

지하철 전동차 객실에서의 PM₁₀ 오염특성 파악에 관한 연구

A Study for Characteristics of PM₁₀ in the Subway Passenger Cabins

오 미 석¹⁾ · 박 덕 신^{1),*} · 박 은 영^{1),2)}

¹⁾한국철도기술연구원, ²⁾과학기술연합대학원대학교

(2011년 4월 7일 접수, 2011년 7월 27일 수정, 2011년 9월 9일 채택)

Miseok Oh¹⁾, Duck-Shin Park^{1),*} and Eunyoung Park^{1),2)}

¹⁾Korea Railroad Research Institute, ²⁾University of Science and Technology

(Received 7 April 2011, revised 27 July 2011, accepted 9 September 2011)

Abstract

This study had the aim of characteristics of PM₁₀ in subway cabins. PM₁₀ was measured by times of day (rush and non rush hours) and seasons with real time PM₁₀ sampler on the subway cabins of line 7. Filter samples were collected for evaluation of their elemental composition as well as identification of major sources of PM₁₀ using a receptor model, PMF. PM₁₀ concentration were the highest in the winter season both in the rush and non rush hours at 152.8 µg/m³, 90.2 µg/m³ respectively. The PM₁₀ concentrations in rush hour were 30% higher compared to non rush hours. Based on the chemical information, the composition rare of inorganic elements was 52.5%, anions were 10.2% and others were 37.3%. Fe was the most abundant element and significantly correlated ($p < 0.01$) with Mn ($r=0.97$), Ti ($r=0.91$), Cr ($r=0.88$), Ni ($r=0.89$) and Cu ($r=0.88$). Characterized PM₁₀ sources by PMF in the cabin were soil and road dust related sources (27.2%), railroad related sources (47.5%), secondary nitrate sources (16.2%) and a Cl-factor mixed with a secondary sulfate source (9.1%).

Key words : PM₁₀, Subway cabin, PMF

1. 서 론

서울시 지하철은 1974년에 1호선을 개통한 이래로 현재 하루 평균 약 400만 명이 이용하고 있다. 2009년 8월 기준으로 수도권 지하철은 1호선에서 9호선까지, 분당선, 인천 1호선, 중앙선으로 12개 노선이 연계 운영되고 있으며, 수도권 인구의 주요한 교통수단

으로서 지하철의 수송 부담률은 35% 정도가 되고 있다(Seoul, 2009). 또한 수도권뿐만 아니라 각 광역시에서도 향후 지하철 증설공사가 계획되고 있어 이용 승객들이 더 증가할 것으로 예상된다.

그러나 지하철은 대부분 밀폐된 지하공간이라는 입지 조건에 근거를 두고 있어 지상 공간에 위치하고 있는 다른 공공건물의 실내보다 열악한 실정이다. 또한 수많은 사람들이 지하철을 이용할 때 사람들에 의해 유입되거나 지하철역 내부 공간 자체에서 발생하는 오염물질들이 외부로 배출되지 못하고 축적될 가

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)31-460-5367, E-mail : dsparc@krrri.re.kr

능성이 상당히 높다. 따라서 지하철 승객 및 작업자들과 지하철역 주변 지하 공간을 이용하는 사람들이 이러한 오염물질에 장기간 노출 시 건강상의 위해도가 높아질 가능성이 크다(Kim *et al.*, 2006).

미세먼지는 지하철의 주요 오염물질로서 열차의 운행, 승객들의 이동, 환기를 통한 외부 공기의 유입 등 다양한 경로로부터 발생하는 것으로 알려져 있다. 역학 연구에서 미세먼지에 대한 노출은 질병률 및 사망률 증가와 밀접한 관련이 있는 것으로 인체 위해성이 높고 체감 오염도를 증가시키는 것으로 나타났다. 지하철에서 측정된 미세먼지 농도는 일반 대기 중에서의 농도보다 비교적 높은 농도로 존재하며, 독성이 크기 때문에(Nieuwenhuijsen *et al.*, 2007) 미세먼지는 지하철 공기질을 개선하는 데 있어 중요한 관리대상 물질이다.

