 13: 240~246.
- Hoek, G., Welinder, H., Vaskovi, E., Ciacchini, G., Manalis, N., Røyset, O., Reponen, A., Cyrys, J., and Brunekreef, B., 1997, “Interlaboratory comparison of PM₁₀ and black smoke measurements performed in the framework of the PEACE study”, *Atmospheric Environment*, 31: 3341~3349.
- Ito, K., Christensen, W.F., Eatough, D.J., Henry, R.C., Kim, E., Laden, F., Lall, R., Larson, T.V., Neas, L., Hopke, P.K., and Thurston, G.D., 2006, “PM source apportionment and health effects: 2. An investigation of intermethod variability in associations between source-apportioned fine particle mass and daily mortality in Washington, DC”, *J. Exposure Sci. Environ. Epidemiol.*, 16: 300~310.
- Kang, C.-M., Lee, H.S., Kang, B.-W., Lee, S.-K., and Sunwoo, Y., 2004, “Chemical characteristics of acidic gas pollutants and PM_{2.5} species during hazy episodes in Seoul, South Korea”,

- Atmospheric Environment*, 38: 4749~4760.
- Kar, A., Praveen, P.S., Suresh, R., Rehman, I.H., Singh, L., Singh, V.K., Ahmed, T., Burney, J., and Ramanathan, V., 2012, "Real-time assessment of black carbon pollution in Indian households due to traditional and improved biomass cookstoves", *Environ. Sci. Technol.*, 46: 2993~3000.
- Katsouyanni, K., Touloumi, G., Samoli, E., Gryparis, A., LeTerte, A., Monopolis, Y., Rossi, G., Zmirou, D., Ballester, F., Boumghar, A., Anderson, H.R., Wojtyniak, B., Paldy, A., Braunstein, R., Pekkanen, J., Schindler, C., and Schwartz, J., 2001, "Confounding and effect modification in the short-term effects of ambient particles on total mortality: results from 29 European cities within the APHEA2 project", *Epidemiology*, 12: 521~531.
- Kim, B.M., Teffera, S., and Zeldin, M.D., 2000, "Characterization of PM_{2.5} and PM₁₀ in the South Coast air basin of southern California: Part 1 - spatial variations", *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 50: 2034~2044.
- Kim, H.-S., Huh, J.-B., Hopke, P.K., Holsen, T.M., and Yi, S.-M., 2007, "Characteristics of the major chemical constituents of PM_{2.5} and smog events in Seoul, Korea in 2003 and 2004", *Atmospheric Environment*, 41: 6762~6770.
- Kim, Y.J., Kim, K.W., Kim, S.D., Lee, B.K., and Han, J.S., 2006, "Fine particulate matter characteristics and its impact on visibility impairment at two urban sites in Korea: Seoul and Incheon", *Atmospheric Environment*, 40: S593~S605.
- Kim, Y.P., Moon, K.-C., Lee, J.H., and Baik, N.J., 1999, "Concentrations of carbonaceous species in particles at Seoul and Cheju in Korea", *Atmospheric Environment*, 33: 2751~2758.
- Laden, F., Neas, L.M., Dockery, D.W., and Schwartz, J., 2000, "Association of fine particulate matter from different sources with daily mortality in six U.S. cities", *Environ. Health Perspect.*, 108: 941~947.
- Lim, H.-J., and Turpin, B.J., 2002, "Origins of primary and secondary organic aerosol in Atlanta: results of time-resolved measurements during the Atlanta supersite experiment", *Environ. Sci. Technol.*, 36: 4489~4496.
- Ma, Y., Weber, R.J., Lee, Y.-N., Orsini, D.A., Maxwell-Meier, K., Thornton, D.C., Bandy, A.R., Clarke, A.D., Blake, D.R., Sachse, G.W., Fuelberg, H.E., Kiley, C.M., Woo, J.-H., Streets, D.G., and Carmichael, G.R., 2003, "Characteristics and influence of biomass on the fine-particle ionic composition measured in Asian outflow during the Transport and Chemical Evolution Over the Pacific (TRACE-P) experiment", *J. Geophys. Res.*, 108(D21): 8816, doi:10.1029/2002JD003128.
- Mauzerall, D., 2011, "Long-range transport of air pollution", Health Effects Institute Annual Meeting, May 3, Boston, MA.
- Maynard, D., Coull, B.A., Gryparis, A., and Schwartz, J., 2007, "Mortality risk associated with short-term exposure to traffic particles and sulfates", *Environ. Health Perspect.*, 115: 751~755.
- Menon, S., Hansen, J., Nazarenko, L., and Luo, Y., 2002, "Climate effects of black carbon aerosols in China and India", *Science*, 297: 2250~2253.
- Molina, M., Zaelke, D., Sarma, K.M., Andersen, S.O., Ramanathan, V., and Kanariuf, D., 2009, "Reducing abrupt climate change risk using the Montreal Protocol and other regulatory actions to complement cuts in CO₂ emissions", *P. Natl. Acad. Sci., USA*, 106: 20,616~20,621.
- NARSTO, 2004, *Particulate Matter Assessment for Policy Makers: A NARSTO Assessment*, Edited by P. McMurry, M. Shepherd, and J. Vickery, Cambridge University Press: Cambridge, England.
- OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development), 2002, *Environmental Data Compendium 2002* http://www.oecd.org/document/21/0,2340,en_2649_34303_2516565_1_1_1_1,00.html, accessed November 2004.
- Park, K., Chow, J.C., Watson, J.G., Trimble, D.L., Doraiswamy, P., Park, K., Arnott, W.P., Stroud, K.R., Bowers, K., Bode, R., Petzold, A., and Hansen, A.D.A., 2006, "Comparison of continuous and filter-based carbon measurements at the Fresno supersite", *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 56: 474~491.
- Park, R.J., Jacob, D.J., Palmer, P.I., Clarke, A.D., Weber,

