

공간 측정에 의한 도로변 발생 다환방향족탄화수소 연구

Analysis of Poly Aromatic Hydrocarbon (PAH) Pollutants Originated from Local Road Dust by Spacial Measurements

박다정 · 조인환 · 이광열¹⁾ · 박기홍¹⁾ · 이영재²⁾ · 안준영²⁾ · 배민석*

목포대학교 환경공학과, ¹⁾광주과학기술원 환경공학부, ²⁾국립환경과학원

(2016년 3월 7일 접수, 2016년 4월 29일 수정, 2016년 5월 13일 채택)

Da-Jeong Park, In-Hwan Cho, Kwang-Yul Lee¹⁾, Kihong Park¹⁾, Yeong-Jae Lee²⁾,
Joon-Young Ahn²⁾ and Min-Suk Bae*

Department of Environmental Engineering, Mokpo National University

¹⁾*School of Environmental Science and Engineering,*

Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju, Korea

²⁾*National Institute of Environmental Research, Air Quality Research Division*

(Received 7 March 2016, revised 29 April 2016, accepted 13 May 2016)

Abstract

Understanding sources and contributions of PM_{2.5} mass and particulate PAHs from traffic-related pollution can provide valuable information for alleviating air contamination from car emissions in urban areas. Two sampling sites at the Gwangju Institute of Science and Technology (GIST, 35.228°N, 126.843°E) and National institute of environmental research NamBu Supersite (NNBS, 35.226°N, 126.848°E) were selected for comprehensive road-oriented-PM investigations. Continuous measurements from optical particle sizer (OPS) and optical particle counter (OPC) with 24 hr integrated filter based samplers for organic carbon, water soluble organic carbon, and Poly Aromatic Hydrocarbons (PAHs) were conducted during Nov. 3 through 22 in 2014. As a result, PM_{2.5} mass concentrations using OPC and OPS in NNBS presented about twice higher than in GIST due to road dust impacts based on wind direction analysis. In addition, ratios of elemental carbon (EC) to organic carbon (OC) and water insoluble organic carbon (WIOC) to organic carbon (OC) supported an additional evidence of the primary pollutant contributions oriented from road dust. PAHs related to 5 rings such as benzo(e&a)pyrene indicates higher associations.

Key words : OPS, OCEC, GCMS, PAH

1. 서 론

도시 대기 중 유기성 분진 농도에 기여하는 일반적

인 원인으로는 (1) 도로변 발생 성분(Park *et al.*, 2015), (2) 생물성 연소(Bae *et al.*, 2012; Schauer *et al.*, 2001), (3) 식물성 유리 성분(Schauer *et al.*, 1999), (4) 각종 연소 성분(Li *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2000) 그리고 (5) 광화학적 반응에 의한 2차 생성물(Hallquist *et al.*, 2009)

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)61-450-2485, E-mail : minsbae@hotmail.com

등이 있다. 이 중 도로변 발생 분진은 크게 자동차에서 직접 배출되는 각종 연소 성분과, 도로 표면에서 재비산되는 성분으로 나눌 수 있고, 자동차에서 발생하는 원인으로는 크게 배기관에서의 직접 배출 성분, 엔진 및 브레이크 오일류, 타이어 마모, 브레이크 마모 등으로 분류될 수 있다(Goel and Guttikunda, 2015; Berger and Denby, 2011). 또한, 인체 유해성 측면에서 도로변 분진은 세포를 이용한 산화 반응성 연구 등 다양한 측면에서의 독성학적 연구가 진행되고 있다(Schmid *et al.*, 2007).

다환방향족탄화수소(Poly Aromatic Hydrocarbon, PAH)는 일반적으로 자동차 휘발유 등 배기가스의 불완전 연소 등에서 발생하며, 벤젠고리 3개 이상의 PAH 경우 열화학적 안정성에 의해 대기 중에서 쉽게 분해되지 않는 특성을 지니고 있어(Zhang *et al.*, 2008), 도로변으로부터 분진의 기여량이 많은 도심지역인 경우 PAH를 도로변 지시 성분으로 구분하여 기여량 산출에 이용하기도 한다(Jamhari *et al.*, 2014; Khairy and Lohmann, 2013). 유럽 대도시 대기 PAH 평균 농도는 코펜하겐 2.1 ng/m³, 로마 2.0 ng/m³, 런던 1.0 ng/m³ 등 1.0에서 2.1 ng/m³ 사이로 최근 보고된 바 있다(Jedynska *et al.*, 2014). 특히, 도로변의 경우 일반 지역에 비해 최고 2배 가까운 높은 농도를 나타내었다(Jedynska *et al.*, 2014). 국내의 경우, 서울시 및 경기, 인천지역 도로변에서 채취한 분진을 재비산 시스템을 이용하여 재비산 분진을 분석한 결과, 대표 지시화학적분인 Si와 함께 차도에서 발생하는 NH₄⁺이 가장 높은 분율로 분석되었고, 대표할 수 있는 PAH 성분으로 Fluoranthene과 Pyrene, Chrysene, 1,3,5-Triphenylbenzene이 검출되었다(Park *et al.*, 2015). 하지만 PAH의 경우 자동차 배기가스 이외에 생물성 연소(Schauer *et al.*, 2001), 토양(Liu *et al.*, 2010), 일반 가스 연소(Li *et al.*, 2009) 등 많은 발생 원인이 혼재되어 있어, 대기 중 도로변에 의한 PAH 기여량만을 정확히 산출하기에는 한계가 크다.

