

서울시 지하역사에서 PM₁₀의 화학적 특성과 오염원의 확인 및 기여도 추정

Identification of PM₁₀ Chemical Characteristics and Sources and Estimation of their Contributions in a Seoul Metropolitan Subway Station

박슬바센나 · 이태정 · 고현기 · 배성준¹⁾ · 김신도²⁾
박덕신³⁾ · 손종렬⁴⁾ · 김동술*

경희대학교 환경학 및 환경공학과, ¹⁾서울메트로 기술연구소,
²⁾서울시립대학교 환경공학과, ³⁾한국철도기술연구원 에코시스템연구실,
⁴⁾고려대학교 보건과학대학 환경보건학과
(2012년 12월 6일 접수, 2013년 1월 14일 수정, 2013년 1월 21일 채택)

Seul-Ba-Sen-Na Park, Tae-Jung Lee, Hyun-Ki Ko, Sung-Joon Bae¹⁾,
Shin-Do Kim²⁾, Duckshin Park³⁾, Jong-Ryeul Sohn⁴⁾ and Dong-Sool Kim*

Department of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University,
¹⁾*R&D Center, Seoul Metro,* ²⁾*Department of Environmental Engineering, University of Seoul*
³⁾*Eco-transport Research Division, Korea Railroad Research Institute,*
⁴⁾*Department of Environmental Health, College of Health Sciences, Korea University*

(Received 6 December 2012, revised 14 January 2013, accepted 21 January 2013)

Abstract

Since the underground transportation system is a closed environment, indoor air quality problems may seriously affect many passengers' health. The purpose of this study was to understand PM₁₀ characteristics in the underground air environment and further to quantitatively estimate PM₁₀ source contributions in a Seoul Metropolitan subway station. The PM₁₀ was intensively collected on various filters with PM₁₀ aerosol samplers to obtain sufficient samples for its chemical analysis. Sampling was carried out in the M station on the Line-4 from April 21 to 28, July 13 to 21, and October 11 to 19 in the year of 2010 and January 11 to 17 in the year of 2011. The aerosol filter samples were then analyzed for metals, water soluble ions, and carbon components. The 29 chemical species (OC1, OC2, OC3, OC4, CC, PC, EC, Ag, Al, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Si, Ti, V, Zn, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺) were analyzed by using ICP-AES, IC, and TOR after proper pretreatments of each sample filter.

Based on the chemical information, positive matrix factorization (PMF) model was applied to identify the PM₁₀ sources and then six sources such as biomass burning, outdoor, vehicle, soil and road dust, secondary aerosol,

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)31-201-2430, E-mail : atmos@khu.ac.kr

ferrous, and brakewear related source were classified. The contributions rate of their sources in tunnel are 4.0%, 5.8%, 1.6%, 17.9%, 13.8% and 56.9% in order.

Key words : PM₁₀, PMF model, Subway station, Source contribution, Indoor air quality

1. 서 론

지하철은 대표적인 대중교통수단으로서 우리나라에서는 수도권권을 중심으로 전국 주요 광역시에서 운영되고 있으며, 현재에도 노선이 지속적으로 확장되고 있다. 궤도 교통수단인 지하철은 노면 교통수단과는 달리 교통상황의 영향을 받지 않으므로 정시성, 쾌속성, 안전성 측면에서 많은 장점을 가지고 있어 대중교통에서 차지하는 비중이 갈수록 증가하고 있는 추세이다. 1974년 8월 15일 개통한 서울메트로는 현재 수도권 도시철도의 약 40%를 분담하며 하루 평균 410여 만명, 1년에 15억명의 승객을 수송하고 있다. 지난 '07년 5월 기준 32년 9개월만에 누적승객 300억명을 돌파한 바 있으며, 개통 38년차인 2011년까지 367억명 수준의 누적 승객을 기록했다(Seoul metro, 2011).

지하철의 발달로 이용승객과 열차 운행횟수가 증가하면서 승객들이 지하환경에 노출되는 시간도 늘어나게 되었다. 지하철을 비롯한 지하생활권은 폐쇄적 공간이라는 특수하고도 인위적인 환경이며, 어린이와 노약자를 포함한 다수가 이용, 왕래함에 따라 공기오염에 따른 인체유해성도 크다. 지하철역사의 여러 오염물질 중 PM₁₀은 가장 심각한 오염물질로 조사된 바 있다(Han, 2002). 주로 열차운행에 의해 발생하는 열차풍으로 터널 내 PM₁₀이 승강장 및 열차객실로 유입되어 문제가 되고 있다. 지하철역사에서 PM₁₀ 농도에 영향을 미칠 수 있는 오염원으로는 지하철 이용 승객들의 이동 중 발생하는 PM₁₀, 열차의 운행에서 배출되는 PM₁₀, 그리고 환기를 위해 도입되는 외부 공기 속에 포함된 PM₁₀ 등이 대표적이라고 할 수 있다(Choi *et al.*, 2004). 또한 지상의 자동차 배출가스 등 외기의 대기오염물질이 터널로 유입되고 다시 지하철역사내 공기 오염을 가중시키는 요인으로 작용할 수도 있다. 이와 같이 인간의 삶의 질과 건강에 직접적으로 영향을 주는 지하환경에서의

PM₁₀ 오염거동을 근원적으로 파악하기 위해, 지하철역사와 더불어 지하철역사내 터널 내의 오염물질 저감에 대한 노력과 연구를 병행할 필요가 있다.

본 연구에서는 서울시 지하철 역사 내 PM₁₀의 오염거동을 정량적으로 비교 분석하기 위하여 2010년부터 2011년에 측정된 서울시 4호선 M역에서 PM₁₀의 오염특성을 심도있게 조사하였다. PM₁₀의 성분별 특성을 분석하기 위하여 외기, 승강장, 역사 내 터널, 역사간 터널 등에서 측정을 실시하였다. 채취된 PM₁₀ 시료의 질량농도 및 무기원소, 이온성분 및 탄소성분을 분석하였으며, 이를 토대로 본 연구대상역의 공기질 현황을 파악하였다. 또한, 본 연구에서는 지하철역사내 각 지점별로 오염원의 기여도를 추정하기 위하여 수용모델방법 중의 하나인 양행열인자분석법인 PMF (positive matrix factorization) 모델을 이용하였다. PMF 모델은 오염원 자료(source inventory)의 확보가 어려운 실외대기의 오염원 파악에 주로 사용되고 있으나, 지하철역사 등의 실내 환경의 오염발생원을 확인하기 위해 이용된 바 있다(Park *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2010). 본 연구의 결과는 향후 지하철 환경개선을 위한 통합평가기술의 기초자료로 활용할 수 있으며, 터널용 PM₁₀ 제거를 위한 제어설비를 설계할 때 요구되는 분진의 설계인자로 활용할 수 있다.