이미 베이징(Li *et al.*, 2006), 홍콩(Chan *et al.*, 2002), 프라하(Braniš, 2006) 런던(Seaton *et al.*, 2005; Sitzman *et al.*, 1999), 뉴욕(Chillrud *et al.*, 2004) 등 세계 주요 대도시에서 운영되고 있는 지하철 내 미세먼지 특성에 대한 많은 연구들이 진행되었다. 국내에서도 수도권 지하철 내 미세먼지 특성을 파악하기 위한 많은 연구들이 수행되었지만(Lee *et al.*, 2010; Park and Ha, 2008; Kim and Paik, 2004; Park *et al.*, 2004) 주로 지하철 역사 및 터널에서의 미세먼지 오염에 집중되어 있으며 지하철 객실을 대상으로 한 미세먼지의 성분 분석, 오염원 추정 등의 세부적인 연구는 진행되지 않았다.

본 연구에서는 지하철 전동차 객실 내부의 미세먼지 특성을 파악하기 위해 수도권 지하철 노선 중 7호선을 대상으로 PM₁₀ 농도를 측정하였으며 분석을 통해 그 화학적 특징을 분석하였다. 또한 분석이 완료된 시료를 수용모델(receptor model)에 적용하여 전동차 객실 내부 미세먼지 주요 오염원을 확인하고자 하였다. 본 연구 결과는 전동차 공기질 관리를 위한 기초 자료로서 전동차 내 쾌적한 실내공기질 개선 방안 도출에 도움이 될 것으로 사료된다.

2. 연구방법

2.1 연구대상

본 연구에서는 서울시 지하철 7호선 객실을 선정

하여 이를 대상으로 연구를 진행하였다.

지하철 7호선은 장암에서 온수로 이어지는 구간을 운행하며 총 길이 46.9km에 42개 역으로 구성되어 있으며 평균 심도는 약 23.5m이다. 지하철 7호선에서 독점유원지, 장암, 도봉산역의 세군데 역이 지상역으로 조사되었다. 전동차는 총 504량이 운행되고 있으며 운행간격은 2.5분에서 6.0분 간격, 소요시간은 총 87분이다. 2010년 집계된 수송인원은 약 315백만 명이며, 일평균 수송인원은 864천 명이다(Seoul Metropolitan Rapid Transit Corporation, 2010).

2.2 PM₁₀ 측정 및 분석방법

도시철도 전동차 객실 내 계절별, 시간대별 PM₁₀ 농도 경향을 파악하기 위해 2010년 1월(동계), 4월(춘계), 7월(하계), 10월(추계)의 4계절에 걸쳐 혼잡 시간(7시~9시)과 비혼잡 시간(11시~13시)을 구분하여 총 8회 측정을 실시하였다. 본 연구에서는 승객이 집중되는 시간대와 승객이 비교적 적은 시간대를 비교하고 역간의 공기질 오염도 비교 등의 다양하고 실증적인 데이터 산출을 위해서 광산란 연속측정법을 사용하여 6초 단위로 PM₁₀ 농도를 모니터링 하였으며, 역간 이동 시 전동차 내 객실 인원, 이산화탄소 농도를 함께 조사하였다. 본 연구에서 사용된 PM₁₀ 광산란 연속측정 장치(LD-3B, SIBATA Co.)는 10% 내외의 측정 정확도를 갖고 있다.

광산란법 측정 장치는 이동성, 편리성, 먼지의 농도를 단시간 내 측정할 수 있는 신속성의 장점이 있다. 그러나 광산란법으로 측정된 수치는 중량을 이용한 농도 값이 아닌 미세먼지의 개수 및 산란량을 이용하여 계산한 상대적인 값이기 때문에 이는 광산란법 적용의 한계로 작용하고 있다. 본 연구에서 사용된 광산란 측정장치에 대한 신뢰도를 검증하기 위해서 지하철 역사 대합실에서 베타선 흡수법(FH62C-14, Anderson Co.)과 미세먼지 측정 농도 비교 실험을 6일간 진행하였다.