이에 본 연구에서는 도로변을 중심으로 풍상 및 풍하 지역에서 두 대의 광학 입자 측정기(optical particle counter, OPC & optical particle sizer, OPS)를 이용하여 분진 수농도를 동시에 측정하고, 최종적으로 도로변으로부터 기여하는 질량 농도를 산출하였다. 이와 더불어, 탄소 분석기 및 총유기탄소(Total Organic Carbon, TOC) 분석기를 이용하여 풍상 및 풍하 지역에서 유기

탄소 및 원소탄소 그리고 수용성 유기탄소와의 차에 의한 불용성 유기탄소를 동시에 분석하여 도로변으로부터 기여하는 1차 탄소성 물질의 기여량을 분석함과 동시에, 가스크로마토그래피 질량분석기에 의한 PAH를 분석하여 도로변에서 유입되는 PAH 성분을 분석하였다.

2. 방 법

2.1 측정 장소

도로변 발생 기여량을 분석하고자 도로를 사이로 두 측정소를 선정하였다. 첫 번째 측정 장소로 광주과학기술원 삼성동(Gwangju Institute of Science and Technology, GIST, 35.228°N, 126.843°E) 3층, 두 번째 장소로 국립환경과학원 남부권 대기오염집중측정소(National institute of environmental research NamBu Supersite, NNBS, 35.226°N, 126.848°E) 3층에서 옥상으로부터 유입된 공기를 포집하여 2014년 11월 3일부터 22일까지 20일간 측정이 이루어졌다. 두 측정소가 위치한 광주광역시 북쪽 지역은 무등산, 용두산, 팔암산으로 둘러싸인 분지 지형으로, 지역 산업단지에 의한 직접적 원인과 장거리 원인을 함께 받을 수 있는 곳이다. 두 측정 장소가 위치한 광주광역시 북구 첨단과기로 주변은 영산강 물환경연구소, 광주 지방 식품의약품안전청, 광주 지방 국세청 등 여러 국가기관 및 연구소가 자리하고 있어 주위 교통량이 집중되고 있는 곳이며, 서쪽 약 2 km 지점에 호남고속도로가 위치하고 있어, 풍향에 따른 차량 발생 오염물질의 영향을 직접적으로 받는 위치에 있다. 두 측정소 간 거리는 약 625 m로, 30 m 폭의 왕복 6차선 첨단과기로를 사이에 두었으며, 첨단과기로부터 최단 거리는 GIST, NNBS 각각 약 310 m, 약 125 m이다(그림 1).

2.2 풍향 풍속 측정

각 측정소의 지역적인 풍상 및 풍하 지점을 판별하고자, 각 측정소에서의 풍향 풍속을 그림 1에 나타내었다. GIST 풍향 풍속 자료는 GIST 내에 위치한 기상청 측정소(35.230°N, 126.841°E)에서 측정 기간 동안의 10분 측정 자료를 [http://www.kma.go.kr/]로부터 획득하였다. NNBS 기상 자료는 측정소 옥상에 설치된 풍향 풍속계(WatchDog, Spectrum Tech., Inc., USA)로부