2. 연구 방법

2.1 시료의 측정지점 및 방법

본 연구에서는 지하철역사내 PM₁₀의 화학적 특성을 분석하기 위하여, 서울시 지하철 4호선 M역사에서 계절별로 시료를 채취하였다. 봄철 측정은 2010년 4월 21일부터 28일까지(8일간), 여름철 7월 13일부터 21일까지(9일간), 가을철 10월 12일부터 19일까지(8일간), 겨울철 2011년 1월 11일부터 17일까지(7일간) 총 32일간 실시하였다. 시료채취 장소는 M역사

인근의 외기, 승강장, 터널 2곳 등 총 4개 지점에서 실시하였다. 구체적으로 외기는 M역사에 인접한 치안센터 2층 건물 옥상에서 샘플을 채취하였으며, 승강장은 M역에서 K역 방향 플랫폼에서 시료를 채취하였다. 터널 1은 스크린 도어가 설치되어 있는 승강장 바로 앞 터널에서 채취하였으며, 터널 2는 M역에서 K역 방향으로 약 70m 정도 들어간 터널에서 채취하였다. 터널 내 샘플링은 열차풍을 고려하여 샘플러를 중앙 기둥에 단단히 고정하여 설치하였다. 모든 지점에서 PM₁₀ 시료채취는 24시간 단위로 동일한 시간에 진행되었다. 그림 1은 각 지점별 시료채취 사진을 보여주고 있다.

본 연구에서 사용한 샘플러는 PM₁₀ mini-vol 샘플러를 설치하여 가동하였다. 이는 PM₁₀ 중 무기원소성

분, 이온성분, 탄소성분을 분석하기 위해 충분한 시료를 확보하기 위함이다. PM₁₀ mini-vol portable sampler (Model 4.1, Airmetrics co., USA)의 시료채취 유량은 5 L/min로 고정하여 24시간 가동하였다. 측정시간은 타이머를 사용하였고, 샘플러가 과부하 등으로 인하여 정지하는 경우에 대비하여 샘플러에 부착된 카운터의 수치와 가동시간을 기록하였다.

시료채취에 사용한 필터는 이온과 무기원소성분 분석을 위하여 직경 47 mm, pore size 2µm의 Teflon filter (Zeflour, Pall Cor, USA)를 사용하였으며, 탄소 분석을 위하여 수정섬유여지 (quartz microfiber filter, QM-A, 47 mm, Whatman)를 사용하였다. 분진의 중량 농도를 분석하기 위해 Teflon 여지는 시료채취 전·후로 3일간 항온·항습상태의 전자 데시케이터 (San-



Fig. 1. Installation location of the sampler.

platec Corp., Model Oyin 09678BN) 내에 보관하여 항량한 후, 0.001 mg의 감도를 갖는 전자저울(Sartorius Co., Model CPA2P-F)로 칭량하였다. 칭량 전·후의 무게차를 분진의 무게로 간주하였으며, 이를 유량으로 나누어 PM₁₀ 농도를 계산하였다. 탄소성분 분석을 위한 수정섬유여지는 유기물질 제거를 위하여 500°C 이상의 고온에서 전처리하여 사용하였다.

채취한 PM₁₀ 시료의 화학적 특성을 분석하기 위하여 무기원소성분과 이온성분, 탄소성분을 각각 분석하였다. PM₁₀의 무기원소 분석을 위하여, 미국 EPA가 고시한 CWA (Clean Water Act)의 microwave 전처리법을 응용하였으며, Questron (Questron사, Model Q-15 MicroPrep)을 이용한 질산-염산 전처리 방법을 사용하였다. 이를 위해 여지 시료를 약 절반의 비율로 절취하여 PFA liner에 넣은 후 61% 질산 7 mL와 35% 염산 3 mL를 가한 후 Questron에서 power 4와 3으로 각각 5분씩 가온하여 무기원소 성분을 추출하였다. 이때 여지 시료는 정확히 절반으로 절취하지 않고 약 55:45 정도의 비율로 한쪽을 약간 더 크게 하여 절취한다. 그 이유는 절취한 두 개의 여지 시료를 각각 무기원소성분 전처리와 이온성분 전처리에 사용하는데 이온이 잘 검출되지 않는 편에 속하므로 상대적으로 큰 여지 시료를 이온성분 전처리에 사용하고 상대적으로 작은 여지 시료를 무기원소성분 전처리에 사용하기 때문이다. 추출한 용액은 필터(No. 5B, 110 mm, Advantec MFS Inc.)로 여과시킨 후 증류수를 이용하여 50 mL로 희석하였다. 시료용액은 50 mL 폴리프로필렌 튜브(Corning Co., USA)에 담아 기기분석 때까지 4°C에서 보관하였다. 이와 같이 전처리가 끝난 시료용액은 ICP-AES 분석법(DRE ICP, Leeman Labs Inc)을 이용하여, Ag, Al, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Si, Ti, V, Zn 등 14종의 무기원소 성분을 분석하였다.

한편, 수용성 이온성분을 분석하기 위해 이온성분 전처리를 위해 남겨둔 분진시료 여지를 30 mL 초순수에 침적시켜 초음파 추출기를 사용하여 이온성분을 추출한 후, microporous type의 막여지(membrane filter: pore size, 0.45 µm; Ø25 mm)로 여과하는 전처리 방법을 이용하였다. 각 수용액은 분석을 위해 50 mL 폴리프로필렌 튜브(Corning Co., USA)에 담아 4°C로 냉장 보관하였다. 또한, 추출된 수용성 이온성분의 농도를 분석하기 위해서, 이온크로마토그래프(Dionex

사, Model DX-400)를 사용하였다. 5개의 양이온(Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺)과 3개의 음이온(Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻)은 각각의 분리컬럼(separation column; Dionex Ionpac AS12A for anion and CS12 for cation)을 사용하여 분석하였다.

탄소성분의 분석은 열광학적 분석방법(thermal/optical transmittance method)에 기초한 Sunset Laboratory Inc.의 탄소분석장치를 이용하였다. 열광학적 분석방법은 초기의 순수한 헬륨 환경에서 산소를 첨가하고 온도를 증가시킴으로써 탄소성분을 유기탄소와 원소탄소를 선별하여 측정한다. 즉, 시료를 1×1.5 cm²으로 자른 다음 시료를 오븐에 주입하고 헬륨과 산소를 이용하여 고온에서 연소시켜 여기서 발생하는 탄소를 메탄으로 전환시켜 불꽃이온화검출기로 검출하는 방식이다. 이 방법을 통해 7종(OC1, OC2, OC3, OC4, CC, PC, EC)의 탄소성분을 분석하였다.

