

통계 수용모델을 위한 서울시 도로변 화학성분 원인 프로파일

Source Profile of Road Dust for Statistical Apportionment Modeling in Seoul

박다정 · 한영지¹⁾ · 이지이²⁾ · 이광열³⁾ · 조인환 · 박은하⁴⁾ · 이승묵⁴⁾ · 배민석*

국립목포대학교 환경공학과, ¹⁾국립강원대학교 환경과학과,

²⁾조선대학교 환경공학과, ³⁾광주과학기술원 환경공학과,

⁴⁾서울대학교 보건대학원 환경보건학과

(2015년 3월 16일 접수, 2015년 3월 31일 수정, 2015년 4월 7일 채택)

Da-Jeong Park, Young-Ji Han¹⁾, Ji-Yi Lee²⁾, Kwang-Yul Lee³⁾, In-Hwan Cho,
Eun Ha Park⁴⁾, Seung-Muk Yi⁴⁾ and Min-Suk Bae*

Department of Environmental Engineering, Mokpo National University, Jeollanamdo, Korea

¹⁾*Department of Environmental Science, Kangwon National University, Gangwondo, Korea*

²⁾*Department of Environmental Engineering, Chosun University, Gwangju, Korea*

³⁾*Department of Environmental Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology,
Gwangju, Korea*

⁴⁾*Department of Environmental Health, Graduate School of Public Health,
Seoul National University, Seoul, Korea*

(Received 16 March 2015, revised 31 March 2015, accepted 7 April 2015)

Abstract

Sources related to road dust is one of the biggest sources, which is responsible for a large portion of emission. In particular, PM_{2.5} is a potential cause for respiratory diseases, thus it should be managed and a mitigation plan using results of statistical apportionment modeling such as chemical mass balance needs to be established. Recently, identifying sources of PM_{2.5} and analyzing the contribution of the road dust through a contribution assessment is required. Therefore, this study provides the chemical source profiles of PM_{2.5} using IC, GC/MS, OCEC, and XRF for both paved sidewalk and paved roadway collected at seven different sampling sites. As a result, for paved sidewalk, NH₄⁺ (70%), NO₃⁻ (12%), PO₄⁻ (9%), and SO₄²⁻ (9%) have been analyzed in PM_{2.5} mass. Major molecular marker such as Si has been indicated as 12.0±3.4% and 13.6±6.9% for paved sidewalk and roadway, respectively. PAHs such as Fluoranthene, Pyrene, Chrysene, and 1,3,5-Triphenylbenzene are suggested as molecular markers for road dust.

Key words : Road dust, Source profile, Molecular marker

*Corresponding author.

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

1. 서 론

복잡한 대기질의 평가 및 예측과 함께 대기 오염원의 효율적 제어와 대책 수립을 위해서는, (1) 오염원의 복합적인 화학종에 대해 정성, 정량 분석이 선행되고, (2) 상호 관계 및 전체적인 분포를 이해하여, (3) 합리적인 환경정책이 수립되어야 한다. 이를 위해 일반적으로 수용체에서 오염물질의 화학적 특성을 분석한 후 오염원의 기여도를 평가하는 통계적 수용 방법론이 지속적으로 개발되고 있다(Bae and Schauer, 2009).

최근 연구에 따르면 서울시 전체 측정지점에 대한 오염원 기여도는 SO_4^{2-} 가 25% 수준으로 가장 높게 나타났으며, 자동차 연소(20.09%), NO_3^- (19.92%), 도로변 비산먼지(19.05%) 순으로 보고되었다(Kim, 2010). 이에 도로변에서 발생하는 분진 중 대기로 유입되는 총량은, 자동차 연소 및 도로변 비산먼지만 고려하더라도 39%에 이르고, 각종 유해 유기 화학종이 존재할 것을 감안할 때, 도로변에서 발생하는 특정 유기물질에 대한 장기간 측정 및 분석계획 등의 수립에 심도 있는 연구가 요구되고 있다(Bae *et al.*, 2013).

도로변에서 대기 중으로 유입되는 발생 분진은, (1) 자동차에서 발생하는 타이어 마모, 브레이크 마모, 엔진 및 브레이크 오일류, 그리고 배기관에서 직접 배출되는 각종 연소 성분과, (2) 도로 표면에서 재비산되는 분진이 혼재되어 구성된다(Goel and Guttikunda, 2015; Berger and Denby, 2011; Han *et al.*, 2011). 과거 국내 연구를 살펴보면, 서울시에서 자동차 연소 물질과 관련한 고농도의 다환방향족탄화수소(poly aromatic hydrocarbons, PAHs) 중 Benzo(b)fluoranthene, Indeno(1,2,3-cd)pyrene, Benzo(g,h,i)perylene 등이 분석되었고(Lee *et al.*, 2008), 자동차 배출 분진 중 서울시 BC(black carbon)의 변이에 대한 연구(Lee *et al.*, 2007) 및 SMPS(Scanning Mobility Particle Sizer)를 이용하여 10~50 nm의 도로변 대기 중 입경 분포 특성을 분석(Woo *et al.*, 2008)하는 등 도로변 대기 중 부유 분진에 대한 활발한 연구가 지속적으로 진행되고 있다.

유럽에서 실시된 연구에 의하면 PMF(positive matrix factorization) 등 수용모델에 의해 도심 지역 자료를 분석한 결과, PM10, PM2.5 및 PM1.0에 의한

총 도로 배출의 기여도는 각각 37%, 15% 및 3%로 나타났다(Amato *et al.*, 2009). 또한, 최근 연구에서는 도로변 비산 분진의 일부 성분은 인체 위해성이 큰 산화 스트레스와 관련성이 있는 전이 물질로 알려져 있으며, 이에 대한 연구가 전 세계적으로 다양한 측면에서 진행되고 있다(Schmid *et al.*, 2007; Becker *et al.*, 2002).

일찍이 미국에서는 도로변 등을 포함한 다양한 오염원의 화학종에 대해서 측정 분석하여 원인 프로파일을 공개하고 있으며, 현재 SPECIATE 4.4(2015년 3월)까지 자료를 전 세계적으로 공유하고 있다. 크게, 포장도로(paved road)와 비포장 도로(unpaved road)로 구분되어 도로변 원인 프로파일을 제공하고 있으며, 이를 다시 포집 실험조건에 따라 PM2.5와 PM10으로 구분하고 있다. 이 중 PM2.5에 해당하는 원인 프로파일 4204에서 4220까지 중 짝수만을 선택하여 도로변 미세분진 내 이온 성분의 원인 프로파일을 살펴보면(참고로 4204에서 4220까지 중 홀수번호는 PM10을 나타냄), 포장도로에서는 OC(Organic Carbon), EC(Elemental Carbon) 등 탄소성분 및 이온 성분과, Si의 비율이 높은 반면, 비포장도로에서는 토양기원 성분인 Ca 등의 비율이 높게 나타남을 볼 수 있다. 또한, 대부분의 포장도로에서 가장 높게 측정되는 이온 성분은 SO_4^{2-} 인 반면, NO_3^- 의 경우 대부분의 포장 및 비포장도로에서 적게 발견되고 있다(그림 1). 이는 미국에서 측정 분석된 결과로 국내에 동일하게 적용하기에는 한계가 있을 것으로 사료된다. 이에 한국 도로의 여러 특성을 고려한 국내 원인 프로파일의 연구 결과가 요구된다.

도로변 대기 중에는 다양한 원소 및 유기 성분을 포함한 화학성분이 존재하므로 도로변 초미세분진의 특성을 광범위하게 파악하기 위해서는, 연소 과정에서 배출되는 배기관 배출 물질 뿐만 아니라 브레이크 마모, 타이어 마모, 도로변 분진의 재비산을 포함하는 비연소 과정 등, 각 배출 경로에 대한 분진의 종합적인 조성을 파악해야 할 필요성이 있다.