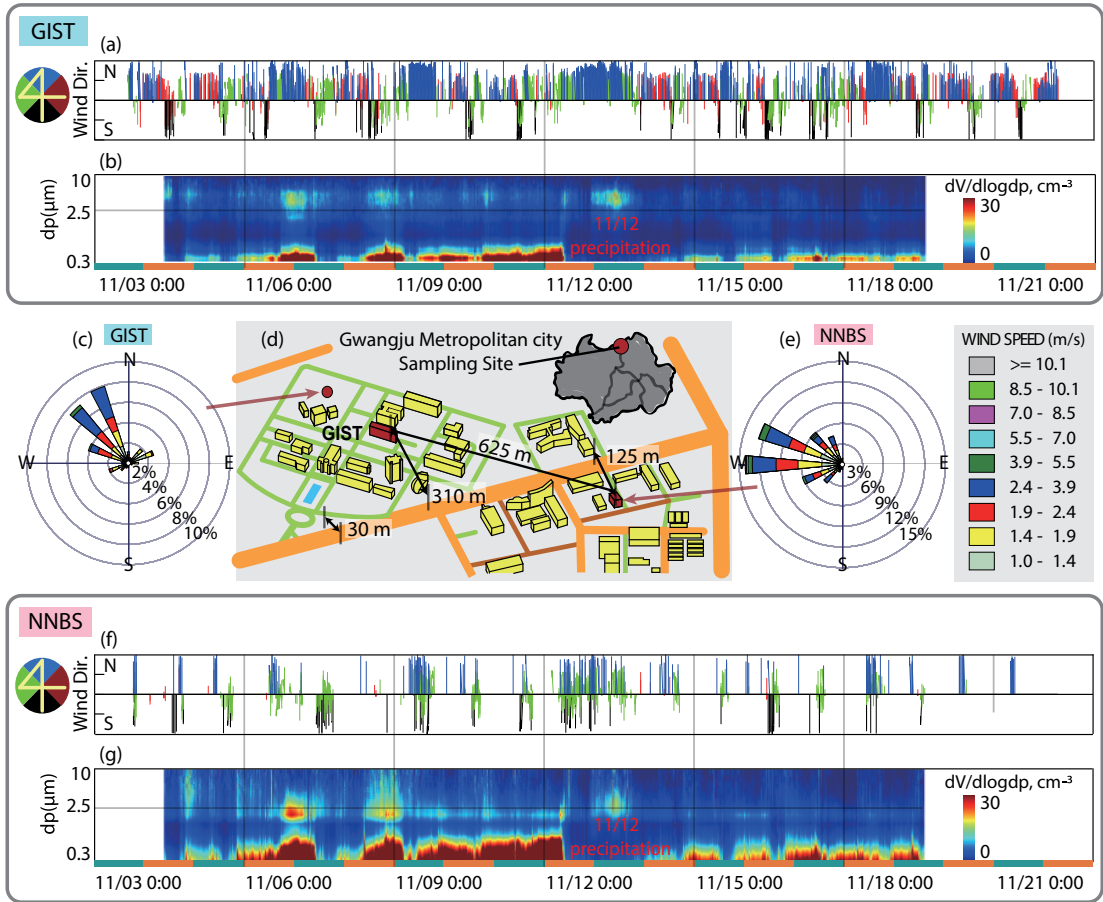


Fig. 1. (a) Time series of wind direction, speed, (b) evolution of particle volume concentrations, and (c) wind rose for the site of Gwangju Institute of Science and Technology (GIST). (d) Two sampling locations of Gwangju Institute of Science and Technology (GIST) and National institute of environmental research NamBu Supersite (NNBS) in Gwangju, Korea. (f) Time series of wind direction, speed, (g) evolution of particle volume concentrations, and (e) wind rose for the site of National institute of environmental research NamBu Supersite (NNBS).

터 측정된 5분 평균값을 이용하였다. 참고로, NNBS에 설치된 기상장비의 경우 풍속 측정에 상대적으로 낮은 감도(>1.0 m/s)를 나타내어 GIST 자료와 비교하여 적은 수의 자료를 나타내었다.

2.3 광학 입자 측정기

도로변 발생 분진 농도를 분석하고자 GIST 측정소에서 OPC, NNBS에 OPS를 동시에 운영하였다. 간략히, 광학 입자 측정기는 외부 유입 공기(OPC 1.2, OPS 1.0lpn) 및 확산 손실 등을 최소화하기 위한 외각유동이 측정 챔버내 내로 함께 유입된다. 챔버내 유입 입

자는 산란각 내에서 미(Mie) 산란원리를 기초로 하여 광도계에 의해 수농도로 산출된다. 이에 두 측정 장비의 수농도 상관성이 매우 중요하며, 이에 대한 비교 측정 결과를 선행 연구에 나타내었다(Park *et al.*, 2016). 또한, 후속 연구에서 0.3~2.5 μm 범위에서 측정된 OPS 부피 농도와 중량법으로 분석된 질량 농도의 상관관계를 분석하여 나타내었다(Bae *et al.*, 2016). 그 결과, 높은 상관관계 결정 계수($r^2=0.97$)와 함께 기울기(x축: OPS 부피 농도, y축: 질량 농도)가 2.40으로 분석되었다. 이에, OPS의 수농도로부터 계산된 부피 농도를 PM_{2.5} 질량 농도로 변환할 수 있는 질량 환산 값(Mass

conversion factor, Mcf)인 2.40을 OPC 및 OPS에 모두 적용, $PM_{2.5}$ 질량 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 계산하였다.

2.4 GC/MS-TD (Gas Chromatography/ Mass Spectrometry-Thermal Desorption)

도로변 발생 무극성 유기성분인 PAH를 GC/MS-TD를 이용하여 분석하였다. 각 두 지점에서 동시에 $PM_{2.5}$ 사이클론(URG-2000-30ENYF, URG Corp., USA), 여과지팩(URG-2000-30F, URG Corp., USA)으로 구성된 여과지 포집장치를 이용하여 석영 여과지(Pallflex, 2500QATUP, Pall Corp., USA)와 테프론 여과지(PFTE, R2PJ047, Pall Corp., USA)에 동시에 분진을 포집하였다. 시료는 분석 전까지 밀봉된 상태에서 냉동 보관하였으며, 석영 여과지로 포집한 시료는 3.0 cm^2 펀치(punch)를 이용하여 일정 절단 후, 유리 흡착관(3.5 inch long \times 0.25 inch O.D, Markes, UK)에 넣어 저온탈착시스템(Thermal Desorption (TD), Unity2, Markes International, Ltd, UK)과 GC(gas chromatography (Agilent 7890A))-MS(mass spectrometer (Agilent 5975C))를 이용하여 분석하였다. TD 저온 흡착관(Cold Trap)에 의해 시료를 저온농축(-10°C) 및 재흡착을 유도한 후, 360°C 로 열탈착하여 GC column으로 이동하여 분석하였다. GC는 310°C 까지 승온 분석방식으로 총 61.26분의 분석주기로 분석을 진행하였다. 사용된 GC 칼럼(HP-5MS, Length: 30 m, Diameter: 0.25 mm, Film thickness: 0.25 μm)과, Quadruple MS를 통해 Scan 및 Selected Ion Monitoring (SIM)를 동시에 이용하여 PAH를 최종적으로 검출하였다. 분석 전 시료에 두 내부표준물질(pyrene-D10, benzo(a)anthracene-D12)을 첨가하였으며, 내부표준분석법에 의한 결과 PAH 분석 성분(phenanthrene, anthracene, fluoranthene, pyrene, benzo(a)anthracene, chrysene, benzo(b&k)fluoranthene, benzo(e&a)pyrene) 모두 0.99 이상의 높은 상관관계 결정 계수를 나타냈다. 재차분석 결과 5% 이내의 정밀도를 나타냈다.