2. 2 PMF 모델링

양행렬인자분석법인 PMF 모델은 1990년 이후 활발히 응용되고 있는 인자분석(factor analysis)의 한 종류이다. 인자분석은 분석하고자 하는 다수의 변수들을 상관행렬구조 형태의 통계적 모형으로 구축한 후, 이를 바탕으로 변수들 간의 공분산 또는 상관관계를 파악하여 소수의 인자로 유도하는 통계기법이다(Suh, 2001). 인자분석의 목적은 변수들을 축소하고, 불필요한 변수들은 제거하며, 변수들 간의 특성을 파악하고, 마지막으로 측정도구의 타당성을 판단하는 것이라고 할 수 있다(Nam *et al.*, 2002). 현재, 인자분석은 사회·인문분야 뿐만 아니라 자연과학분야에서도 활발히 이용되고 있다. 특히 대기연구 분야에서 인자분석은 입자에 대한 화학성분간의 상관성을 확인하고, 유사한 거동을 보이는 화학 성분들에 대하여 하나의 그룹을 형성함으로써 그에 대한 관계된 오염원을 추정하는 등 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 인자분석은 공분산행렬에만 의존하여 불충분한 정보의 제공, 음수값(negative value)의 출현, 인자의 회전시에 발생하는 모호성 등 물리적으로 완벽한 인자 해석의 한계를 가지고 있다(Hwang *et al.*, 2001). 이러한 인자분석의 단점을 개선하기 위하여 인자분석보다 진보된 PMF 모델이 개발되었다(Paatero and Tapper, 1994).

PMF 모델의 특징은 상관행렬의 정보에 의존하는

것이 아니라, 측정자료의 오차추정 (error estimate) 정보에 입각하여 가중최소사승법 (weighted least-squares fit) 알고리즘을 사용하고 있다 (Chueinta *et al.*, 2000). 또한, 인자분석법에서 취급할 수 없었던 검출한계 이하의 자료 및 결측자료 (missing data)를 분석할 때 오차평가법을 도입하여 그와 상응하는 값을 추정할 수도 있다 (Polissar *et al.*, 1998). 일반적인 PMF 모델식은 식 (1)과 같다.

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + e_{ij} \quad i=1, \dots, n; j=1, \dots, m; k=1, \dots, p \quad (1)$$

여기서, x_{ij} ($n \times m$ 행렬)는 i 번째 측정자료의 j 번째 화학종에 대한 측정농도값을 나타낸다. g_{ik} ($n \times p$ 행렬)는 i 번째 측정자료에 대한 k 번째 오염원의 기여도를 나타내며, f_{kj} ($p \times m$ 행렬)는 k 번째 오염원에서 j 번째 항목의 질량분율 (mass fraction) 즉, 오염원분류표를 나타낸다. 잔차요소 (residual element) e_{ij} 는 모델에 의해 fitting 되지 못한 부분을 의미하며 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다 (Lee *et al.*, 1999; Paatero, 1998). PMF 분석은 $Q(E)$ 값을 최소화하는 것으로 식 (3)과 같이 표현할 수 있으며, 해는 G 와 F 요소들을 음의 값을 갖지 않도록 반복적으로 가중치를 부여하여 $Q(E)$ 를 최소화시켜 산출한다.

$$e_{ij} = X_{ij} - \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} \quad (2)$$

$$Q(E) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[\frac{e_{ij}}{h_{ij} s_{ij}} \right]^2 \quad (3)$$

여기서, s_{ij} 는 각 측정값 x_{ij} 의 측정오차로서 이 값을 가중치로 사용하여, 검출한계 미만의 자료 및 결측자료에 대한 영향을 보정하도록 한다. 또한, h_{ij} 는 펄터함수로 측정자료의 이상치에 의해 모델결과가 왜곡되는 것을 줄이기 위해 사용되며, 각각의 자료 값에 반복적으로 재가중치 (re-weighting)를 주기 위해 robust mode를 적용한다.

그리고 PMF와 같은 인자분석법은 모델링의 결과를 해석하기 쉬운 구조로 변경시키기 위하여 인자의 회전을 수행한다. 이 때 'FPEAK' 변수가 회전 자유도 (rotational freedom)를 제어할 수 있는 역할을 한다 (Paatero *et al.*, 2002; Song *et al.*, 2001). 최적 FPEAK 값의 선택은 연구자의 시행착오에 의해 결정되지만, 보통 0.1의 단위로 -1.0에서 1.0까지의 FPEAK 값을 이용하여 PMF를 수행하는데 FPEAK 값의 변화에

다른 Q 값의 변화, 그리고 각 G 벡터에 대한 산포도 (scatter plot) 등을 이용하여 최적 FPEAK값이 결정된다 (Paatero *et al.*, 2005). 이 과정에서 FPEAK 값을 변화시켰을 때 Q 값의 급격한 증가를 보이는 시점이 생기게 되는데, 이 지점에서 최적의 오염원 특성을 보인다고 할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 각 지점에서의 PM₁₀ 농도특성

서울시 지하철 4호선 M역에서 측정된 시료에 대한 PM₁₀에 대한 시료수, 산술평균, 표준편차, 최대값, 최소값을 표 1과 그림 2에 나타내었다. PM₁₀의 농도 범위는 외기 22.4~85.3 μg/m³, 승강장 28.1~159.1 μg/m³, 터널1 104.7~300.2 μg/m³, 터널2 91.8~266.1 μg/m³이며, PM₁₀의 산술평균농도는 외기 41.5 μg/m³, 승강장 77.4 μg/m³, 터널1 194.8 μg/m³, 터널2 181.6 μg/m³로 조사되었다. M역사 내 승강장과 터널1 (승강장 전방 터널) 사이에는 PSD (platform screen door)가 설치되어 있다. 두지점 사이가 가까운 거리임에도 불구하고 승강장의 평균농도는 터널1에 비교하여 매우 낮아, PSD 설치로 인한 지하역사에서의 PM₁₀ 개선효과를 파악할 수 있다.

3.2 PMF 모델링 입력자료

서울시 지하철 4호선의 M역사에서 지하철에서 발생하는 PM₁₀에 대한 오염원을 확인하고 기여도를 평가하기 위하여 103개의 PM₁₀ 시료를 분석하였다.

Table 1. A statistical summary of PM₁₀ concentration at each sampling site.

Pollutant	Sampling site	Concentration (μg/m ³)			
		No. of sample	Mean	SD	Range
PM ₁₀	Outdoor	26	41.5	13.1	22.4~85.3
	Platform	30	77.4	27.9	28.1~159.1
	Tunnel 1 ^{a)}	26	194.8	41.2	104.7~300.2
	Tunnel 2 ^{b)}	21	181.6	45.9	91.8~266.1

^{a)}The sampling site was located at tunnel side in front of platform. Platform screen doors (PSD) were installed between platform and tunnel sides at the Station M.

^{b)}The sampling site was located 70 m inside tunnel from the passager platform of Station M.

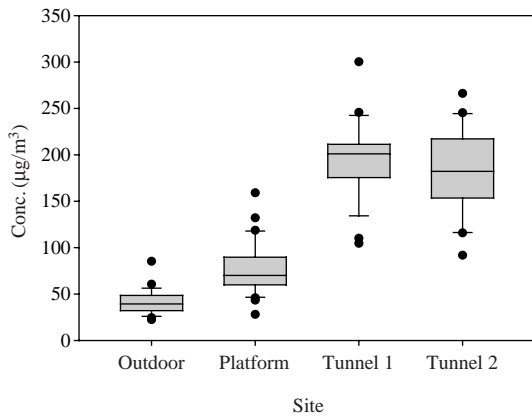


Fig. 2. A comparison of average PM₁₀ concentrations measured at each site.