이에 본 연구에서는 서울시 및 경기, 인천지역 도로변에서 채취한 분진을 실험실에서 재비산하여 유기 성분을 포함한 수용성 이온 성분, 원소 성분 등을 종합적으로 분석하고, 화학적 분포 및 특성을 분석함과 동시에 국내 도로변 비산분진에 대한 원인 프로파일을 완성시킴으로써 향후 통계적 수용모델의 정

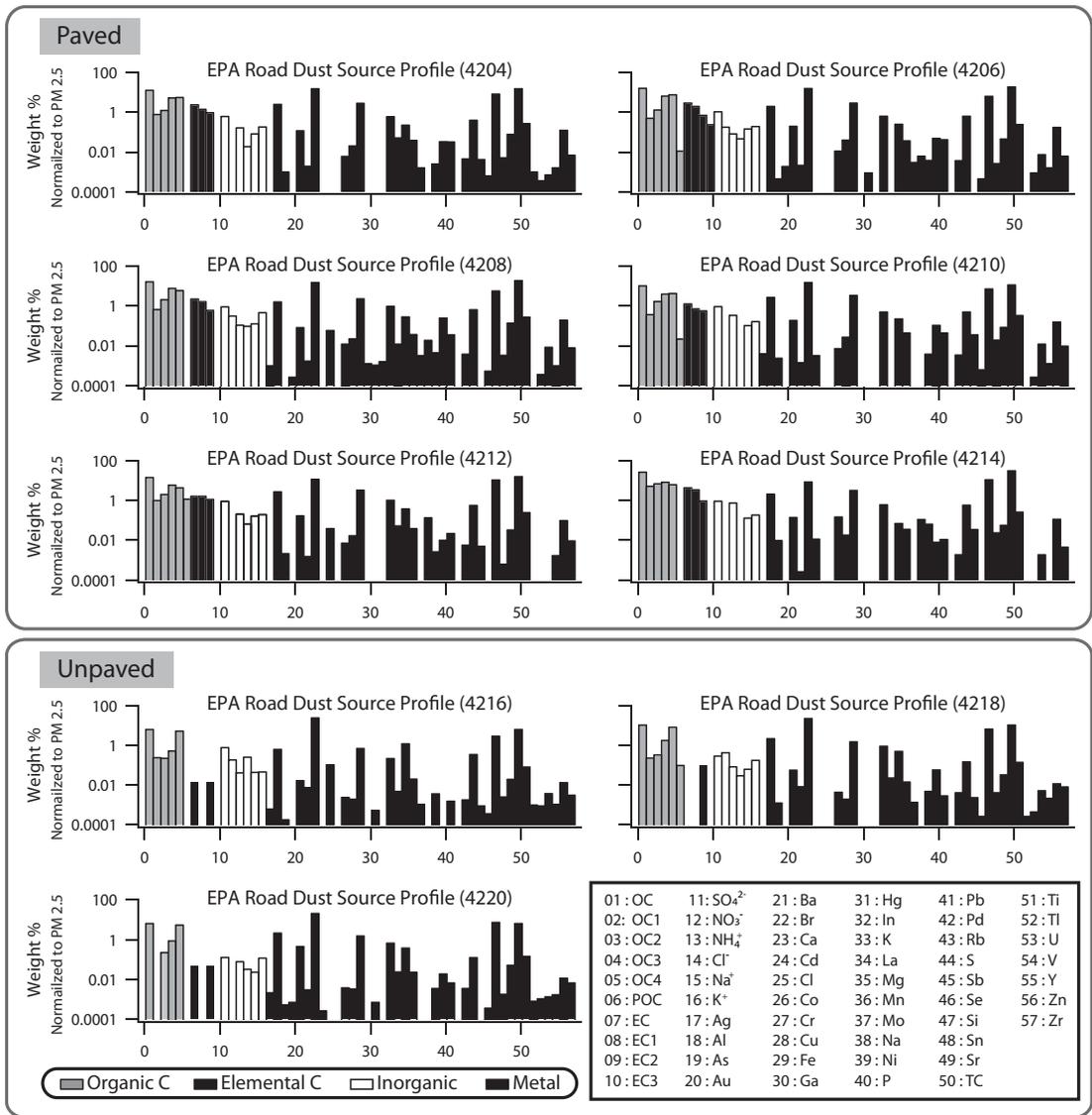


Fig. 1. USEPA Road Dust Source Profile (4204, 4206, 4208, 4210, 4212, 4214, 4216, 4218, 4220).

확한 자료를 제공함을 목적으로 하였다.

2. 방 법

본 연구는 서울, 경기, 인천 등에서 채취한 분진을 재비산 분진 포집 시스템을 이용하여 초미세먼지에 대한 도로변 미세먼지의 성분 특성을 분석하고, 원인

프로파일을 완성함에 있다. 이에, (1) 인천 1곳과 경기 1곳을 포함한 총 7곳의 도로변 분진을 채취하여 (그림 2(a)), (2) 재비산 분진 포집 시스템을 이용한 PM_{2.5}를 채취하고(그림 2(b)), (3) 종합적인 화학적 성분 분석[원소 성분, 이온 성분, 유기 성분, 유기탄소 및 원소탄소]과, (4) 분석결과를 통해 도로변 분진의 최종적인 화학적 분진 정상 결과 및 도로변 원인 프로파일을 생성하여, 향후 통계적 수용모델 등을 통

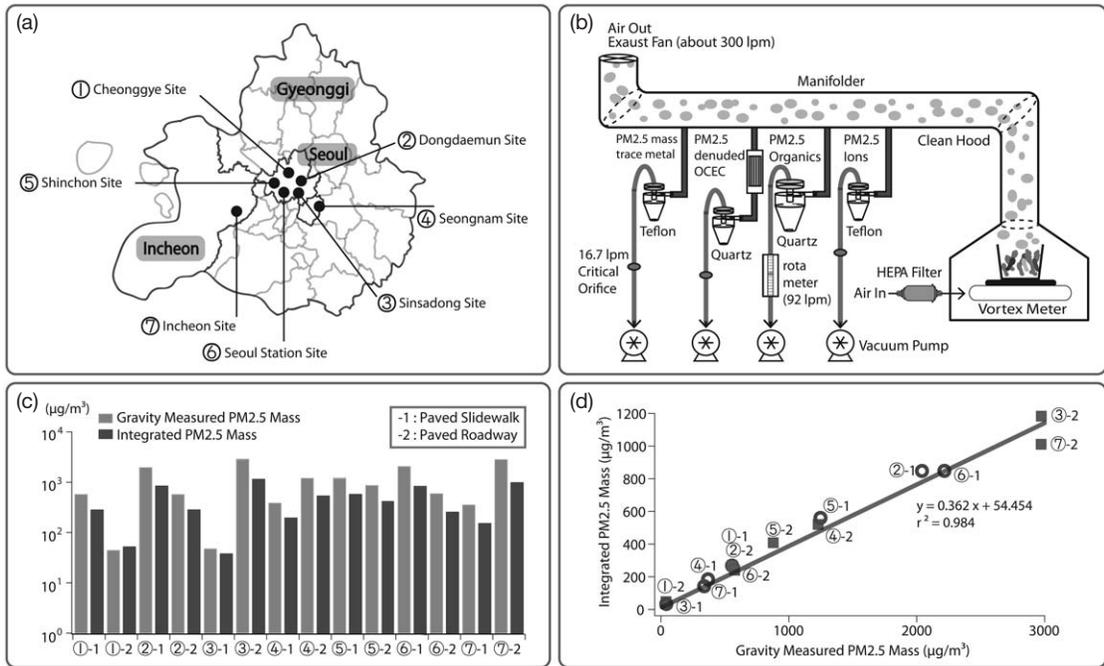


Fig. 2. (a) Sampling sites of road dust, (b) Schematic diagram of Resuspension System, (c) PM2.5 mass concentrations by gravity method and integration of chemical components for paved sidewalk and paved roadway, and (d) pairwise correlation scatterplots between PM2.5 mass concentrations by gravity method and integration of chemical components for paved sidewalk and paved roadway.

한 도로변 분진의 대기 기여도 산출에 기여하고자 한다.

2.1 채취 지점

분진은 (1) 청계천 중구 주교동 125, (2) 동대문 중구 을지로 7가 135-5, (3) 신사동 강남구 논현동 1, (4) 경기 성남의 수정구 수진 2동 4531, (5) 신촌-마포구 노고산동 31-4, (6) 서울역 용산구 동자동 43, (7) 인천광역시 남구 독정리로 95에서 채취하였다(그림 2(a)). 분진은 강우 현상이 끝나는 시점에서 최소 3일 이상이 경과한, 2012년 8월 1일에 각 지점에서 진공 포집기를 이용하여 동시에 포집되었으며, 포장 인도와 아스팔트 차도로 나누어 모든 지점에서 각각 포집되었다.