2.5 유기탄소(organic carbon, OC) 및 원소탄소(elemental carbon, EC)

PAH와 더불어 분진 내 존재하는 총 유기탄소를 분석하고자 NIOSH5040 (National Institute of Occupational Safety & Health) 프로토콜을 기초로 한 실험실

탄소분석기(Labbased OCEC Carbon Aerosol Analyzer, Sunset laboratory Inc., USA)를 이용하였다. 탄소분석기는 승온에 의한 열화학적 방법 및 레이저 투과도법에 의한 광학적 방법을 이용하여 OC 및 EC를 분석하는 방법으로, 오래전부터 오염원 시료 및 일반 대기 시료 중 탄소를 분석하는 데 이용되는 전통적인 방법이다(Park *et al.*, 2015; Bae *et al.*, 2004). 간략히, 포집한 석영 여과지로부터 1.5 cm^2 크기로 절단하여 분석하였으며, 현장 공시료 분석, Sucrose Test 및 재차 분석을 통해 정확도($100 \pm 3\%$)와 정밀도($100 \pm 3\%$)를 분석하여 분석 신뢰성을 나타냈다.

2.6 수용성 유기 탄소

(water soluble organic carbon, WSOC)

테프론 여과지에 의해 포집된 분진 중 수용성 유기탄소를 분석하고자 30 mL의 초순수액을 이용하여 120분 동안 초음파기에 의해 추출하였다. 이후 시린지 여과지(PFTE 0.45 μm pore size, Advantec, Japan)를 사용하여 불용성 분진을 제거한 후, 최종 수용성 시료를 total organic carbon (TOC) 분석기(Sievers 900, GE, USA)로 분석하였다. 이에, 분석된 수용성 유기탄소(WSOC)와 OC 농도 차이로부터 불용성 탄소(water insoluble organic carbon, WIOC)를 계산하여 나타내었다. 간략히, TOC 분석기는 인산(H_3PO_4)과 과산화황산염($(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$) 및 UV (254 nm)에 의한 총 탄소와 UV 램프가 장착되지 않은 무기탄소의 양을 CO_2 로 산화시켜 전도도검출기로 분석한다. 무기탄소 제거기(inorganic carbon remover, ICR)에 의해 무기탄소에 의한 수용성 유기탄소 간섭현상을 최소화함과 동시에, 현장 공시료 분석, Sucrose Test 및 재차 분석을 통해 정확도($100 \pm 3\%$)와 정밀도($100 \pm 1\%$)를 나타냈다.

3. 결과 및 토론

(1) 각 측정소에서의 풍향, 풍속에 의한 지역적 풍상 및 풍하 지점을 판별하고, (2) 두 측정소 간 농도 차를 분석하여, (3) 도로변 발생 기여량을 나타내고자, GIST 및 NNBS의 시계열 풍향을 분석하였다. 이에, $30^\circ \sim 120^\circ$ (붉은색), $120^\circ \sim 210^\circ$ (검은색), $210^\circ \sim 300^\circ$ (녹색), $300^\circ \sim 30^\circ$ (푸른색)의 총 4방향으로 표현하여 그림 1에