이중 외기를 포함하여 나머지 지점에서의 유효한 자료를 PMF 모델링의 입력자료로 사용하였다. 외기를 포함한 이유는 외기를 포함했을 때와 포함하지 않았을 때 두가지 경우 모두 PMF 모델링을 실시해본 결과 외기를 포함했을 때가 자료 해석이 더 타당하다고 판단했기 때문이다. 사용된 화학종은 표 2와 같이 탄소성분 7종(OC1, OC2, OC3, OC4, CC, PC, EC), 무기원소 14종(Ag, Al, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Si, Ti, V, Zn)과 이온성분 8종(Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺)으로 구성된 103×29 (PM₁₀) 행렬자료이다. 화학종의 자료의 구성은 각 행(row)에 시료항목이 위치하고, 열(column)에 화학종의 농도값이 위치하도록 원자료를 정리하였다. 환경자료에서는 대체로 Q-mode가 사용되고 있으며, 본 연구에서도

Table 2. Summary of PM₁₀ and 29 chemical species used for PMF analysis.

Chemical species	Concentration (µg/m ³)					Number of BDL ^{a)} values (%)	Number of missing values (%)
	Minimum values	Percentile			Maximum values		
		25	50	75			
PM ₁₀	22.4	62.0	116.7	202.4	386.4	0 (0.0)	0 (0.0)
Ag	0.0000	0.0000	0.0068	0.0183	0.6625	30 (31.3)	0 (0.0)
Al	0.0000	0.1744	0.3119	0.4829	5.2572	4 (4.2)	0 (0.0)
Ba	0.0073	0.0854	0.2824	0.5706	2.8190	0 (0.0)	0 (0.0)
Cd	0.0000	0.0000	0.0036	0.0055	0.2235	30 (31.3)	0 (0.0)
Cr	0.0000	0.0000	0.1006	0.1867	1.0759	32 (33.3)	0 (0.0)
Cu	0.0032	0.3025	1.0154	2.2386	7.1448	0 (0.0)	0 (0.0)
Fe	0.0000	6.4548	22.5142	54.6158	181.5971	0 (0.0)	0 (0.0)
Mn	0.0000	0.0571	0.1901	0.4713	1.4375	2 (2.1)	0 (0.0)
Ni	0.0000	0.0000	0.0000	0.0142	0.2464	50 (52.1)	0 (0.0)
Pb	0.0000	0.0677	0.1359	0.2417	1.0117	1 (1.0)	0 (0.0)
Si	0.0000	1.6146	2.6843	4.3466	11.6882	1 (1.0)	0 (0.0)
Ti	0.0000	0.0108	0.0224	0.0376	0.6469	7 (7.3)	0 (0.0)
V	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1119	56 (58.3)	0 (0.0)
Zn	0.0000	0.0000	0.2903	1.0709	11.0750	37 (38.5)	0 (0.0)
Na ⁺	0.0000	0.7804	1.2898	2.1908	8.2288	7 (7.3)	0 (0.0)
NH ₄ ⁺	0.0000	1.1280	2.1821	3.8600	13.1177	8 (8.3)	0 (0.0)
K ⁺	0.0371	0.3765	0.5528	0.9772	4.1736	4 (4.2)	0 (0.0)
Mg ²⁺	0.0247	0.4061	0.6383	1.0017	8.6124	4 (4.2)	0 (0.0)
Ca ²⁺	0.1332	1.5129	2.7550	4.8774	12.4373	4 (4.2)	0 (0.0)
Cl ⁻	0.0264	0.7194	1.3416	2.3124	10.2856	4 (4.2)	0 (0.0)
NO ₃ ⁻	0.0104	1.7781	3.0453	4.9581	15.3072	4 (4.2)	0 (0.0)
SO ₄ ²⁻	0.1068	1.4497	3.0693	6.2502	27.1129	0 (0.0)	0 (0.0)
OC1	0.2437	4.6677	5.8101	7.1034	15.2852	0 (0.0)	0 (0.0)
OC2	0.2015	3.1116	4.2099	5.6640	11.6750	0 (0.0)	0 (0.0)
OC3	0.0506	1.5943	2.3720	3.1508	4.8829	0 (0.0)	0 (0.0)
OC4	0.0000	1.2186	1.5647	2.2873	7.7466	0 (0.0)	0 (0.0)
CC	0.0000	1.1028	3.1586	5.9156	10.6923	0 (0.0)	0 (0.0)
PC	0.0440	1.4812	2.5649	4.5019	10.1010	0 (0.0)	0 (0.0)
EC	0.7207	15.0501	20.5775	31.4200	48.9771	0 (0.0)	0 (0.0)

Notes : ^{a)} BDL stands for below detection limit

Q-mode를 활용하여 자료를 정리하였다. 표 2에는 모델분석에 사용된 PM₁₀의 화학종 통계치를 나타내고 있다. 분석된 화학종 중에는 결측자료와 검출한계 이하의 자료가 존재하였다. 본 연구에서는 검출한계 이하의 값에 대해서는 검출한계 값의 1/2로 대체하였으며, 결측치에 대해서는 해당 화학종의 기하평균으로 대체하는 방법을 사용하였다(Lee *et al.*, 2002). 한편, PMF 모델링을 수행하는 데 있어 2가지의 입력자료를 필요로 한다. 하나는 데이터 행렬이고, 다른 하나는 데이터 행렬에 대한 에러 추정(error estimating)을 통한 에러 행렬이다. 이는 PMF 모델링 실행시 각 자료에 가중치를 부여하게 되는데, 검출한계 미만의 자료나 결측자료에 대해서는 불확도를 크게 함으로써, 이들 자료의 가중치를 감소시키고 모델결과의 현실성을 부여할 수 있다(Oh *et al.*, 2009).

측정값에 대한 불확도 σ_{ij} 는 아래 식(4)와 같이 계산할 수 있다(Polissar *et al.*, 1998). 불확도를 계산하기 위해서 오차분율(fractional error)을 사용하는데 이는 k에 해당한다. 수식에서 MDL은 검출한계를 의미하며, x_{ij} 는 i번째 시료의 j번째 화학종의 농도를 의미한다. 일반적으로 측정농도가 증가함에 따라 분석 불확도(analytical uncertainty)도 비례하여 증가하기 때문에, 이 둘 사이의 선형관계를 통해 k를 추정할 수 있다(Kim *et al.*, 2005).

$$\sigma_{ij} = [\text{MDL}] / 3 + k \times x_{ij} \quad (4)$$

본 연구에서도 식(4)를 이용하여 측정값에 대한 불확도를 계산하였으며, 검출한계 미만의 자료와 결측치에 대해서는 큰 값의 오차분율을 할당하였다.