2.2 PM2.5 재비산 실험

그림 2(b)에 도로변 재비산 분진 포집과정을 도시하였다. 7곳에서 채취한 분진을 pore size 180 μm 인

체를 이용하여 큰 분진을 제거한 후, 재비산 분진 포집시스템에 의해서 PM2.5 분진을 재포집 하였다. 간략히, 도로변 재비산 분진 포집은 HEPA 필터를 이용하여 외부의 공기가 유입되지 않은 상태에서 진행되었다. 180 μm 이하 크기로 분리된 분진은 2,000 rpm 이상의 Vortex meter를 이용하여 강하게 진동시켜 분진의 재비산을 강제 유도한 후, 배관 끝에 설치한 팬에 의해 음의 압력상태를 유지시켜 이동관 안으로 재비산된 분진을 이동시켰다. 이동된 재비산 분진을 각각 4개의 싸이크론을 통해 PM2.5를 포집하였다. 첫 번째 싸이크론(URG-2000-30ENYF, URG Corp., USA)을 통과한 중금속 등의 원소 성분을 분석하기 위해 16.7 lpm (liter per minute) 유량 하에서 테프론 필터 (PTFE, R2PJ047, Pall Corp., USA)에 포집되었다. 이때의 유량은 오리피스에 의해 일정하게 유지되었다. 두 번째 장치는 탄소성분을 분석하기 위해 16.7 lpm 유량 하에, 석영필터 (Pallflex, 2500QATUP, Pall Corp., USA)에 포집하였다. 이때 휘발성 탄소성분을 제거하

기 위해 사이크론과 이동관 사이에 탄소 디뉴더를 설치하여 휘발성 물질이 석영필터에 포집되기 전에 제거하였다. 세 번째 사이크론 장치에서 유기 성분을 분석하기 위해 92 lpm 유량으로 분진을 석영필터에 포집하였다. 마지막 장치에서는 이온 성분을 분석하기 위해서 3단 필터팩을 이용하여 분진을 테프론 필터에 포집하였다. 이렇게 재비산되어 필터에 포집된 분진을 각각 XRF (X-Ray Fluorescence), OCEC (Organic Carbon & Elemental Carbon) 분석기, GC/MS (Gas Chromatography/Mass Spectrometer), IC (Ion Chromatography) 등을 이용하여 분진의 전체적인 화학 성분을 분석하였다.

첫 번째 사이크론에서 포집한 PM2.5 분진은 원소 성분 분석을 수행하기 전, 필터의 전, 후 무게 측정을 하여, 분진의 총 PM2.5 mass 농도를 중량법으로 계산하였다. 무게를 측정하기 전 최소 24시간 동안 테시케이터 (항온, 항습)에 보관하였으며, 필터의 무게는 0.01 mg 해상도 전자저울 (Sartorius CP225D, Goettingen, Germany)을 사용하였다. 필터의 정전기 (Staticmaster, 2U500, NY, USA) 제거 후, 시료 채취 전 후로 각각 3번씩 측정하여 평균값을 사용하였다.

분석 자료의 신뢰성을 나타내고자, 중량법에 의한 테프론 필터의 무게와 분석된 OC, EC, 이온 성분, 원소 성분의 총 농도의 합을 인도와 차도로 나누어 그림 2(c), (d)에 나타내었다. 재비산 포집량은 각 실험마다 다르게 나타났지만, 두 결과의 차이가 일정하게 나타나는 것을 볼 수 있고(그림 2(c)), 상관성을 분석해 보면, 높은 상관관계결정계수 ($r^2=0.984$)와 함께, 기울기 값은 0.362로 중량법에 의한 농도가 크게 나타났다(그림 2(d)). 이는 (1) 미분석 화학성분, (2) OM/OC (organic matter/organic carbon) 및 (3) 산화성 원소의 무게에 의한 차이로 볼 수 있으며, 종합적으로 높은 분석 신뢰성을 나타내었다.

2.3 이온 성분 분석

3단 필터팩 (URG-2000-30FG, URG Corp., USA)을 이용하여 이온 성분을 분석하였다. 3단 필터팩에 테프론 재질의 제플러 필터(Zeflour, P5PJ047, Pall Corp., USA), 나일론 필터 (Nylon filter), citric acid로 함침시킨 유리섬유 필터 (Glass fiber filter)를 차례로 장착하여, 이온 성분을 분석하였다. 나일론 및 유리섬유 필터로부터 분석된 NO_3^- 및 NH_4^+ 로부터, 총 이온 성분

Table 1. Precision results by anion and cation analysis using relative standard deviation (RSD).

Components	Zeflour filter	Nylon filter	Glass fiber filter
	RPD (%)	RPD (%)	RPD (%)
F^-	3.26		
Cl^-	2.17		
NO_2^-	5.5		
NO_3^-	1.24	0.24	
SO_4^{2-}	1.36		
PO_4^-	N.D.		
Na^+	7.34		
NH_4^+	4.27		0.39
K^+	2.37		
Mg^{2+}	3.88		
Ca^{2+}	1.44		

중 가스상 성분을 보정하였다. 간략히, 각 필터는 60 °C에서 4시간 동안 초순수액을 사용하여 초음파 추출기로 추출한 후에, 0.2 μm syringe filter를 사용하여 여과하였다. 양이온 Suppressor (CSRS-Ultra Cation Self-Regenerating Suppressor, Thermo., USA) 및 음이온 Suppressor (ASRS-Ultra Anion Self-Renerating Suppressor, Thermo., USA)를 장착한 이온크로마토그래피 (Dionex DX-320, Thermo., USA)를 이용하여 양이온 (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) 및 음이온 (F^- , Cl^- , NO_2^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^-)을 분석하였다. 이송액 (Eluent)은 음이온의 경우 Hydroxide 30 mM (EG40 Eluent Generator-Potassium Hydroxide), 양이온의 경우 H_2SO_4 18 mM을 사용하였으며, 25 μL 시료를 주입하여 분석하였다. 컬럼은 SO_4^{2-} , PO_4^- 의 경우 AS11-HC, F^- , Cl^- , NO_2^- , NO_3^- 인 경우 AS14A 컬럼을 이용하였고, 양이온 컬럼은 CS12A를 장착하여 분석하였다. 검량선의 상관관계 결정계수는 모두 0.999 이상으로 나타났다. 분석의 정밀도를 판단하기 위하여 하나의 시료를 3회 반복 분석하였으며, 그 결과, 각 필터의 이온 성분별 정밀도 (RPD, relative percent differences) 결과를 표 1에 나타내었다.

2.4 원소 성분 분석

도로변 분진 중 PM2.5의 원소 성분을 분석하기 위하여 미국 Clarkson University에 위치한 ED-XRF (Energy Dispersive XRF, SPECTRO Analytical Ins., Germany)를 이용하여 분석하였다. 분석 결과 총 25개의 원소 (Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr,

Table 2. Method of Detection Limit (MDL) for analyzed components by XRF.

Elements	MDL (ng/filter)	Below MDL (%)
Na	1320.5	14.3
Mg	707.3	0.0
Al	160.7	0.0
Si	57.9	0.0
P	41.4	7.1
S	230.8	0.0
Cl	80.1	0.0
K	57.6	0.0
Ca	72.0	0.0
Ti	27.8	0.0
V	10.9	14.3
Cr	31.3	7.1
Mn	72.4	0.0
Fe	844.6	0.0
Co	28.0	35.7
Ni	45.6	35.7
Cu	261.4	35.7
Zn	186.3	0.0
As	7.6	21.4
Rb	21.0	7.1
Sr	23.3	7.1
Sn	228.0	42.9
Te	0.0	0.0
I	0.0	0.0
Pb	43.1	14.3

Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Sn, Te, I, Pb)를 정량화 할 수 있었다.

분석최저한계 (MDL, method of detection limit) 값을 블랭크 결과 값으로부터 계산된 표준편차의 3배로 사용하여, 시료의 70% 이상이 MDL보다 낮은 경우 본 연구에서는 정량화하지 않았다. 시료의 70% 이상이 MDL보다 낮은 원소는 Sc, Ga 등 13개 성분으로(표 2), 이들 원소는 (1) 도로변 PM2.5 먼지 중 함량이 극히 낮거나, (2) XRF로 정량할 수 없는 원소라 판단한다. 또한 Cd과 Br의 경우 블랭크의 농도가 높아 제외하였다.

동일한 시료를 3회 분석하여 분석의 정밀도를 분석한 결과, Co, Te, I를 제외하고 통계적으로 유의한 수준에서 좋은 결과 값을 나타내었다. 분석의 정확도를 판단하기 위해 도로먼지의 표준물질인 SRM-2783 (NIST)을 사용하였으며, 그 결과 SRM의 회수율은 원소별로 46% (S)-298% (Na)로 나타났으며, XRF의 특성상 저분자량의 경우 좋지 않게 나타났다. SRM-2783의 분석 RSD는 최대 113.1% (Ga)로 나타났다. 이에

각 금속성분의 농도는 SRM 회수율 등을 이용하여 최종 보정하였다.