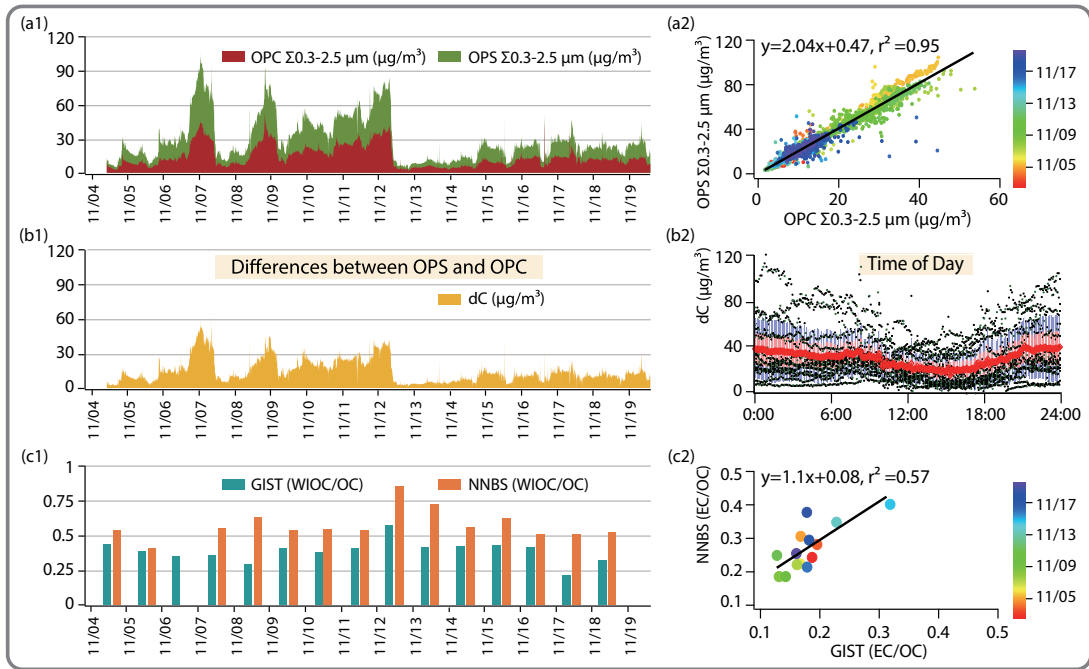


Fig. 2. (a1) Time series of mass concentrations by optical particle counter (OPC) & optical particle sizer (OPS), (a2) pairwise correlation scatterplots between OPS and OPC colored by sampling days, (b1) time series of different concentrations between OPS and OPS, (b2) time of day in different concentrations between OPS and OPS, (c1) ratio of WIOC to OC, and (c2) pairwise correlation scatterplots between EC/OC in NNBS and in GIST.

나타내었다. 그 결과, GIST에서는 풍향 $300^\circ \sim 30^\circ$ (푸른색)의 경우 전체 측정값의 약 46%로 가장 높았으며, $210^\circ \sim 300^\circ$ (녹색)에서 약 21%로 나타나, 북북서 및 북서풍이 주풍으로 나타났다. NNBS에서는 풍향 $300^\circ \sim 30^\circ$ (푸른색)의 경우 전체 측정 값의 약 56%로 가장 높았으며, 그 다음으로 $210^\circ \sim 300^\circ$ (녹색)에서 약 35%로 나타나, 서북서 및 서풍이 주풍으로 나타났다. 이에, GIST를 풍상 측정소, NNBS를 풍하 측정소로 각각 판별하여 도로변 발생 대기 기여량을 분석하였다.

그림 2는 풍상 GIST에서 OPC, 풍하 NNBS에서 OPS에 의해 측정된 수농도 결과에 2.40 Mcf (Bae *et al.*, 2016)를 적용하여 질량 농도로 나타낸 것이다. 관측 기간 동안 질량 농도가 두 측정소에서 같은 경향성을 나타내었다. 측정 기간 동안 $\text{PM}_{2.5}$ 질량 농도는 GIST, NNBS 각각 평균 $14.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $28.97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 측정 기간 동안 11월 7일, 8일, 12일경에 NNBS에서 $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이 넘는 고농도 현상이 나타났다. 동일 GIST 측정소에서도 $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이 넘는 농도가 관측

되었다. 11월 12일에는 강수가 있어 두 측정소 모두 $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 저농도 현상이 관측되었다. 두 측정소 간 상관관계를 살펴보면, 상관관계 결정 계수 (r^2)가 0.95로 매우 높게 나타났으며, 기울기가 2.04로 나타나 전체적으로 NNBS가 GIST에 비해 약 2배 높게 관측되었다. 이는 풍상, 풍하 위치에 따른 도로변 발생 분진의 영향에 의해 각 측정소의 대기 분진 농도에 영향을 주었음을 알 수 있다. 그림 2(b)에 두 측정소 간 농도의 차($\Delta C, \mu\text{g}/\text{m}^3$)를 계산하여 시계열로 나타내었다. 이에 두 측정소 간 농도의 차(평균 $14.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$)는 도로변에 의한 것이라 사료된다. 이를 자세히 분석하고자, ΔC 를 일 중 시간별 변이로 계산하여 그림 2(b2)에 나타내었다. 그 결과, 강한 일변화 ΔC 변이가 나타났다. 새벽 6시경 이후 갑자기 증가하기 시작하여 출근시간대인 오전 7~8시경 오전 최대값을 나타냈다. 이후 점차적으로 감소하기 시작하여, 오후 2시~3시에 최소값을 나타낸 이후, 퇴근시간대인 오후 6시 이후 점차적으로 증가하기 시작하여, 자정 무렵 일중 최대값을 나타냈다. 이는

차량 이동 시간대와 깊은 상관성이 있을 것으로 사료된다. 본 측정소 중간에 위치한 첨단과기호가 직접적인 원인이며, 좀 더 넓은 지역을 고려하면, 서쪽 약 2 km 지점에 호남고속도로가 위치하고 있기 때문이다. 최근 고속도로에서 야간 시간대 대기 분진 농도가 야간 차량 증가와 관련이 있음을 보고한 바 있다 (Lee et al., 2015).