- R.J., Zondlo, M.A., Eisele, F.L., Bandy, A.R., Thornton, D.C., Sachse, G.W., and Bond, T.C., 2005, "Export efficiency of black carbon aerosol in continental outflow: Global implications", *J. Geophys. Res.*, 110: D11205, doi:10.1029/2004JD005432.
- Ponce, N.A., Hoggatt, K.J., Wilhelm, M., and Ritz, B., 2005, "Preterm birth: the interaction of traffic-related air pollution with economic hardship in Los Angeles neighborhoods", *Amer. J. Epidemiol.*, 162: 140~148.
- Prospero, J.M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S.E., and Gill, T.E., 2002, "Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the nimbus 7 total ozone mapping spectrometer(TOMS) absorbing aerosol product", *Rev. Geophys.*, 40(1): 1002, doi:10.1029/2000RG000095.
- Putaud, J.-P., Van Dingenen, R., Baltensperger, U., Brüggemann, E., Charron, A., Facchini, M.-C., Decesari, S., Fuzzi, S., Gehrig, R., Hansson, H.-C., Harrison, R.M., Jones, A.M., Laj, P., Lorbeer, G., Maenhaut, W., Mihalopoulos, N., Müller, K., Palmgren, F., Querol, X., Rodriguez, S., Schneider, J., Spindler, G., ten Brink, H., Tunved, P., Tørseth, K., Wehner, B., Weingartner, E., Wiedensohler, A., Wählin, P., Raes, F., 2003, *A European Aerosol Phenomenology: Physical and Chemical Characteristics of Particulate Matter at Kerbside, Urban, Rural and Background Sites in Europe*, European Commission: EUR 20411 EN.
- Ramanathan, N., Lukac, M., Ahmed, T., Kar, A., Siva, P., Honles, T., Leong, I., Rehman, I.H., Schauer, J., and Ramanathan, V., 2011, "A cellphone based system for large-scale monitoring of black carbon", *Atmospheric Environment*, 45: 4481~4487.
- Ramanathan, V., and Carmichael, G., 2008, "Global and regional climate changes due to black carbon", *Nature Geoscience*, 1: 221~227.
- Rattigan, O.V., Felton, H.D., Bae, M.-S., Schwab, J.J., and Demerjian, K.L., 2010, "Multi-year hourly PM_{2.5} carbon measurements in New York: Diurnal, day of week and seasonal patterns", *Atmospheric Environment*, 44: 2043~2053.
- Rehman, I.H., Ahmed, T., Praveen, P.S., Kar, A., and Ramanathan, V., 2011, "Black carbon emissions from biomass and fossil fuels in rural India", *Atmos. Chem. Phys.*, 11: 7289~7299.
- Russell, P.B., Bergstrom, R.W., Shinozuka, Y., Clarke, A.D., DeCarlo, P.F., Jimenez, J.L., Livingston, J.M., Redemann, J., Dubovik, O., and Strawa, A., 2010, "Absorption Angstrom exponent in AERONET and related data as an indicator of aerosol composition", *Atmos. Chem. Phys.*, 10: 1155~1169.
- Sarnat, J.A., Marmur, A., Klein, M., Kim, E., Russell, A.G., Sarnat, S.E., Mulholland, J.A., Hopke, P.K., and Tolbert, P.E., 2008, "Fine particle sources and cardiorespiratory morbidity: An application of chemical mass balance and factor analytical source-apportionment methods", *Environ. Health Perspect.*, 116: 459~466.
- SCAQMD(South Coast Air Quality Management District), 2008, *Multiple Air Toxics Exposure Study in the South Coast Air Basin III*, Diamond Bar, CA.
- Turpin, B.J., and Huntzicker, J.J., 1995, "Identification of secondary organic aerosol episodes and quantitation of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS", *Atmospheric Environment*, 29: 3527~3544.
- UNEP(United Nations Environment Programme) and WHO, 2011, *Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone: Summary for Decision Makers*, http://www.unep.org/dewa/Portals/67/pdf/Black_Carbon.pdf, accessed December 2011.
- USEPA(US Environmental Protection Agency), 2000, *National Air Toxics Program: The Integrated Urban Strategy*, Report to Congress, EPA-453/R-99-007: Research Triangle Park, NC.
- _____, 2002, *Health Assessment Document for Diesel Engine Exhaust*, EPA/600/8-90/057F: Washington, DC.
- Watson, J.G., Chow, J.C., and Chen, L.-W.A., 2005, "Summary of organic and elemental carbon/black carbon analysis methods and intercomparisons",

Aerosol Air Quality Res., 5: 69~102.

Watson, J.G., Robinson, N.F., Fujita, E.M., Chow, J.C., Pace, T.G., Lewis, C., and Coulter, T., 1998, *CMB8 Applications and Validation Protocol for PM_{2.5} and VOCs*, Document No. 1808.2D1, Desert Research Institute: Reno, NV.

WHO, 2003, *Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide*, Report on a WHO Working Group, January 13~15: Bonn, Germany.

Yu, S., Dennis, R.L., Bhawe, P.V., and Eder, B.K., 2004,

"Primary and secondary organic aerosols over the United States: estimates on the basis of observed organic carbon(OC) and elemental carbon(EC), and air quality modeled primary OC/EC ratios", *Atmospheric Environment*, 38: 5257~5268.

원 고 접 수 일 : 2012년 4월 3일

1차심사완료일 : 2012년 5월 3일

최종원고채택일 : 2012년 6월 5일