2.5 유기 성분 분석

총 7개 지점에서 채취한 초미세먼지 시료에서 유기 성분 중 Phenanthrene를 비롯한 17종의 PAHs 성분들과 25종의 n-Alkanes (C16-C34) 유기 성분을 분석하였다. 간략히, 석영 필터를 유기용매 (DCM, dichloromethane)에 넣고, 30분간 초음파기 (Power Sonic 520, Hwashin, Korea)를 이용하여 두 차례 추출한 뒤, 1차 질소가스 회전 농축기 (TurboVap II, Biotage, Sweden)를 사용하여 시료의 용매량을 약 20 mL로 농축한 후, 시료 내 잔류 부유물질을 syringe filter (PTFE, 0.45 µm pore size, Pall Corp., USA)를 이용하여 제거하였다. 이후 2차 농축기 (Reacti-Vap Evaporators, Thermo Sci., USA)를 이용하여 0.5 mL로 최종 농축하여, GC/MS (gas chromatography mass spectrometer, HP 6890/HP 5973A)를 이용하여 분석하였다. 또한, 7종의 내부표준물질 (Phenanthrene-d10, Fluoranthene-d10, Chrysene-d12, Perylene-d12, Benzo[ghi]perylene-d12, C24-d50, C30-d62)을 첨가하여 추출, 정제 등 시료 전 처리에 대한 회수율을 평가하였다. 전자 충격 이온화법 (EI, electron impact ionization)의 조건 하에 1.0 µL을 주입하여, FSM (Full Scan Mode)와, SIM (Selected Ion Mode)를 동시에 사용하였다. 시료 채취 및 전처리 과정에서 발생할 수 있는 유기 성분의 오염정도를 파악하고, 실제 시료를 보정하기 위하여 실험 바탕시료 및 샘플링 바탕시료들을 각각 3개씩 분석하여, 분석 대상 물질인 n-Alkanes과 PAHs에 대한 오염도를 평가하여 이를 보정하였다.

2.6 유기탄소 및 원소탄소 분석

OC와 EC 분석을 위하여 실험실 탄소분석기 (Lab-based OCEC Carbon Aerosol Analyzer, Sunset laboratory Inc., USA)를 이용하였다. 탄소분석기는 나타넨 바와 같이 NIOSH5040 (National Institute of Occupational Safety & Health) 프로토콜을 기초로 한 열광학적 투과도법을 이용하여 분석하였다 (Park *et al.*, 2014). 포집한 석영 여과기로부터 1.5 cm² 크기로 절단하여 분석하였으며, Sucrose Test 및 재차 분석을 통해 정확도 (100±2%)와 정밀도 (100±3%)를 확인하였다. 간략히, 승온과정을 거쳐 유기탄소와 원소탄소를 여

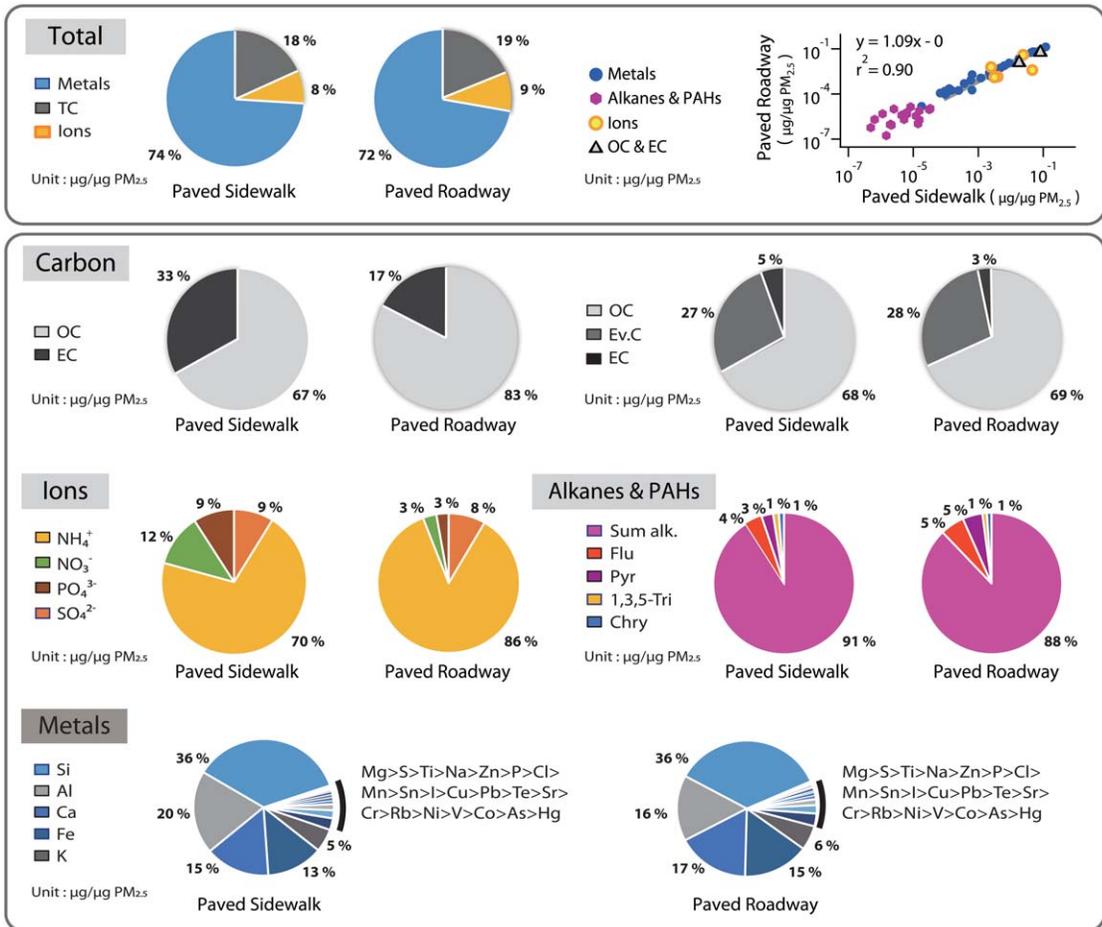


Fig. 3. Pie charts of chemical compositions normalized to PM_{2.5} mass for paved sidewalk and paved roadway.

과지로부터 증기화 한 후 산화, 환원과정을 거쳐 메탄의 양을 불꽃이온화 검출기 (FID, flame ionization detector)로 분석한다. 이때 장치 내 레이저 투과도에 따른 여과지의 색을 관측하여 여과지에 포집된 OC 및 EC의 분리점 (split time)을 결정하였다. 심도있는 분석을 위해 탄소분석기로부터 1.0 Hz 전기적 신호로 출력되는 값을 이용하여 열광학 분포를 나타내었다.

3. 결 과

본 연구는 총 7곳의 도로변 분진을 인도 및 차도에서 각각 채취하여, XRF, OCEC, GC/MS, IC를 이용

하여 각각의 성분을 분석하였다. 분석된 각각의 성분을 중량법으로 분석한 PM_{2.5} mass로 나누어 정규화 (μg 성분/ $\mu\text{g PM}_{2.5}$ mass - 중량법)한 성분자료를 최종적으로 분석하였다.

그림 3은 분석된 각 성분을 PM_{2.5} mass로 정규화한 성분자료를 이용하여 각 성분의 비율을 나타낸 것이다. 종합적으로 살펴볼 때, 원소를 포함한 원소 성분이 인도 및 차도에서 각각 74%와 72%로 가장 높게 나타났으며, 유기탄소 및 원소탄소가 18%, 19%로 분석되었고, 이온 성분이 8%, 9%로 분석되었다. 전체적으로 인도 및 차도의 PM_{2.5} mass 정규화한 성분분석을 비교해 볼 때, 상관관계 결정계수 (r^2)가 0.90, 기울기는 1.09로 나타나, 분석된 성분이 인도 및 차도

의 PM_{2.5} mass 내에서 몇몇 성분을 제외하고 유사한 비율로 나타났다.