측정 기간 동안 OC 질량 농도는 GIST, NNBS 각각 평균 6.75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 6.22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 오히려 GIST에서 약 0.53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 높게 나타났다. TOC로 분석된 WSOC 또한 GIST, NNBS 각각 평균 4.18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2.91 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 GIST에서 약 1.4배 높게 나타났다. 이는 GIST에서 분석된 OC 중 2차 성분에 의한 영향이 NNBS보다 상대적으로 높을 것으로 본다. 이에 EC 질량 농도를 살펴보면 GIST, NNBS 각각 평균 1.20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1.61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 NNBS에서 약 0.41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 높게 나타나, NNBS가 직접 배출에 따른 1차 성분에 상대적으로 많은 영향을 받고 있다. 이에, 차량 등에 의한 1차 오염 물질과 관련성을 분석하기 위해 유기탄소 중 불용성 유기탄소의 비율 (WIOC/OC)을 그림 2(c)에 나타내었다. WIOC/OC는

GIST 및 NNBS 각각 평균 0.39, 0.59로, 11월 8일 최대 0.35 이상 차이를 나타내며, NNBS에서 높게 나타났다. 또한, 두 측정소 간 EC/OC의 상관관계를 살펴보면, 상관관계 결정 계수(r^2)가 0.57과 함께, 기울기가 1.1로, NNBS가 GIST에 비해 도로변 발생 분진의 영향을 받고 있다.

GC/MS-TD를 이용해 도로변 발생 PAH를 분석하여 그림 3에 나타내었다. 벤젠고리 3개 이상의 총 10종의 PAH를 최종 분석하였으며, benzo(b)fluoranthene과 benzo(k)fluoranthene을 benzo(b&k)fluoranthene, benzo(a)pyrene과 benzo(e)pyrene을 benzo(e&a)pyrene으로 함께 표기하여 나타내었다. 그 결과, 측정 기간 동안 PAH 질량 농도는 anthracene이 GIST, NNBS 각각 평균 0.12 ng/m^3 , 0.14 ng/m^3 로 가장 낮은 농도를 나타냈으며, benzo(b&k)fluoranthene이 각각 평균 3.09 ng/m^3 , 3.54 ng/m^3 로 가장 높은 농도를 나타냈다. PAH 개별 성분 전체 평균 농도는 GIST, NNBS 각각 1.19 ng/m^3 , 1.31 ng/m^3 로 NNBS가 0.12 ng/m^3 높게 나타났다. 분석 PAH 농도는 유럽 대도시 농도와 비교해 볼 때 비슷하거나 조금 낮은 수준으로 나타났다 (Jedynska et

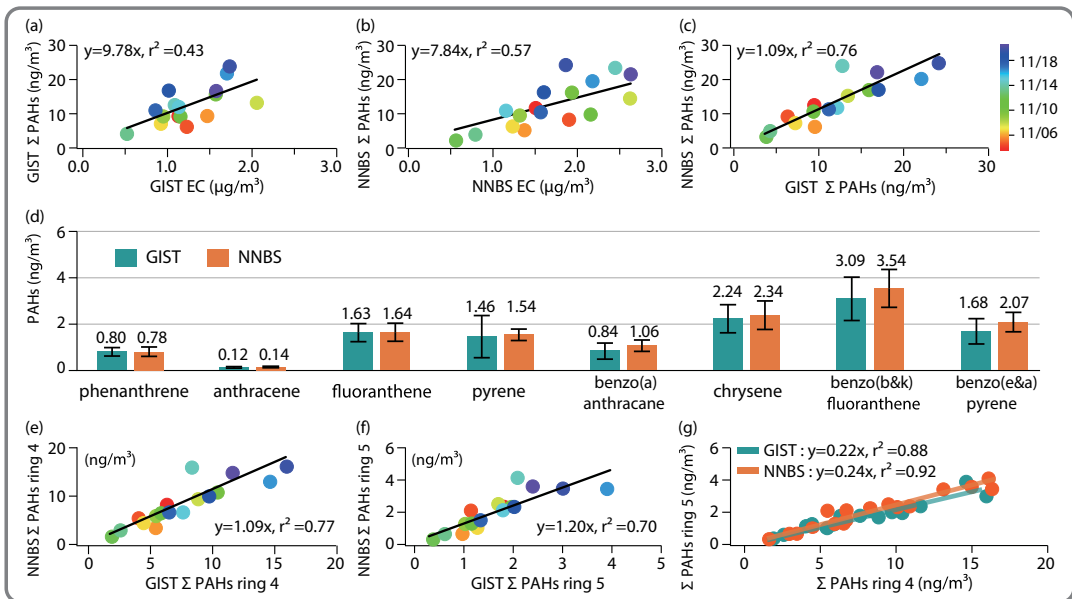


Fig. 3. (a) pairwise correlation scatterplots between PAHs and EC in GIST, (b) in NNBS, (c) pairwise correlation scatterplots between PAHs in NNBS and in GIST, (d) PAH mass concentrations (ng/m^3), (e) pairwise correlation scatterplots between 4 ring PAHs in NNBS and in GIST, (f) between 5 ring PAHs in NNBS and in GIST, (g) between 5 ring PAHs and 4 ring PAHs for each sites.