3.3 오염원의 확인 및 기여도 추정

PMF 모델을 이용하여 수도권 지하철 4호선 M역사에서 오염원을 확인하고 기여도를 정량적으로 추정하였다. PMF 모델에서는 여러 가지 값을 이용하여 인자수를 결정할 수 있는데, Q값의 비교, 측정값과 모델수행 잔차 행렬과의 분포관계 검증, 불완전한 인자의 회전을 제어하기 위한 FPEAK 값의 변환, 조정된 오차추정치로 바탕으로 동일한 조건에서 반복적인 모델링의 수행 등의 과정을 통하여 오염원의 수를 결정할 수 있다. 본 연구에서 사용한 FPEAK은 -1.0에서 1.0까지로 0.2씩 단계별로 변화시키면서 적정 값을 선정하였으며, 본 연구에서 최적의 FPEAK

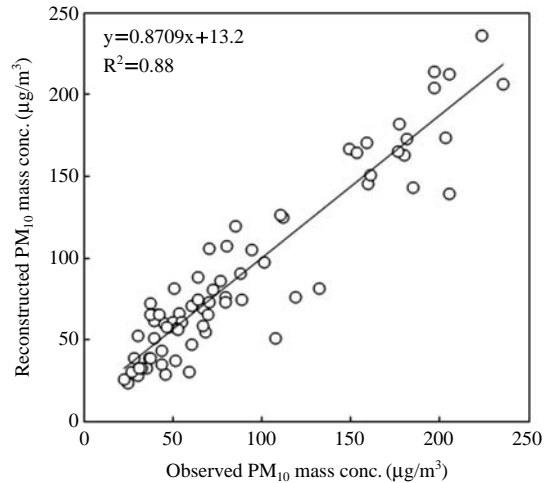


Fig. 3. Measured versus predicted PM₁₀ mass concentration.

은 -0.4로 나타났다. 반복적인 모델링 수행결과 최적의 오염원수를 PM₁₀에서는 6개로 결정하였다.

다음 단계로 PMF 모델링 결과인 오염원 분류표와 오염원 기여도를 정량적으로 평가하기 위하여 PM₁₀의 질량농도와 추정된 오염원 기여도 값과 다중회귀분석(multiple linear regression)을 통해 얻은 scaling 상수를 이용하여 표준화시켰다. 본 자료를 이용하여 모델링을 수행하고 얻은 표준화된 PM₁₀의 추정치와 실측치와의 관계를 그림 3에 나타내었다. 그림과 같이 모델링을 통하여 얻은 추정치와 실측치 사이의 상관계수 R²값은 0.88로 양호한 결과를 보였다.

그림 4는 모델링을 통해 확인된 오염원의 분류표이다. 그림 4의 y축의 농도(µg/µg)는 각 오염원의 질량분율을 나타내는 것이며, EV값(explained variation value)는 각 오염원의 항목들이 X행렬의 행 또는 열을 얼마나 설명하는가를 의미하는 무차원 값으로, 모델링 초기에 오염원의 정성적 분류에 이용된다. 즉, EV 값이 1에 가까울수록 X행렬의 j번째 화학종이 k번째 오염원을 완벽하게 설명한다는 것을 의미한다. 지하철 4호선 M역사에서 추정된 오염원의 최적 수는 6개이었다.

PMF와 같은 양행렬 인자분석은 오염원을 분리 및 확인할 때, 해당 오염원 분류표(source profile)의 정보가 부족하여 어려움이 따른다. 따라서 오염원을 정확하게 분류하기 위해서는 분류표와 관련한 많은 문

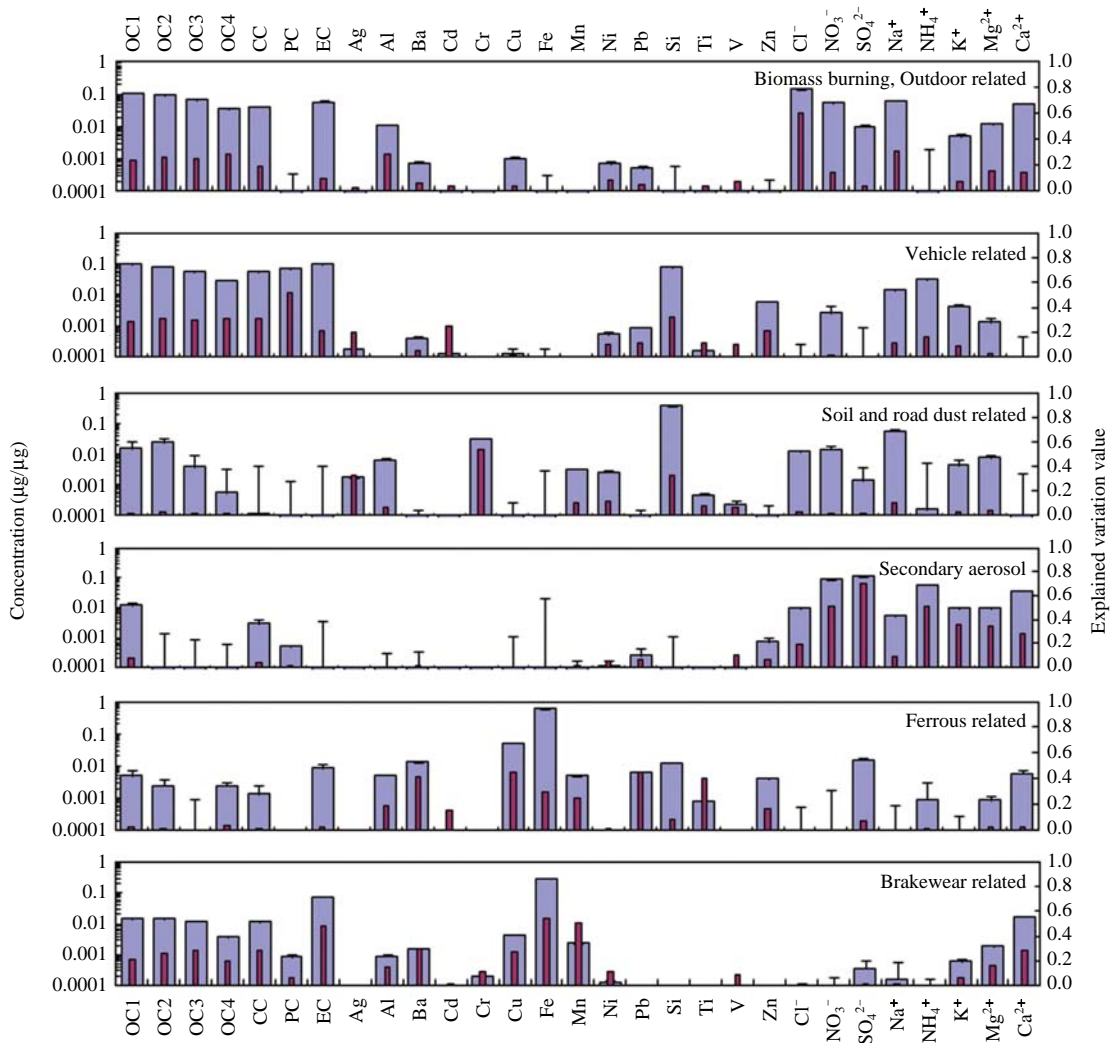


Fig. 4. Source profiles resolved from PM₁₀ sources in the study area.