3.1 이온 성분

먼저 이온 성분 분석결과 중 특이한 점은 신사, 성남, 신촌, 서울역 및 인천의 도로와 신촌, 서울역, 인천의 인도에서 NO₂⁻가 검출되었다. 과거 연구를 살펴보면, 중국 베이징의 PM₃₀에서 NO₂⁻의 검출 사례가 있어, 향후 우리나라 도로변 구성 성분에서의 NO₂⁻에 대한 연구가 요구된다고 하겠다(Han *et al.*, 2007). 이에 그림 3에는 NO₂⁻ 농도를 제외한 이온 성분만의 PM_{2.5} mass 내의 비율을 나타내었다. 또한, 이온 성분 중 NH₄⁺이 평균 78%로 대기 중 이온 성분의 비율과는 다른 비율을 나타내었다. 이는 앞서 설명한 NO₂⁻와 더불어 유기 이온 등 도로변 토양에 존재하는 다른 음이온 성분이 존재 할 가능성이 있을 것으로 사료된다.

그 결과, 이온 성분의 경우 인도에서는 NH₄⁺(70%), NO₃⁻(12%), PO₄⁻(9%), SO₄²⁻(9%) 순으로 분석되었고, 차도에서는 인도와 동일하게 NH₄⁺(86%)이 가장 크게 분석 되었으며, 그 다음으로 SO₄²⁻(8%), NO₃⁻(3%), PO₄⁻(8%) 순으로 분석되어 인도와 차도에서의 이온 성분이 각기 다른 비율을 나타낼 수 있었다.

분진을 채취한 곳이 도로 및 도로와 바로 인접한 인도이기 때문에 자동차에서 배출되는 황산화물 및 질소산화물의 기여도와 더불어, 위에서 언급한 바와 같이 인도 및 차도를 구성하고 있는 도로 자체를 구성하는 분진 성분의 영향이 복합적으로 나타나는 것으로 판단된다. 이에 향후 통계모델 등에 적용할 경우 이를 구분해야 함을 명시한다.

음이온의 경우 인도에서의 PM_{2.5} mass 중 SO₄²⁻ 농도 비율이 청계천, 신사, 인천의 차도보다 높게 나타났다. NO₃⁻ 경우, 동대문, 신사, 서울역의 인도가 차도보다 높게 나타났다. 양이온 NH₄⁺의 경우 모든 지점에서 높은 비율을 나타냈으며, 인도와 차도에서 PM_{2.5} 내 NH₄⁺ 분율이 각각 $2.41 \times 10^{-2} \pm 3.72 \times 10^{-2}$ (평균 \pm 표준편차), $3.98 \times 10^{-2} \pm 9.28 \times 10^{-2}$ 로 나타났다.

3.2 원소 성분

본 연구에서는 XRF를 사용하여 도로변 재비산 PM_{2.5} 중 원소 성분을 분석하였다. XRF의 경우 저

분자의 경우 불확실도가 큰 단점이 있으나, 무추출에 따른 시간과 비용 면에서 큰 장점을 가지고 있으며, 도로변의 주 화학성분인 Si를 분석하는데, ICP보다 높은 정확성을 나타내는 것으로 알려져 있다.

정량화된 26개 원소의 분진 중 PM_{2.5} mass 평균 비율은 70%로 인도 및 차도 사이에 통계적으로 유의한 차이는 나타내지 않았다(p-value=0.401, Wilcoxon nonparametric test).

대표적인 토양 성분이라고 할 수 있는 Si, Al, Ca, Fe, K의 비율이 PM_{2.5} 중 인도 및 차도에서 각각 36%, 20%, 15%, 13%, 5% 및 36%, 16%, 17%, 15%, 6%로 분석되어 Al, Ca의 비를 제외하고 큰 차이를 나타내지 않았다. 그 다음으로 Mg, S, Ti, Na 등의 순으로 분석되었고, Hg가 가장 낮은 비율로 존재함을 알 수 있었다. 이는 도로변 재비산의 대표 지시 화학 성분인 Si가 인도 및 차도의 PM_{2.5} mass 내에서 각각 $12.0 \pm 3.4\%$ 및 $13.6 \pm 6.9\%$ 로 분석되었다. 이는 향후 통계적 수송모델로부터 도로변 비산먼지의 기여도를 분석하는데, 지시 화학종으로서 매우 중요한 자료로 사용되리라 판단한다.

Zn의 주요 자동차 관련 배출원은 타이어 마모로 볼 수 있으며(Adachi and Tainosho, 2004), Cu는 브레이크 패드 마모의 지시 화학 성분으로 알려져 있다(Harrison *et al.*, 2012). 따라서 인도에 비해 도로먼지에서 더 높은 Zn과 Cu의 농도가 나타날 것으로 예상되었으나, Zn의 경우 인도와 차도에서 PM_{2.5} 내 분율이 각각 $2.45 \times 10^{-3} \pm 1.13 \times 10^{-3}$, $2.85 \times 10^{-3} \pm 1.27 \times 10^{-3}$ 으로 유사한 농도를 나타냈으며, Cu의 경우 또한 인도와 차도에서 각각 $5.85 \times 10^{-4} \pm 3.10 \times 10^{-4}$, $8.24 \times 10^{-4} \pm 8.21 \times 10^{-4}$ 로 유사한 분율을 나타내었다. 자동차에서 배출될 수 있는 Pb의 경우(Lin *et al.*, 2005), $3.71 \times 10^{-4} \pm 1.19 \times 10^{-4}$, $4.94 \times 10^{-4} \pm 3.52 \times 10^{-4}$ 로 도로와 인도의 뚜렷한 차이를 볼 수 없었다.

Si, Mg, Al, Fe, Mn이 주로 토양 성분에 기인하여 도로 및 인도 분진 내에 분포하고, Zn, Cr, Cu, Pb, P는 자동차에서 기인한다고 알려져 있다(Harrison *et al.*, 2012; Peltier *et al.*, 2011). Zn과 P는 자동차 모터 오일에 포함되어 있어 이 두 원소의 농도가 좋은 상관관계를 나타내는 연구 결과가 존재한다(Cadle *et al.*, 1999). Ca과 Mg은 토양성분이면서 모터 오일에 첨가제로 사용되기도 한다. 본 연구에서는 Si, Mg, Al, Fe, Mn이 좋은 상관관계를 나타낸 반면, Ca은 이들

토양 성분과 유의한 관계를 나타내지 않았다. 이는 도로 먼지 내 Ca이 다른 토양 성분과 달리 토양에 기인하지 않았음을 나타낸다. 또한 타이어 마모의 지시 화학성분인 Zn과 브레이크 마모의 지시 화학성분인 Cu 사이에는 예상과 달리 높은 상관관계가 나타나지 않았다. 그러나 Zn은 다른 자동차 배출 지시 화학성분인 Pb, Cr, P과 좋은 양의 상관관계를 나타냄으로써 Zn, Pb, Cr, P은 동일한 배출원에서 기인한다는 것을 나타낸다.

3.3 유기 성분

모든 지점에서 PAHs의 경우 17종의 성분들 중에서 벤젠고리 4개로 구성된 Fluoranthene (Flu)과 Pyrene (Pyr), Chrysene (Chry)이 상대적으로 높은 비율로 검출되었고, 또한 1,3,5-Triphenylbenzene (1,3,5-Tri)도 검출되었다. 그 외 성분들은 샘플링 지점마다 농도 차이는 보였지만, 모든 7개 지점에서 검출된 PAH 성분들의 종류는 동일하게 검출되었다.

인도와 차도에서 검출된 PAHs 성분들을 좀 더 자세히 살펴보면, 모두 Flu의 구성비가 각각 $6.36 \times 10^{-6} \pm 4.56 \times 10^{-6}$, $4.72 \times 10^{-6} \pm 2.97 \times 10^{-6}$ 로 가장 높게 나타났고, 그 다음으로 Pyr이 큰 비율을 차지하였다. 또한 인도와 차도에서의 PAHs 성분들의 구성 프로파일은 유사한 경향성을 나타내어, 두 지점간의 통계적 차이를 볼 수 없었다. 이에 본 연구결과를 바탕으로 서울 도로변 지역을 대표할 수 있는 PAHs 성분들의 표적물질 지시 화학성분으로는 Flu과 Pyr, Chr, 1,3,5-Tri를 활용할 수 있을 것으로 판단하고, 인도와 도로변 모두 동일한 성분들로 구성되어 있는 것으로 볼 때, 도로변에서의 PAHs 성분들의 배출원 특성은 자동차 연소와 관련된 동일할 것으로 사료된다.