al., 2014). 각 측정소별 PAH와 EC와의 상관관계를 살펴보면, GIST의 경우 기울기가 9.78 ($r^2=0.43$)인 반면, NNBS 기울기는 7.84 ($r^2=0.57$)로 상대적으로 EC와 높은 상관성을 나타내었다. 또한, 각 측정소 Σ PAH 상관관계를 살펴보면, 상관관계 결정 계수 (r^2)는 0.76으로 높게 나타났으며, 기울기가 1.09로 나타나 전체적으로 NNBS가 GIST에 비해 높은 PAH가 분석되었다. 이를 성분별로 비교 분석한 결과, 벤젠고리가 4개, 5개인 PAH 성분인 경우 3개 성분에 비해 농도 차가 크게 나타났다. 즉, 벤젠고리 4개인 benzo(b&k)fluoranthene과 벤젠고리가 5개인 benzo(e&a)pyrene의 두 측정소 간 농도 차이가 각각 0.45 ng/m^3 및 0.39 ng/m^3 로, 벤젠고리 3개인 phenanthrene, anthracene, fluoranthene이 두 측정소 간 농도 차이에 비해 약 20배 가까이 차이가 나타났다. 이에 벤젠고리 4개 성분 합 의 농도에 대해 두 측정소 간 상관관계를 살펴보면 상관관계 결정 계수 (r^2)가 0.77과 함께, 기울기 1.09로 NNBS가 GIST에 비해 PAH가 약 10% 높게 분석되었으며(그림 3(e)), 벤젠고리 5개 성분 합 의 농도에 대해서는 두 측정소 간 상관관계 결정 계수 (r^2)가 0.70, 기울기 1.20으로 NNBS가 GIST에 비해 PAH가 약 20% 높게 분석되어 벤젠고리가 많을수록 NNBS에서 상대적으로 높은 PAH가 분석되었다. 또한 각 측정소 내에서 벤젠고리별 상관관계를 살펴보면, GIST의 경우 기울기 0.22 ($r^2=0.88$), NNBS 기울기 0.24 ($r^2=0.92$)로 NNBS에서 분석된 PAH 중 벤젠고리 수가 높은 성분이 상대적으로 높은 비율을 차지하고 있다.

결론적으로, 비교 관측(Park et al., 2016)에 의해 검증된 광학측정기로부터 산출된 질량 농도(Bae et al., 2016) 분석 결과, 풍하 측정소 NNBS에서 풍상 측정소 GIST에 비해 약 2배 높은 질량 농도가 관측되었고, 이는 도로변에 의한 1차 오염물질의 영향으로 분석되었으며, 특히, PAH 중 benzo(b&k)fluoranthene, benzo(e&a)pyren과 같은 벤젠고리 수가 4개 이상 많은 성분이 각각 14.6%, 23.2% 높은 영향을 미치고 있는 것으로 분석되었다.

4. 결 론

본 연구는 도로변 발생 분진의 정량 정성적인 측면

에서의 특성을 분석하고자 풍상 측정소인 광주과학기술원(GIST) 및 풍하 측정소인 국립환경과학원 남부권 대기오염집중측정소(NNBS)에서 OPC 및 OPS 등을 이용하여 2014년 11월 3일부터 22일까지 20일간 동시 측정이 이루어졌다. 또한, 탄소 분석기 및 TOC 분석기를 이용하여 유기탄소 및 원소탄소 그리고 수용성 유기탄소와의 차에 의한 불용성 유기탄소를 분석하여 도로변으로부터 기여하는 1차 탄소성 물질의 기여량을 분석함과 동시에, 가스크로마토그래피 질량분석기에 의한 PAH를 풍상 및 풍하 지역에서 동시에 분석하여 도로변에서 유입되는 PAH 유입 성분 및 유입량을 산출하였다. 그 결과, 풍하 측정소인 NNBS에서 풍상 측정소 GIST에 비해 약 2배 높은 질량 농도가 관측되었고, 이는 EC/OC 및 WIOC/OC에 의해 도로변에 의한 1차 오염물질의 영향으로 분석되며, PAH 중 벤젠고리 수(4개 이상)가 높은 성분이 도로변에서 상대적으로 많이 발생하는 것으로 분석되었다. 본 연구 결과는 향후 도로변에서 발생하는 대기 오염 기여량 및 유해성 연구 등에 크게 기여하리라 판단한다.

감사의 글

본 논문은 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 일반연구 지원사업(NRF-2013R1A1A2065686) 및 초미세먼지 피해저감 사업단의 지원을 받아 수행된 일반연구사업(NRF-2014M3C8A5030612) 연구 결과입니다. 본 연구를 위해 국립환경과학원의 남부권 집중측정소 박미경 연구사님, 김선정 연구원님, 정선아 연구원님, 조미라 연구원님께 깊은 감사를 드립니다.