헌을 참고해야만 한다. 본 연구에서는 최적의 인자수를 결정한 후 각 인자의 화학원소 농도와 분율, 통계적 분석 등을 바탕으로 하여 미국 EPA의 오염원 분류표인 SPECIATE 프로그램과 각종 문헌의 자료를 이용하였다.

PMF 모델링 결과 M역사에서의 PM₁₀의 주요 오염원은 1) 생체량 연소 및 외기관연 오염원(복합오염원), 2) 자동차관련 오염원(특정 연소관련 오염원), 3) 토양 및 도로비산관련 오염원, 4) 2차 입자관련 오염원, 5) 철관련 오염원, 6) 브레이크 마모관련 오염원

등 6가지 오염원이 확인되었다. 분류 확인된 오염원은 크게 외부기인 오염원과 내부기인 오염원으로 나눌 수 있다. 생체량 연소 및 외기관연 오염원, 자동차관련 오염원, 토양 및 도로비산관련 오염원, 2차 입자관련 오염원은 외부기인 오염원으로 분류하였으며, 철 관련 오염원과 브레이크 마모관련 오염원은 내부기인 오염원으로 분류하였다.

우선 외부기인 발생원 중 첫 번째 오염원인 생체량 연소 및 외기 복합오염원은 OC, NO₃⁻, Cl⁻, NH₄⁺, Ca²⁺, K⁺ 등의 성분이 주요 화학종으로 관여하였으

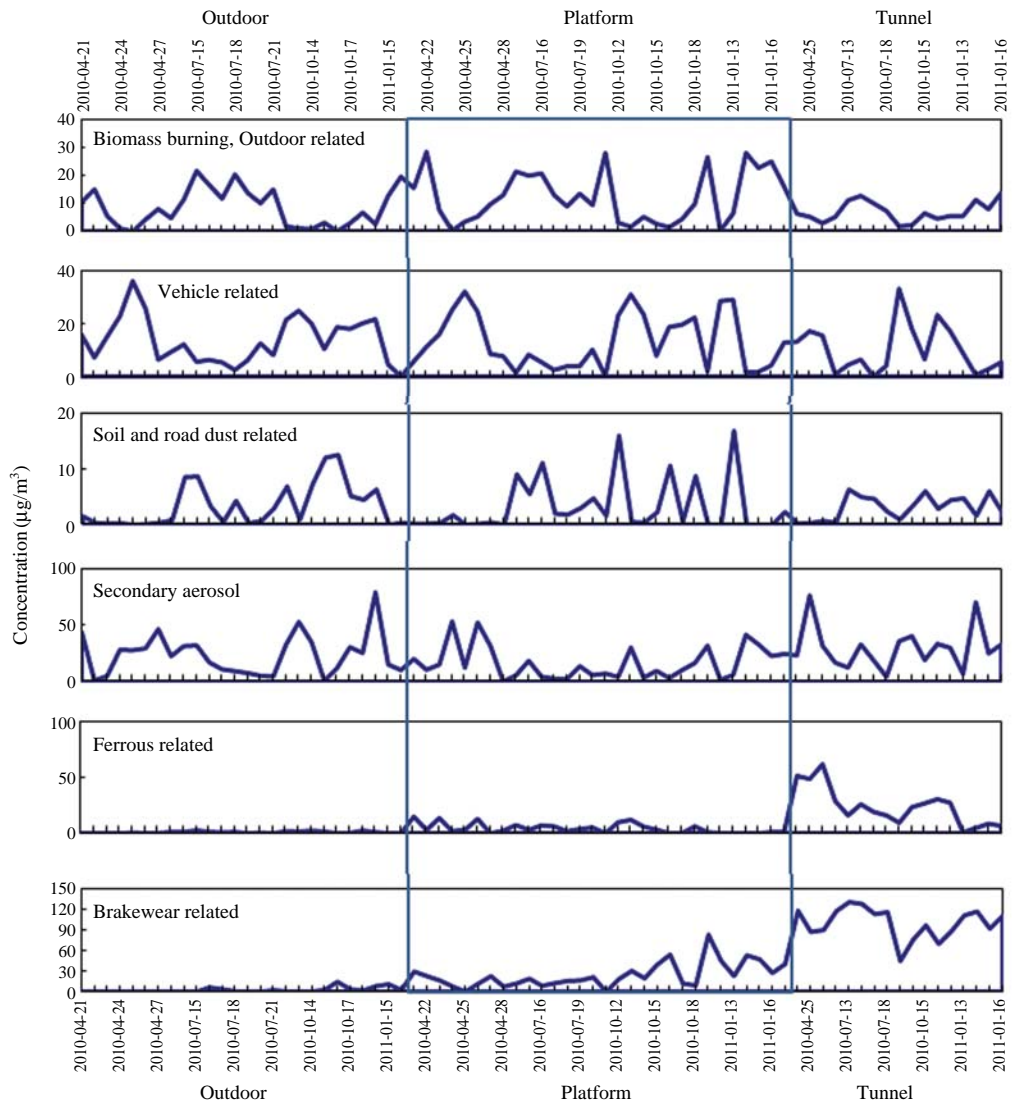


Fig. 5. Time series of corresponding contributions by PMF model.

며, 폐기물, 목재, 농업관련 식물성 소각(biomass burning) 등을 포함한 각종 생활상 연소 및 소각, 도로 비산먼지 등의 복합적인 오염원이 참여하여 발생한 것으로 판단하였다. 두 번째 오염원은 자동차관련 오염원으로 결정하였다. 주로 기여하는 원소는 TC이며, SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ , Pb, Fe, Ce, K^+ , Ca^{2+} , Zn 등과 같은 원소들도 일정량 기여하는 것으로 나타났다(Lee *et al.*, 2002; Qin *et al.*, 2002; Song *et al.*, 2001; US

EPAa, 1999; US EPA, 1999b; Hopke, 1985). 세 번째 오염원은 Si, Al, Ca^{2+} , K^+ 등이 높은 기여를 하는 것으로 볼 때 토양 및 도로비산관련 오염원으로 분류하였다. 외부기인 발생원 중 마지막 오염원은 SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 등이 주로 기여하는 것으로 나타나 2차 입자 오염원(secondary aerosol)을 분류하였다. 이와 같은 외부기인 오염원들은 지하역사를 이용하는 승객이나 유동인구에 의하여 내부로 유입될 수도 있으