그림 1은 지하철 대합실에서 본 연구에서 사용된 광산란 측정장치와 베타선 흡수법으로 측정된 PM₁₀ 1시간 평균 농도(n=147)에 대한 산점도(scatter plot)를 나타낸 것이다. 두 측정 장치 간 상관계수(r)가 0.908로 본 연구에서 사용된 광산란 측정장치는 베타선 흡수법과 높은 상관성이 있음을 확인하였다.

전동차 객실 내 미세먼지의 물리·화학적 특성을

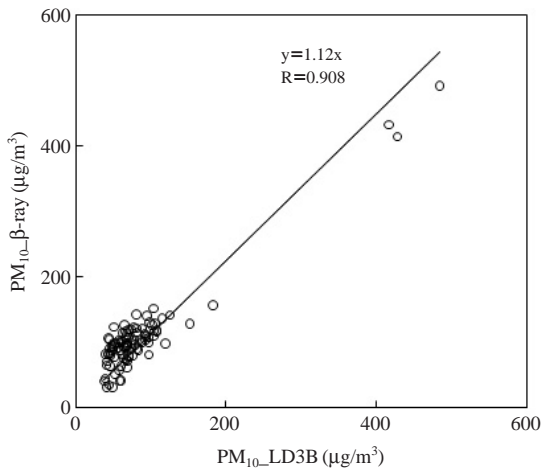


Fig. 1. Comparison of the PM₁₀ hourly concentrations by both the light scattering (LD-3B) and beta-ray absorption methods (Anderson).

파악하기 위한 목적으로 2009년 3월 서울시 7호선을 대상으로 미니볼륨에어샘플러로 평균 5 L/min의 유량으로 7시간 동안 채취하였다. 필터는 멤브레인 필터(PTFE, Membrane Filter 0.2 µm, 47 mm, Whatman Co.)를 사용하였다. 시료채취 전후로 3일간 항온, 항습 상태에서 전자테시계이터(Oyin 09678BN, Sanplatec Co.) 내에 보관하여 항량시킨 후 0.01 mg의 감도를 갖는 전자저울(HM-202, A&D Co.)로 칭량하여 미세 먼지 농도를 계산하였다.

지하철 객실의 PM₁₀을 채취한 여지는 무기원소 및 이온성분의 분석을 위하여 마그네틱 가위를 이용하여 필터를 1/2 크기로 절취하여 각각의 분석목적에 맞게 전처리를 실시하였다. PM₁₀ 무기원소 분석을 위한 전처리 방법은 미국 EPA가 고시한 CWA (Clean Water Act)의 전처리법을 준용하여 microwave (MARS5, CEM Co.)를 이용한 질산-염산 전처리 방법을 사용하였다. 채취한 시료를 PFA liner에 넣은 후 유해 중금속 측정용 61% 질산 7 mL와 35% 염산 3 mL를 가한 후 150 psi 조건에서 10분간 압력을 유지하는 방법으로 무기원소 성분을 추출하였다. 추출한 용액은 여지(NO. 5B, 110mm, Advance MFS Co.)로 여과하였으며, 초순수를 가하여 50 mL로 희석한 후 분석 전까지 4°C에서 냉장보관 하였다. 이와 같이 전처리가 끝난 용액은 ICP-AES 분석법(DRE ICP, Leeman Labs Co.)을 이용하여 Mg, Al, Si, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu,

Zn, Ba, Pb 등 13개의 무기원소 성분을 분석하였다.