인도와 차도의 지역별 n-Alkanes 성분들의 구성 프로파일을 검토해 보면, 인도와 차도를 구성하는 n-Alkanes의 탄소개수 분포가 다르게 나타남을 알 수 있었다. 인도에서는 C33이 가장 큰 비율을 차지하였고, 그 다음으로는 C21, C24 성분들의 구성비가 크게 나타났다. 반면, 차도에서는 C31이 가장 큰 비율을 나타냈고, 그 다음으로는 C32, C31로 나타났다. 더불어, 인도에 비해 차도에서 더 다양한 n-Alkanes 성분들이 검출됨을 알 수 있었다. 이를 통해, n-Alkanes의 경우 PAHs 성분들과는 달리 인도와 차도에서의 구성 비율이 다르게 나타났고, 이는 인도와 차도에 n-Alkanes

의 분포에 영향을 주는 주원인이 다름을 나타낸다. 이에 수용모델 적용 시 본 연구에서 제시한 자료를 활용하여 인도 및 차도로부터 분리된 기여율 산정을 할 수 있으리라 판단한다.

3.4 유기탄소 및 원소탄소

7개 지점 유기탄소 및 원소탄소의 분석 결과 PM 2.5 mass 중 인도와 차도에서 유기탄소는 각각 $5.57 \times 10^{-2} \pm 1.80 \times 10^{-2}$, $8.12 \times 10^{-2} \pm 5.88 \times 10^{-2}$ 로 분석되었고, 원소탄소는 각각 $2.70 \times 10^{-2} \pm 2.38 \times 10^{-2}$, $1.72 \times 10^{-2} \pm 7.18 \times 10^{-2}$ 로 분석되었다.

분석된 OC가 도로변에 잔류하는 성분 및 자동차 배기가스 등 모두에서 영향을 받을 수 있다는 것을 감안할 때, 원인을 이해하기 위해서는 좀 더 심도 있는 분석이 요구된다고 하겠다. 이에 탄소성분의 특성을 분석하기 위해, 각 지점의 탄소 열광학 분포를 그림 4에 나타내었고, 그림 4(a8), (b8)에 평균 열광학 분포를 표준편차와 함께 나타내어 탄소성분 특성을 분석하였다. 탄소 열광학 분포는 분석된 CH₄의 ppm 농도(dCH₄ ppm dt⁻¹)를 같은 시료에 분석된 전체 총탄소(TC, total carbon) 농도 내의 비율을 분석하기 위해 총탄소 농도로 정규화(dCH₄ ppm dt⁻¹/TC μgm⁻³ dt⁻¹)하여 나타낸 것이다. 각 분포 결과는 현장 공시료를 이용한 양의 오차 보정 및 레이저 투과율, 내부 표준물질 정확도 등을 확인하여 최종 데이터를 계산하여 나타내었다.

방향족 탄화수소를 포함하는 1차 유기분진의 탄소 성분 구성 비율이 높은 경우 화학적으로 강한 결합력에 의해 상대적으로 고온에서 분해되어 검출된다는 이론을 기반으로 한다. 좀 더 자세히 살펴보면, 모든 지점에서 탄소 분석 중 He 상태 하에서 4개의 피크를 나타내었다. 이는 열분해와 관련된 유기 성분이 다양하게 시료 내에 분포되어 있음을 의미한다. 예를 들어, 저온(약 300°C)에서 분석된 피크는 상대적으로 낮은 휘발성 물질을 포함한 1차 및 2차 물질이 상당량 존재하고 있음을 의미한다. 이를 비교 설명하고자 그림 4(c1)-(c4)에 1차 물질 중 PAHs 대표 성분인 Benzo(ghi)perylene (C₂₂H₁₂), 2차 물질 중 Phthalic acid (C₈H₆O₄), 무기 탄소 성분인 Sodium carbonate (Na₂CO₃), 알칸성분인 Tetracosane (C₂₄H₅₀)을 탄소분석기에 직접 주입하여 열광학분포 결과를 나타내었다. 물론 선정된 성분들이 대기 중에 존재하는 모든 화합물의 특성

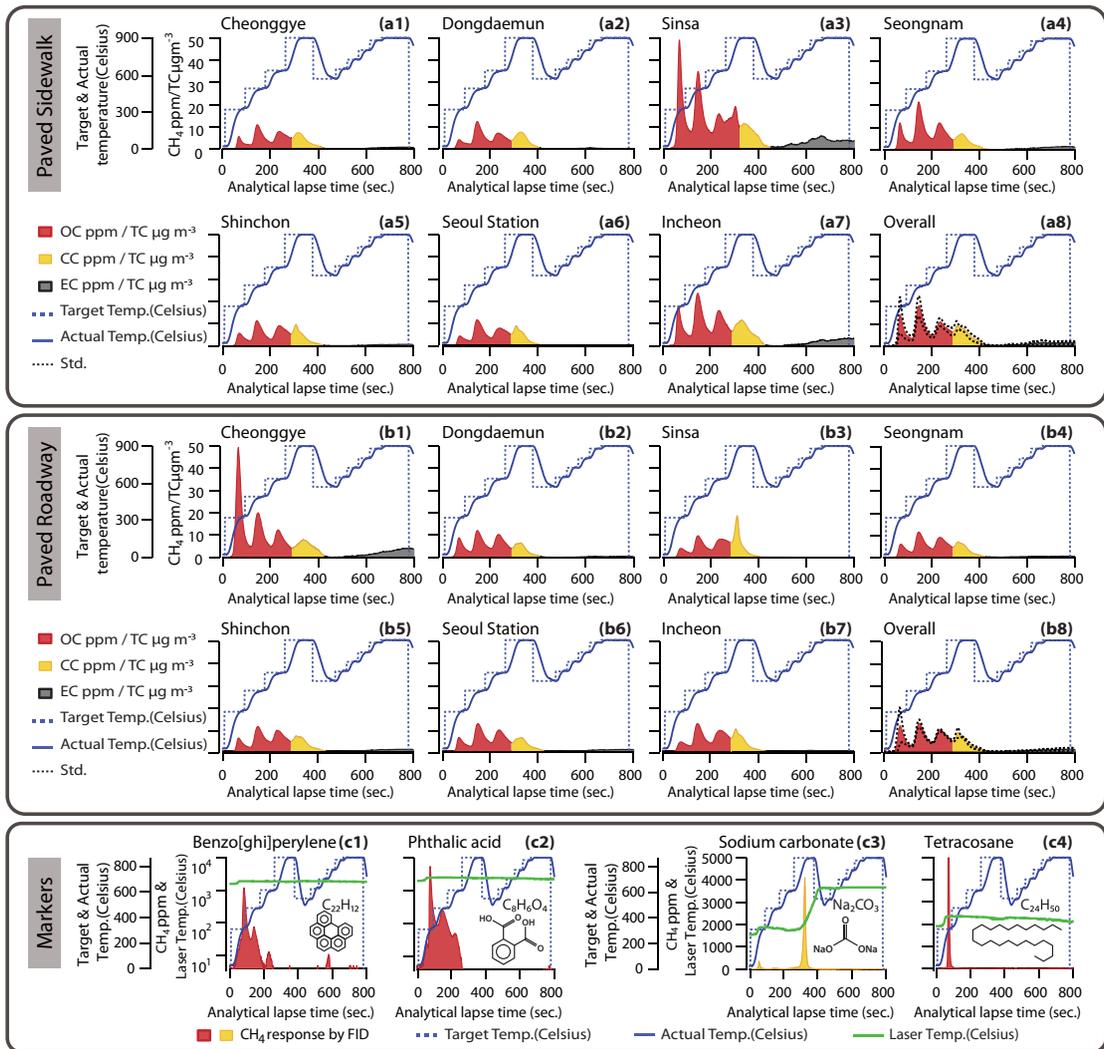


Fig. 4. Carbonaceous Thermal Distribution of organic and elemental carbon for (a) paved sidewalk and (b) paved roadway.

을 나타낸다고 할 수는 없지만, 화학 성분 및 원인파 관련된 특성을 이해할 수 있으리라 본다.