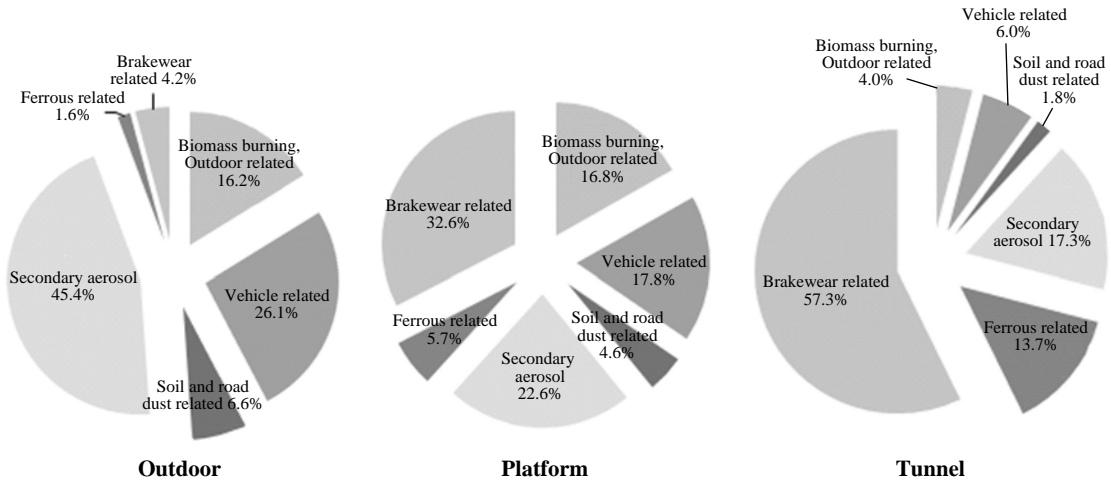


Fig. 6. Average source contribution of PM₁₀ estimated by PMF model in each site.

며, 역사의 자연 및 기계환기를 통하여 외부에서 내부로 유입되는 것으로 판단된다.

다음으로 지하철 내부기인 오염원에 대하여 살펴 보면, 우선 철관련 오염원은 Fe과 Cu의 성분이 매우 높은 분율을 보였다. 이 오염원은 전동차 운행시 레일의 마모나 전선의 마모로부터 PM₁₀이 방출된 것으로 추정된다. 또한, 브레이크 마모관련 오염원은 CC, Fe, Ba, Ca²⁺의 성분이 크게 기여하였다. 참고로 브레이크 마찰재는 기본적으로 구성재, 결합재, 충전제, 고체 윤활제, 고분자 윤활제 등으로 구성되어 있다. 세부적으로 마찰재는 aramid fiber, glass fiber 등의 기본 구성재로 이루어져 있으며, 결합재는 phenol resin, rubber로 이루어져 있다. 또한, 충전제는 흑연 카본블랙, 금속분말 등이 사용된 윤활제와 알루미늄 등의 사용된 고체 마찰 충전제, 탄소화합물이 주로 사용된 마찰 안정제, 황산바륨, 세라믹 분말 등이 사용된 보강제, 탄산바륨, 칼슘 등의 사용된 중량제, 카본이 사용된 착색제로 구성되어 있다 (Hongsungbrake, 2010; Seo *et al.*, 2005).

그림 5는 6개로 분류된 각 오염원의 외기, 승강장, 터널의 시간대별 기여도를 나타낸 것이다. 외부기인 오염원으로 분류한 상위 4개 오염원을 살펴보면 터널의 기여도가 상대적으로 낮은 편이긴 하지만 대체로 외기, 승강장, 터널 구분 없이 일정한 기여도를 가지고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 승강장과 터널에서도 외기와 환기가 지속적으로 이루어지고 있기 때

문에 외부기인 오염원의 영향이 있는 것으로 사료된다. 반면, 내부기인 오염원으로 분류한 하위 2개 오염원은 외기에서는 거의 영향이 미미하고 터널에서 확연히 높은 기여도를 보이는 것을 알 수 있다. 밀폐된 지하공간의 특성상 내부기인 오염원은 터널에서 기여도가 높은 뚜렷한 경향을 나타내었다. Lee *et al.* (2010)의 서울시 7호선 J지하철역의 승강장에서의 PMF 모델링 결과에서도 내부오염원이 43.8%의 높은 기여율을 보였다.

그림 6은 외기를 포함하여 지하철역 내 각 측정지점에서 추정된 PM₁₀의 평균 기여도를 도식한 것이다. 각 측정지점에 관계없이 전체 자료를 가지고 PMF 모델링을 수행한 후 각 측정지점별로 오염원별 평균값으로 오염 기여도를 산출하였다. 외기에서는 2차 입자 오염원 45.4%, 자동차관련 오염원 26.1%, 생체량 연소 및 외기관연 오염원 16.2% 등 외부기인 오염원의 기여도가 높았으며, 내부기인 오염원인 철관련 오염원과 브레이크 마모관련 오염원은 영향이 미미한 것을 알 수 있다. 승강장에서는 브레이크 마모관련 오염원 32.5%, 2차 입자 오염원 22.6% 등 내부기인 오염원과 외부기인 오염원의 영향을 동시에 받는 것으로 나타났다. 이는 승객들의 이동과 역사 환기시스템 가동, 스크린도어의 개폐시 터널에서의 오염물질 유입 등의 영향으로 복합적인 영향을 받은 것으로 보인다. 터널에서의 기여도 결과, 브레이크 마모관련 오염원 56.9%, 2차 입자관련 오염원 17.9%,

Table 3. Average source contributions ($\mu\text{g m}^{-3}$) and relative contributions (%) of each individual identified source to the PM_{10} .

Site	Source	PM_{10}	
		$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%
Outdoor	Biomass burning, Outdoor related	8.6	16.2
	Vehicle related	13.9	26.1
	Soil and road dust related	3.5	6.6
	Secondary aerosol related	24.1	45.4
	Ferrous related	0.8	1.5
	Brakewear related	2.2	4.2
Platform	Biomass burning, Outdoor related	12.5	16.8
	Vehicle related	13.3	17.8
	Soil and road dust related	3.4	4.6
	Secondary aerosol related	16.9	22.6
	Ferrous related	4.3	5.7
	Brakewear related	24.3	32.5
Tunnel	Biomass burning, Outdoor related	7.1	4.0
	Vehicle related	10.4	5.8
	Soil and road dust related	2.9	1.6
	Secondary aerosol related	32.0	17.9
	Ferrous related	24.6	13.8
	Brakewear related	101.9	56.9

철관련 오염원 13.8% 등이 높은 기여도를 보였으며, 자동차관련 오염원과 생체량 연소 및 외기 오염원, 토양 및 도로비산 관련 오염원은 각각 6.6%, 4.6%, 1.6%로 낮은 기여도를 보였다. 터널에서도 2차 입자 관련 오염원의 기여도가 17.9%로 적지 않게 나타난 것으로 보아 터널과 외기와의 환기로 인해 일정한 외기의 영향을 받은 것으로 사료된다. 표 3은 각 측정지점별 질량 기여도와 기여율을 나타낸 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 지하역사에서의 PM_{10} 의 오염원 확인과 기여도를 추정하기 위하여 서울시 지하철 4호선 M역사를 선정하고, 외기를 비롯한 4개 지점에서 2010년 4월, 7월, 10월, 2011년 1월 중 총 32일간 PM_{10} 시료를 동시채취하고 화학성분을 분석하였다. 이 성분자료를 수용모델의 한 종류인 PMF의 입력자료로 활용하여 기여도를 추정하였다.