또한 수용성 이온성분은 절취한 여지를 30 mL 초순수에 침적시켜 초음파 추출기(5210R-DTH, Branson Ultrasonics Co.)로 추출하는 전처리 방법을 이용하였다. IC 분석 시 칼럼의 막힘 현상을 방지하기 위하여 추출된 용액은 직경 47 mm, pore size 0.45 µm의 sterile 막여지(Whatman Co.)로 여과하고 그 여액을 폴리에틸렌 재질의 60 mL narrow mouth bottle (Nalgene Co.)에 넣어 분석 전까지 4°C에서 냉장보관 하였다. 추출된 수용성 이온성분의 농도를 분석하기 위해 이온크로마토그래피(DX-400, Dionex Co.)를 사용하였으며 AS12A 칼럼을 사용하여 NO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻ 등 3개의 음이온을 분석하였다.

2. 3 PMF 모델링

인자분석(factor analysis)은 해석하기 난해한 다차원의 측정 변수들을 물리적으로 해석 가능한 저차원의 인자수로 변환하는 차원축소 과정이다. 인자분석은 대기연구 분야에서도 입자 중 화학성분간의 상관관계를 평가하고 상관성이 높은 화학성분들의 그룹을 도출하여 관련 오염원을 확인하는 데 주로 사용되고 있다. 하지만 인자분석은 공분산 행렬에만 의존하여 불충분한 정보의 제공, 음수(negative value)의 인자부하량(factor loading) 출현, 인자의 회전시에 발생하는 모호성 등 물리적으로 완벽한 인자해석의 한계를 가지고 있다(Hwang *et al.*, 2001). 이러한 인자분석의 단점을 극복하기 위해 기존의 인자분석보다 진보된 PMF (positive matrix factorization) 방법론이 개발되었다(Paatero and Tapper, 1994).

PMF의 경우 인자부하량이 항상 양의 값으로 계산되며, 상관행렬의 정보에 의존하는 것이 아니라 개개 자료의 최소자승값이 최소가 되는(least square minimization) 알고리즘에 의존한다. 즉 PMF는 개개 자료에 대한 오차추정 정보에 의존한다. PMF 모델식은 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$X = GF + E \text{ or } X_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + e_{ij} \quad (1)$$

여기서, X (n × m)는 n개의 시료수에 대한 m개의 분석 화학종을 행렬로 나타낸 것이다. G 행렬(n × p)은 인자점수(factor score)로서 각각의 시료에 대한 오염원의 기여도를 나타낸다. 또한 F 행렬(p × m)은 오염원분류표(source profile)를 나타내며 E는 잔차행렬

Table 1. Seasonal PM₁₀ concentrations in the subway cabins.(unit: µg/m³)

	Rush hour					Non-rush hour				
	Spring	Summer	Autumn	Winter	Total	Spring	Summer	Autumn	Winter	Total
PM ₁₀	70.1 (±24.4)	63.4 (±18.8)	62.4 (±18.5)	152.8 (±25.8)	88.1 (±43.1)	64.1 (±13.0)	85.1 (±22.2)	37.0 (±8.6)	90.2 (±8.6)	68.4 (±23.1)
# of passenger	82.6 (±49.6)	90.9 (±63.7)	110.5 (±75.6)	93.9 (±64.8)	94.2 (±64.3)	44.1 (±23.2)	61.9 (±20.3)	54.9 (±29.3)	36.8 (±17.1)	49.5 (±24.7)

(residual matrix)을 의미한다. PMF 모델에서 행렬 G 와 F 의 값들은 항상 양의 값을 가지며 Q 값을 최소화 하여 얻을 수 있다. 또한 Q 값은 적정수의 인자수를 결정하는 데 유용하게 사용된다. Q 값은 식 (2)에서와 같이 구할 수 있다.

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{(x_{ij} - g_{ik} f_{kj})^2}{\sigma_{ij}^2} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{e_{ij}}{\sigma_{ij}} \right)^2 \quad (2)$$

여기서, σ_{ij} 는 x_{ij} 의 불확도를 의미한다. 불확도는 모델 사용자에 의해 추정되며, 개별 농도 데이터에 가중치를 부과할 수 있다. 이점이 기존의 인자분석과 차별되는 PMF의 장점이라고 할 수 있다.