그 결과, Benzo(ghi)perylene 열광학분포는 저온도에서부터 고온도(약 600°C)까지 세 개의 피크가 나타났고, 열분해탄소(PC, pyrolytic carbon) 피크 또한 분석 시 산소 주입 상태에서 나타났다. Phthalic acid 열광학분포는 저온도에서부터 고온도에서까지 세 개의 피크가 나타났지만, 상대적으로 Benzo(ghi)perylene 보다 많은 양이 저온에서부터 중온까지 중복 피크 형

태로 분포하고 있으며, PC는 나타나지 않았다. Tetracosane 경우 저온(약 300°C)에서만 피크가 분석되었다. 이로부터 2차오염 물질 중, 벤젠 고리가 없는 알칸계열의 성분 또한 저온(약 300°C)에서 주피크가 분석되리라 예상된다. 그림 4의 도로 및 차도의 열광학분포 결과 4개의 피크 중 저온에서 분석된 첫 번째 피크는 알칸 계열의 낮은 휘발성 물질을 포함한 1차 및 2차 물질이라 판단되며, 4개의 피크 중 중온(약 600°C)에서 분석된 세번째 피크는 강한 결합력 PAHs

Table 3. Source Profile of the paved sidewalk and the paved roadway.

	Unit	Compound ID	Paved sidewalk	Uncertainty	Paved roadway	Uncertainty	Method
OC	µg/µg PM2.5	OC	5.57E-02	1.11E-02	8.12E-02	1.62E-02	NIOSH5040
EC	µg/µg PM2.5	EC	2.70E-02	5.40E-03	1.72E-02	3.43E-03	NIOSH5040
Ions	µg/µg PM2.5	NO ₃ ⁻	3.98E-03	5.98E-04	1.43E-04	2.15E-04	IC
	µg/µg PM2.5	SO ₄ ²⁻	3.02E-03	4.53E-04	3.89E-03	5.84E-04	IC
	µg/µg PM2.5	PO ₄ ⁻	3.12E-03	4.68E-04	1.29E-03	1.94E-04	IC
Metals	µg/µg PM2.5	NH ₄ ⁺	2.41E-02	3.61E-03	3.98E-02	5.97E-03	IC
	µg/µg PM2.5	Na	3.20E-03	4.81E-04	3.89E-03	5.84E-04	ED-XRF
	µg/µg PM2.5	Mg	9.02E-03	1.35E-03	1.15E-02	1.73E-03	ED-XRF
	µg/µg PM2.5	Al	6.50E-02	9.76E-03	5.98E-02	8.97E-03	ED-XRF
	µg/µg PM2.5	Si	1.20E-01	1.79E-02	1.36E-01	2.04E-02	ED-XRF
	µg/µg PM2.5	P	2.41E-03	3.62E-04	1.50E-03	2.26E-04	ED-XRF
	µg/µg PM2.5	S	6.31E-03	9.46E-04	7.63E-03	1.14E-03	ED-XRF
	µg/µg PM2.5	Cl	2.21E-03	3.32E-04	2.64E-03	3.95E-04	ED-XRF
	µg/µg PM2.5	K	1.80E-02	2.70E-03	2.23E-02	3.34E-03	ED-XRF
	µg/µg PM2.5	Ca	4.94E-02	7.40E-03	6.45E-02	9.67E-03	ED-XRF
	µg/µg PM2.5	Ti	4.74E-03	7.11E-04	5.37E-03	8.05E-04	ED-XRF
	µg/µg PM2.5	V	9.47E-05	1.42E-05	1.55E-04	2.33E-05	ED-XRF
	µg/µg PM2.5	Cr	1.27E-04	1.91E-05	2.24E-04	3.36E-05	ED-XRF
	µg/µg PM2.5	Mn	1.20E-03	1.80E-04	1.14E-03	1.71E-04	ED-XRF
	µg/µg PM2.5	Fe	4.33E-02	6.50E-03	5.87E-02	8.80E-03	ED-XRF
	µg/µg PM2.5	Co	6.78E-05	1.02E-05	1.16E-04	1.73E-05	ED-XRF
	µg/µg PM2.5	Ni	9.67E-05	1.45E-05	9.42E-05	1.41E-05	ED-XRF
	µg/µg PM2.5	Cu	5.85E-04	8.78E-05	8.24E-04	1.24E-04	ED-XRF
	µg/µg PM2.5	Zn	2.45E-03	3.68E-04	2.85E-03	4.27E-04	ED-XRF
	µg/µg PM2.5	As	1.79E-05	2.69E-06	1.50E-05	2.25E-06	ED-XRF
	µg/µg PM2.5	Rb	1.17E-04	1.76E-05	1.64E-04	2.46E-05	ED-XRF
	µg/µg PM2.5	Sr	1.49E-04	2.23E-05	1.76E-04	2.64E-05	ED-XRF
	µg/µg PM2.5	Sn	6.49E-04	9.74E-05	1.90E-03	2.85E-04	ED-XRF
	µg/µg PM2.5	Te	2.48E-04	3.72E-05	1.74E-04	2.61E-05	ED-XRF
	µg/µg PM2.5	I	6.40E-04	9.60E-05	1.82E-04	2.73E-05	ED-XRF
	µg/µg PM2.5	Hg	1.63E-05	2.45E-06	0.00E+00	0.00E+00	ED-XRF
	µg/µg PM2.5	Pb	3.71E-04	5.57E-05	4.94E-04	7.42E-05	ED-XRF
Alkanes	µg/µg PM2.5	C17	1.47E-06	2.94E-07	1.74E-07	3.49E-08	GC/MS
	µg/µg PM2.5	C18	4.89E-07	9.79E-08	5.84E-07	1.17E-07	GC/MS
	µg/µg PM2.5	C19	1.52E-05	3.04E-06	1.90E-06	3.80E-07	GC/MS
	µg/µg PM2.5	C20	2.00E-06	4.00E-07	9.77E-07	1.95E-07	GC/MS
	µg/µg PM2.5	C21	1.21E-05	2.42E-06	3.47E-06	6.93E-07	GC/MS
	µg/µg PM2.5	C22	5.22E-06	1.04E-06	2.01E-06	4.03E-07	GC/MS
	µg/µg PM2.5	C23	0.00E+00	0.00E+00	4.61E-07	9.23E-08	GC/MS
	µg/µg PM2.5	C24	1.39E-05	2.77E-06	1.07E-06	2.15E-07	GC/MS
	µg/µg PM2.5	C25	0.00E+00	0.00E+00	5.02E-07	1.00E-07	GC/MS
	µg/µg PM2.5	C26	6.43E-07	1.29E-07	2.05E-06	4.10E-07	GC/MS
	µg/µg PM2.5	C27	1.13E-06	2.27E-07	4.80E-06	9.59E-07	GC/MS
	µg/µg PM2.5	C28	1.52E-05	3.05E-06	7.53E-06	1.51E-06	GC/MS
	µg/µg PM2.5	C29	3.29E-05	6.58E-06	1.09E-05	2.18E-06	GC/MS
	µg/µg PM2.5	C30	6.14E-06	1.23E-06	5.73E-06	1.15E-06	GC/MS
µg/µg PM2.5	C31	3.09E-05	6.18E-06	9.28E-06	1.86E-06	GC/MS	
µg/µg PM2.5	C32	2.51E-06	5.02E-07	1.00E-05	2.01E-06	GC/MS	
µg/µg PM2.5	C33	8.24E-06	1.65E-06	1.40E-05	2.80E-06	GC/MS	
PAHs	µg/µg PM2.5	Flu	6.36E-06	1.27E-06	4.72E-06	9.45E-07	GC/MS
	µg/µg PM2.5	Pyr	4.34E-06	8.69E-07	3.92E-06	7.84E-07	GC/MS
	µg/µg PM2.5	Chry	1.94E-06	3.88E-07	9.29E-07	1.86E-07	GC/MS
	µg/µg PM2.5	1,3,5-Tri	2.12E-06	4.24E-07	8.50E-07	1.70E-07	GC/MS

성분 등을 포함하고 있을 것이라 생각한다.