References

- Bae, M.S., D.J. Park, J.H. Lee, J.Y. Ahn, and Y.J. Lee (2016) Source Analysis of Size Distribution and Density Estimation in $\text{PM}_{2.5}$ - Part II, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 32(2), 158-166. (in Korean with English Abstract)
- Bae, M.S., J. Schauer, J. DeMinter, J. Turner, D. Smith, and R. Cary (2004) Validation of a Semi-Continuous Instrument for Elemental Carbon and Organic Car-

- bon Using a Thermal-Optical Method, *Atmospheric Environment*, 38, 2885-2893.
- Bae, M.S., J.Y. Lee, Y.P. Kim, M.H. Oak, J.S. Shin, K.Y. Lee, H.H. Lee, S.Y. Lee, and Y.J. Kim (2012) Analytical Methods of Levoglucosan, a Tracer for Cellulose in Biomass Burning, by Four Different Techniques, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 6(1), 53-66.
- Berger, J. and B. Denby (2011) A generalised model for traffic induced road dust emissions. Model description and evaluation, *Atmospheric Environment*, 45(22), 3692-3703.
- Goel, R. and S.K. Guttikunda (2015) Evolution of on-road vehicle exhaust emissions in Delhi, *Atmospheric Environment*, 105, 78-90.
- Hallquist, M., J. Wenger, U. Baltensperger, Y. Rudich, D. Simpson, M. Claeys, J. Dommen, N. Donahue, C. George, A. Goldstein, J. Hamilton, H. Herrmann, T. Hoffmann, Y. Iinuma, M. Jang, M. Jenkin, J. Jimenez, A. Kiendler-Scharr, W. Maenhaut, G. McFiggans, T. Mentel, A. Monod, A. Prevot, J. Seinfeld, J. Surratt, R. Szmigielski, and J. Wildt (2009) The formation, properties and impact of secondary organic aerosol: current and emerging issues, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(14), 5155-5236.
- Jamhari, A., M. Sahani, M. Latif, K. Chan, H. Tan, M. Khan, and N. Tahir (2014) Concentration and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in PM₁₀ of urban, industrial and semi-urban areas in Malaysia, *Atmospheric Environment*, 86, 16-27.
- Jedynska, A., G. Hoek, M. Eeftens, J. Cyrys, M. Keuken, C. Ampe, R. Beelen, G. Cesaroni, F. Forastiere, M. Cirach, K. Hoogh, A. Nazelle, C. Madsen, C. Declercq, K. Eriksen, K. Katsouyanni, H. Akhlaghi, T. Lanki, K. Meliefste, M. Nieuwenhuijsen, M. Oldenwening, A. Pennanen, O. Raaschou-Nielsen, B. Brunekreef, and I. Kooter (2014) Spatial variations of PAH, hopanes/steranes and EC/OC concentrations within and between European study areas, *Atmospheric Environment*, 87, 239-248.
- Khairy, M. and R. Lohmann (2013) Source apportionment and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmospheric environment of Alexandria, Egypt, *Chemosphere*, 91, 895-903.
- Lee, J., B. Jeong, D.J. Park, and M.S. Bae (2015) 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, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(5), 472-481. (in Korean with English Abstract)
- Li, X., S. Wang, L. Duan, J. Hao, and Y. Nie (2009) Carbonaceous Aerosol Emissions from Household Biofuel Combustion in China, *Environmental Science and Technology*, 43(15), 6076-6081.
- Liu, W., W. Xie, Z. Zhao, W. Pan, and J. Riley (2000) Investigation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Fly Ash from Fluidized Bed Combustion Systems, *Environmental Science and Technology*, 34(11), 2273-2279.
- Liu, Y., L. Chen, J. Zhao, Y. Wei, Z. Pan, X. Meng, Q. Huang, and W. Li (2010) Polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface soil of Shanghai, China: concentrations, distribution and sources, *Organic Geochemistry*, 41, 355-362.
- Park, D.J., K.Y. Lee, K. Park, and M.S. Bae (2016) Diurnal Size Distributions of Black Carbon by comparison of Optical Particulate Measurements - Part I, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(1), 1-8. (in Korean with English Abstract)
- Park, D.J., Y.J. Han, J.Y. Lee, K.Y. Lee, I.H. Cho, E.H. Park, S.M. Yi, and M.S. Bae (2015) Source Profile of Road Dust for Statistical Apportionment Modeling in Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(2), 105-117. (in Korean with English Abstract)
- Schauer, J., J. Kleeman, R. Cass, and R. Simoneit (1999) Measurement of Emissions from Air Pollution Sources. 1-5, *Environmental Science and Technology*, 36(6), 1169-1180.
- Schauer, J., J. Kleeman, R. Cass, and R. Simoneit (2001) Measurement of Emissions from Air Pollution Sources. 3. C1-C29 Organic Compounds from Fireplace Combustion of Wood, *Environmental Science and Technology*, 35(9), 1716-1728.
- Schmid, M., S. Zimmermann, H. Krug, and B. Sures (2007) Influence of platinum, palladium and rhodium as compared with cadmium, nickel and chromium on cell viability and oxidative stress in human bronchial epithelial cells, *Environment International*, 33(3), 385-390.
- Zhang, H., E. Eddings, and A. Sarofim (2008) Pollutant emissions from gasoline combustion. 1. Dependence on fuel structural functionalities, *Environmental Science and Technology*, 42(15), 5615-5621.