비록 PMF 방법론이 다른 수용방법론과 비교하여 복잡한 분석절차를 거치지만, 개개의 자료에 가중치를 두어 현실성 있는 정보를 제공할 수 있으며 오염원을 확인하고 기여도를 규명하는 데 개선된 해를 얻을 수 있다.

3. 결과 및 토의

3.1 전동차 객실 내 PM₁₀ 농도 특성 및 경향

7호선 전동차에서의 PM₁₀ 농도 측정 결과를 표 1에 나타내었다. 계절별로 측정된 PM₁₀ 농도 결과는 환경부의 대중교통수단 실내공기질 가이드라인에서 제시하고 있는 비혼잡 시 200 µg/m³, 혼잡 시 250 µg/m³ 이하의 수준으로 나타났다. 계절별 측정 결과를 보면 겨울철 혼잡 시간대 152.8 µg/m³, 겨울철 비혼잡 시간대 90.2 µg/m³로 다른 계절에 비해 겨울철 전동차 객실에서 PM₁₀ 농도가 높은 것으로 확인되었다. 겨울철의 경우 난방과 객실 온도 유지를 위해 환기율이 낮아지는 데 이는 PM₁₀ 농도에 영향을 미치는 것으로 사료된다.

시간대별 측정 결과를 보면 그림 2에 나타난 것과 같이 평균적으로 혼잡 시간대에 측정된 PM₁₀ 농도가

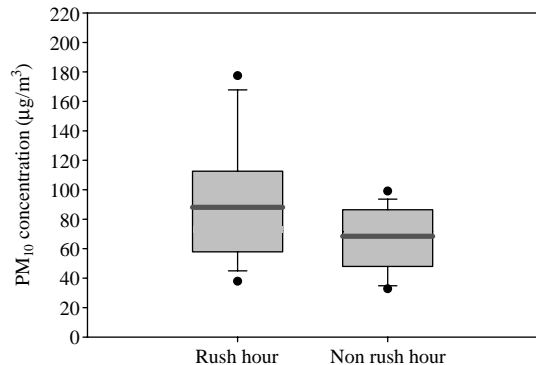


Fig. 2. A comparison of average PM₁₀ concentrations measured in the cabin when rush hour and non rush hour (solid line in box: mean, end lines of box: 25 percentile and 75 percentile, whisker caps: 10 percentile and 90 percentile, closed circles: outliers).

비혼잡 시간대에 측정된 농도에 비해 30% 정도 더 높은 수준을 보이고 있으며 혼잡, 비혼잡의 시간대 구분에 따른 농도 분포의 차이를 확인할 수 있었다.

정량적으로 객실 내 승객수와 PM₁₀과의 상관관계를 파악하기 위해서 역간 이동 시 전동차 내 승객수를 계수하였으며, 광산란 방식으로 PM₁₀ 연속 측정 중 역간 출발 및 도착 시간을 구분하여 전동차 이동 중 PM₁₀ 농도를 산출하였다. 전동차 내 승객수와 PM₁₀ 상관분석을 실시한 결과 전동차 객실 내 PM₁₀과 승객수의 직접적인 상관성을 확인할 수 없었다. 단순히 승객 수로 전동차 내 PM 농도 영향을 평가하기에는 무리가 있는 것으로 판단되며 전동차 내 PM₁₀ 농도에 영향을 주는 인자는 다양하게 존재할 것이라 사료된다. Brainš *et al.* (2005) 및 Fromme *et al.* (2007)은 실내에서 미세먼지 농도는 재실자의 활동성에 크게 영향을 받는 것으로 보고하였다. 전동차 내에서 승객들의 활동성이 커지는 시점은 차량 문 개폐에 따라 승객들이 이동하는 것인데, 본 연구에서는 전동차