연구결과에 의하면 지하철 내 각 지점별 PM_{10} 의 산술평균농도는 외기 $41.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 승강장 $77.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 터널1 $194.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 터널2 $181.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되어 터

널에서의 오염도가 높다는 것을 알 수 있었다. 한편, PMF 모델링 결과 M역사에서의 PM_{10} 의 주요 오염원은 생체량 연소 및 외기오염원, 자동차관련 오염원, 토양 및 도로비산 관련 오염원, 2차 입자 오염원, 철관련 오염원, 브레이크 마모관련 오염원 등 6가지 오염원이 확인되었다. 모델링 결과 4호선 M역사의 승강장과 터널의 내부기인 오염원 기여도는 각각 38.3%와 70.7%를 보였으며, 주변 외기의 경우 외부기인 오염원 기여도가 94.3%로 PMF 모델이 각 지점별 오염원별 특성을 잘 나타내고 있는 것으로 분석되었다.

본 연구를 통해 지하역사에서는 지하철 오염원의 내부기인 오염원의 기여도가 매우 높음을 알 수 있었다. 비록 승객들이 왕래하는 승강장에서의 PM_{10} 오염도는 PSD의 설치로 크게 낮아졌지만, 내부 및 외부기인 오염원으로 터널내부는 높은 오염도를 보이고 있다. 이로 인해 터널내부를 운행하는 전동차 내 승객들의 건강위해가 증대될 것으로 사료된다. 이에 따라 승강장 및 터널에서의 미세먼지 저감설비의 개선이 필요하며, 터널의 내부 발생 오염물질 저감을 위한 고효율 저감시설의 설치가 요구된다. 특히, 승강장의 경우 외부기인 오염원의 영향이 적지 않으므로 외부에서의 오염물질 유입을 차단할 수 있는 환기설비가 필요하다. 이와 더불어 $\text{PM}_{2.5}$ 의 인체에 대한 유해성을 고려하여 지속적으로 $\text{PM}_{2.5}$ 의 거동 및 특성에 대한 연구가 필요하며, 더 나아가 현재 실내공기질 관리규정에는 없으나, 규제항목으로 지정되어 관리되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구의 일부는 국토해양부 미래도시철도기술개발사업의 연구비지원 (과제번호#09 미래도시철도 A-01)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

Choi, H.W., I.J. Hwang, S.D. Kim, and D.S. Kim (2004) Determination of source contribution based on aerosol number and mass concentration in the Seoul subway stations, J. KOSAE, 20(1), 17-31.

- Chueinta, W., P.K. Hopke, and P. Paatero (2000) Investigation of sources of atmospheric aerosol at urban and sub-urban residential area in Thailand by positive matrix factorization, *Atmospheric Environment*, 34(20), 3319-3329.
- Han, G.H. (2002) Source contribution studies by SEM/EDX in Seoul subway station, Department of Environmental Science and Engineering, Graduate School, Kyung Hee University.
- Hongsungbrake (2010) Component Materials of Frictional Material, URL http://www.hsbrake.com/new2011/html/sub04_01_04.html.
- Hopke, P.K. (1985) Receptor Modeling in Environmental Chemistry, John Willy & Sons, New York.
- Hwang I.J., T.H. Kim, and D.S. Kim (2001) Source identification of PM-10 in Suwon using the method of positive matrix factorization, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 17(2), 133-145.
- Kim, E., P.K. Hopke, and Y. Qin (2005) Estimation of organic carbon blank values and error structures of the speciation trend network data for source apportionment, *Air & Waste Manage. Assoc.*, 55, 1190-1199.
- Lee, E., C.K. Chan, and P. Paatero (1999) Application of positive matrix factorization in source apportionment of particulate pollutants in Hong Kong, *Atmospheric Environment*, 33(19), 3201-3212.
- Lee, J.H., Y. Youshida, B.J. Turpin, P.K. Hopke, R.L. Poirot, P.J. Lioy, and J.C. Oxley (2002) Identification of sources contributing to Mid-Atlantic regional aerosol, *Air & Waste Manage. Assoc.*, 52(10), 1186-1205.
- Lee, T.J., J.S. Jeon, S.D. Kim, and D.S. Kim (2010) A Comparative study on PM₁₀ source contributions in a Seoul metropolitan subway station before/after installing platform screen doors, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 26(5), 469-591.
- Nam, B.H., I.J. Hwang, and D.S. Kim (2002) Pattern classification of PM-10 in the indoor environment using disjoint principal component analysis, *J. KOSAE*, 18(1), 25-37.
- Oh, M.S., T.J. Lee, and D.S. Kim (2009) Source identification of ambient size-by-size particulate using the positive matrix factorization model on the border of Yongin and Suwon, *J. KOSAE*, 25(2), 108-121.
- Paatero, P. (1998) User's Guide for Positive Matrix Factorization Program PMF2 and PMF3, Part 1: Tutorial, University of Helsinki.
- Paatero, P. and U. Tapper (1994) Positive matrix factorization: A non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values, *Environmetrics*, 5, 111-126.
- Paatero, P., P.K. Hopke, B.A. Begum, and S.K. Biswas (2005) A graphical diagnostic method for assessing the rotation in factor analytical models of atmospheric pollution, *Atmospheric Environment*, 39, 193-201.
- Paatero, P., P.K. Hopke, X.H. Song, and Z. Ramadan (2002) Understanding and controlling rotations in factor analytic models, *Chemom. Intell. Lab. Syst.*, 60, 253-264.
- Park, D.S., M.S. Oh, Y.H. Yoon, E.Y. Park, and K.Y. Lee (2012) Source identification of PM₁₀ pollution in subway passenger cabins using positive matrix factorization, *Atmospheric Environment*, 49, 180-185.
- Polissar, A.V., P.K. Hopke, P. Paatreo, W.C. Malm, and J.F. Sisler (1998) Atmospheric aerosol over Alaska, 2. Elemental composition and sources, *J. of Geophysical Research Environ.*, 103(D15), 19045-19057.
- Qin, Y., K. Oduyemi, and L.Y. Chan (2002) Comparative testing of PMF and CFA models, *Chemom. Intell. Lab. Syst.*, 61, 75-87.
- Seo, Y.C., J.O. Chung, and J.W. Park (2005) Friction characteristics of disk brake pads with different abrasive components, *KSAAE05-P0316*, 1992-1999.
- Seoul metro (2011) Transportation Statistics, URL <http://www.seoulmetro.co.kr/page.action?mCode=G030030000>.
- Song, X.H., A.V. Polissar, and P.K. Hopke (2001) Source of fine particle composition in the northeastern US, *Atmospheric Environment*, 35(31), 5277-5286.
- Suh, E.H. (2001). SPSS statistical analysis. Freedom Academy, 262-266.
- U.S. EPA (1999a) Air Quality Criteria for Particulate Matter, Volume I, EPA/600/p-99/002a.
- U.S. EPA (1999b) SPECIATE Ver 4.0.