본 열광학 분포 해석에서 매우 흥미로운 점은 고온(840°C)에서 분석된 피크이다. (1) 가장 가능성 있는 데이터 해석은 CO_3^{2-} 와 같은 무기탄소에 의한 영향이다. 도로변 토양 성분 중에 다량의 무기탄소가 포함되어 있을 가능성이 매우 크기 때문이다. 전 세계적으로 여러 연구 논란에도 불구하고, IMPROVE (Interagency Monitoring of Protected Visual Environments) 프로토콜 및 EUSAAR (European Supersites for Atmospheric Aerosol Research) 프로토콜과는 달리, 본 NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) 프로토콜의 840°C 고온 설정은 CO_3^{2-} 와 같은 무기탄소 분석이 주된 목적이라 할 수 있다. 즉, 고온(840°C) 및 무산소 상태에서 명확히 분석된 독립 피크를 무기탄소라 정의하고 있다. 이를 확인하고자 Sodium carbonate를 직접 주입하여 열광학분포를 확인한 결과(그림 4(c-3)), 고온(840°C)에서 독립된 피크를 확인할 수 있었다. 이는 앞서 설명한 그림 1의 EPA 프로파일 중 OC4에 해당하는 피크로, NIOSH 법으로 분석된 유기탄소 농도의 일부가 무기탄소를 포함할 수 있다고 판단한다. (2) 다음으로 가능성 있는 해석은 레이저 투과에 따른 유기 및 원소탄소의 분리점이 일부 시료에 대해서 840°C의 분석 시간에 나타난다. 이에 일부 성분이 원소탄소와 관련성이 있을 것으로 생각한다. He 상태 하에서 원소탄소의 분석은 아직까지 과학적으로 명확히 설명되지 않고 있어, 이에 대한 데이터 해석에 매우 주의해야 한다. 이에 본 연구에서는 고온에서 분석된 피크를 그림 4에서 노란색으로 표기하고, 이를 Evolution Carbon (Ev. C)라 표기하여 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 볼 수 있듯이, 도로 및 차도에서 OC와 EC의 비율은 각각 67%, 33% 및 83%, 17%로 나타난 반면, Ev. C를 포함한 OC, Ev. C와 EC의 비율은 68%, 27%, 5% 및 69%, 28%, 3%로 나타남을 알 수 있었다. 이는 향후, 도로변에서 생성된 프로파일을 통계모델 등에 적용시 매우 신중해야 함을 의미한다.

4. 결 론

본 연구는 서울시 및 경기, 인천지역 도로변에서 채취한 분진을 재비산시스템을 이용하여 재비산분진을

유도한 뒤 PM2.5를 포집하여, 유기 성분, 이온 성분, 원소 성분 등을 종합적으로 분석하였다. 그 결과, 인도에서는 NH_4^+ (70%), NO_3^- (12%), PO_4^- (9%), SO_4^{2-} (9%), 순으로 분석되었고, 차도에서는 NH_4^+ 이 가장 크게 분석되었으며, 대표 지시화학적 성분인 Si가 인도 및 차도의 PM2.5 mass내에서 각각 $12.0 \pm 3.4\%$ 및 $13.6 \pm 6.9\%$ 로 분석되었다. 서울 도로변 지역을 대표할 수 있는 PAHs 성분들의 표적물질 지시 화학성분으로는 Fluoranthene과 Pyrene, Chrysene, 1,3,5-Triphenylbenzene을 활용할 수 있을 것으로 판단한다. 열광학분포를 통한 탄소 특성을 분석한 결과, 고온(840°C)에서 CO_3^{2-} 와 같은 무기탄소에 의한 영향을 확인할 수 있었다. 열광학분포를 통한 탄소 특성을 분석함과 동시에 국내 원인 프로파일을 완성시킴으로써 향후 통계적 수용모델로부터 도로변 비산먼지의 기여도를 분석하는데 매우 중요한 자료를 제공하리라 판단한다. 위의 모든 분석을 토대로 원인 프로파일을 완성하여 표 3에 나타내었다. 마지막으로 원인 프로파일은 PM2.5의 질량농도로 정규화한 프로파일임을 명시한다.

감사의 글

본 논문은 2012년도 국립환경과학원 연구사업인 “수용모델에 의한 도로변 미세먼지의 배출원별 기여도 평가 연구(12-04-10 오토오일사업 2차년도)” 지원 및 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2013R1A1A2065686)을 받아 수행된 기초연구사업 연구 결과입니다. 또한, 본 논문은 목포대학교 공학교육혁신센터의 “현실참여 공학교육”의 재정적 지원을 받았습니다. 본 연구를 위해 도움을 주신 국립환경과학원 교통환경연구소 김정수 소장님, 손지환 연구사님께 깊은 감사를 드립니다.

References

- Adachi, K. and Y. Tainosho (2004) Characterization of heavy metal particles embedded in tire dust, Environ. Int., 30(8), 1009-1017.
- Amato, F., M. Pandolfi, A. Escrig, X. Querol, A. Alastuey, J. Pey, N. Perez, and P.K. Hopke (2009) Quantifying

- road dust resuspension in urban environment by Multilinear Engine: A comparison with PMF2, *Atmos. Environ.*, 43(17), 2770-2780.
- Bae, M.S. and J.J. Schauer (2009) Analysis of Organic Molecular Markers in Atmospheric Fine Particulate Matter: Understanding the Impact of "Unknown" Point Sources on Chemical Mass Balance Models, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 25(3), 219-236. (in Korean with English abstract)
- Bae, M.S., C.H. Jung, Y.S. Ghim, and K.H. Kim (2013) A Proposal for the Upgrade of the Current Operating System of the Seoul's Atmospheric Monitoring Network Based on Statistical Analysis, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 29(4), 454-465. (in Korean with English abstract)
- Becker, S., J.M. Soukup, and J.E. Gallagher (2002) Differential particulate air pollution induced oxidant stress in human granulocytes, monocytes and alveolar macrophages, *Toxicol. in Vitro*, 16(3), 209-218.
- Berger, J. and B. Denby (2011) A generalised model for traffic induced road dust emissions. Model description and evaluation, *Atmos. Environ.*, 45(22), 3692-3703.
- Cadle, S.H., P.A. Mulawa, E.C. Hunsanger, K. Nelson, R.A. Ragazzi, R. Barrett, G.L. Gallagher, D.R. Lawson, K.T. Knapp, and R. Snow (1999) Composition of Light-Duty Motor Vehicle Exhaust Particulate Matter in the Denver, Colorado Area, *Environ. Sci. Technol.*, 33(14), 2328-2339.
- Goel, R. and S.K. Guttikunda (2015) Evolution of on-road vehicle exhaust emissions in Delhi, *Atmos. Environ.*, 105, 78-90.
- Han, L., G. Zhuang, S. Cheng, Y. Wang, and J. Li (2007) Characteristics of re-suspended road dust and its impact on the atmospheric environment in Beijing, *Atmos. Environ.*, 41, 7485-7499.
- Han, S.H., J.S. Youn, and Y.W. Jung (2011) Characterization of PM10 and PM2.5 source profiles for resuspended road dust collected using mobile sampling methodology, *Atmos. Environ.*, 45(20), 3343-3351.
- Harrison, R.M., A.M. Jones, J. Gietl, J. Yin, and D.C. Green (2012) Estimation of the contributions of brake dust, tire wear, and resuspension to nonexhaust traffic particles derived from atmospheric measurements, *Environ. Sci. Technol.*, 46, 6523-6529.
- Kim, W.S. (2010) Characteristics of Particulate Matter by Chemical-Monitoring in Seoul, Korea, Seoul Development Institute Report.
- Lee, J.Y., Y.P. Kim, G.N. Bae, S.M. Park, and H.C. Jin (2008) The Characteristics of Particulate PAHs Concentrations at a Roadside in Seoul, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 24(2), 133-142. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.B., G.N. Bae, S.M. Park, and S.G. Jung (2007) Black Carbon Pollution Level at a Roadside of Seoul in Spring, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 23(4), 466-477. (in Korean with English abstract)
- Lin, C.C., S.J. Chen, K.L. Huang, W.I. Hwang, G.P. Chang-Chien, and W.Y. Lin (2005) Characteristics of metals in nano/ultrafine/fine/coarse particles collected beside a heavily Trafficked road, *Environ. Sci. Technol.*, 39(21), 8113-8122.
- Park, D.J., J.Y. Ahn, H.J. Shin, and M.S. Bae (2014) Characteristics of PM2.5 Carbonaceous Aerosol, using PILS-TOC and GC/MS-TD in Seoul, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 30(5), 461-476. (in Korean with English abstract)
- Peltier, R.E., K.R. Cromar, Y. Ma, Z.H. Fan, and M. Lippmann (2011) Spatial and seasonal distribution of aerosol chemical components in New York City: (2) road dust and other tracers of traffic-generated air pollution, *J. of Exposure Sci. Environ. Epidemiol.*, 21(5), 484-494.
- Schmid, M., S. Zimmermann, H.F. 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, *Environ. Int.*, 33(3), 385-390.
- Woo, D.K., S.B. Lee, G.N. Bae, and T.S. Kim (2008) Comparison of Ultrafine Particles Monitored at a Roadside Using an SMPS and a TR-DMPS, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 24(4), 404-414. (in Korean with English abstract)