Table 2. A statistical summary for 16 chemical species in PM₁₀.
(unit: µg/m³)

Species	Average	Min	Percentile			Max
			25	50	75	
PM ₁₀	65.71	14.29	44.05	54.76	75.00	200.00
Mg	4.74	0.19	4.41	4.52	5.05	10.48
Al	0.20	0.02	0.06	0.14	0.23	0.71
Si	2.71	2.28	2.50	2.58	2.70	3.74
Ti	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.05
V	0.05	0.02	0.03	0.05	0.06	0.09
Cr	1.03	0.05	0.19	1.13	1.48	3.99
Mn	0.24	0.07	0.10	0.17	0.25	1.06
Fe	29.31	6.57	12.27	19.77	27.28	119.62
Ni	0.64	0.05	0.17	0.68	0.84	2.47
Cu	0.20	0.04	0.09	0.16	0.23	0.55
Zn	2.29	0.06	0.71	1.31	3.14	8.14
Ba	0.24	0.02	0.11	0.24	0.31	0.60
Pb	0.97	0.22	0.82	1.10	1.27	1.32
Cl ⁻	10.45	2.80	6.80	8.66	15.19	19.44
NO ₃ ⁻	5.53	0.12	1.83	3.75	6.70	19.27
SO ₄ ²⁻	5.92	0.66	2.46	3.91	6.88	20.64

내에서 승객들의 활동성을 평가할 수 있는 정량적인 지표를 확인할 수 없다는 한계가 존재하였다. 또한 차량 문 개폐시 외부와 공기 치환이 이루어지면서 오염물질의 확산 및 이동에 대한 평가가 추가로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

3. 2 전동차 객실 내 PM₁₀ 성분분석 결과

미니볼륨에어샘플러를 이용하여 전동차 객실에서 측정된 30개 시료에 대한 PM₁₀ 농도 및 16개 원소에 대한 성분 분석 결과를 표 2에 요약하여 나타내었다. 전동차 객실에서 측정된 PM₁₀ 농도는 14.3~200.0 µg/m³ 범위로 나타났다. 성분분석 결과 측정된 미세먼지 중 무기원소 함유 비율이 평균 52.5%, 음이온 함유 비율이 평균 10.2%, 그 외 양이온, 유기 및 무기 탄소 등 분석되지 못한 성분에 대한 비율이 37.3%를 차지하는 것으로 확인되었다(그림 3).

분석된 원소 중 철(Fe)성분이 평균 29.3 µg/m³의 농도로 가장 큰 비율로 검출되었는데, 전동차 객실에서 측정된 PM₁₀ 농도에 대해 평균 10~70% 범위의 높은 분율을 보이는 것으로 확인되었다. 도시 철도 내 미세먼지 오염 특성을 규명한 국외 다른 연구(Adams, 2001; Sitzmann *et al.*, 1999)에서도 미세먼지 중 Fe 성분이 가장 높은 비율로 검출되었다. 또한 Seaten *et al.* (2005)은 도시 철도의 지상 플랫폼, 지하 플랫폼,

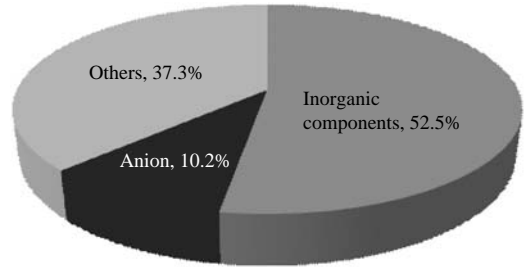


Fig. 3. Average chemical compositions of PM₁₀ in the subway passenger cabins.

전동차에 대한 미세먼지를 조사하였는데 도시철도에서 측정된 미세먼지의 80% 정도가 1µm 이하의 입경을 가지고 있었으며, PM_{2.5}의 경우 지상 플랫폼보다 지하 플랫폼에서 더 높은 농도가 관측되었다. 또한 성분 분석에서 Fe 성분이 64~71%의 비율을 차지하는 것으로 확인되었다.

지하철에서 Fe 성분은 차량의 브레이크 휠, 레일, 전차선의 스파크 등으로부터 주로 발생된다(Johanson and Johanson, 2003). 서울 지하철 7호선의 경우 평균 심도가 23.5m로 다른 지하철 호선에 비해 상대적으로 깊은 편이며 39개 역사 중 지하역사가 차지하는 비율이 92.9%에 이르는 것으로 지하철 운영으로, 발생하는 Fe 성분이 지하철의 구조적 특징으로 외부로 배출되지 못하고 전동차 내부로 유입되어 이와 같은 결과를 나타낸 것으로 사료된다.

미세먼지에서 Fe의 산화 상태가 독성을 결정하는데 일반 대기 중의 미세먼지에서 Fe는 Fe₂O₃(산화철 III, 적철석)의 형태로, 지하철 PM에서 Fe는 Fe₃O₄(산화철 II, III, 자철석)의 형태로 주로 존재하는 것으로 지하철에서 미세먼지 중의 Fe는 일반 대기에서 먼지 중의 Fe보다 독성이 강하다고 보고된 바(Karlsson *et al.*, 2005) 지하철 환경에서 발생하는 Fe 성분에 대한 세부적인 연구가 요구되는 것으로 판단된다.

Fe를 제외한 다른 무기원소 성분의 평균 농도는 Mg 4.74 µg/m³, Si 2.71 µg/m³, Zn 2.29 µg/m³, Cr 1.03 µg/m³, Pb 0.97 µg/m³, Ni 0.64 µg/m³, Ba 0.24 µg/m³, Mn 0.24 µg/m³, Al 0.20 µg/m³, Cu 0.20 µg/m³, V 0.05 µg/m³, Ti 0.01 µg/m³ 순으로 나타났다. 측정된 음이온의 평균 농도는 Cl⁻ 10.45 µg/m³, SO₄²⁻ 5.92 µg/m³, NO₃⁻ 5.53 µg/m³ 순으로 나타났으며 Cl⁻ 농도가 가장 높게 나타났다. 대기환경에서 미세먼지 중 Cl⁻의 발

Table 3. Correlation analysis results of chemical species in PM₁₀.

	Mg	Al	Si	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Ba	Pb	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Mg	1.00															
Al	0.32	1.00														
Si	0.25	0.86**	1.00													
Ti	0.43	0.94**	0.95**	1.00												
V	0.30	-0.13	-0.46	0.02	1.00											
Cr	0.00	0.84**	0.76**	0.89**	-0.09	1.00										
Mn	0.35	0.90**	0.82**	0.93**	0.02	0.90**	1.00									
Fe	0.34	0.91**	0.79**	0.91**	0.14	0.88**	0.97**	1.00								
Ni	0.26	0.86**	0.76**	0.89**	-0.13	0.96**	0.93**	0.89**	1.00							
Cu	0.34	0.92**	0.86**	0.93**	0.03	0.88**	0.88**	0.86**	0.89**	1.00						
Zn	0.10	0.51*	0.44*	0.53*	-0.10	0.59**	0.64**	0.62**	0.57**	0.48	1.00					
Ba	0.57	0.81	0.73	0.83	0.23	0.82**	0.84**	0.82**	0.82**	0.88**	0.58**	1.00				
Pb	0.01	0.32	0.18	0.31	-0.16	0.14	0.05	0.09	-0.53	0.61	-0.44	0.42	1.00			
Cl ⁻	-0.07	-0.03	0.09	-0.17	0.70	-0.43	-0.32	-0.30	-0.31	-0.12	-0.33	-0.35	0.92	1.00		
NO ₃ ⁻	0.66	0.63	0.72	0.36	0.93	0.29	0.18	0.19	0.04	0.26	-0.09	0.02	0.55	0.32	1.00	
SO ₄ ²⁻	0.27	0.01	-0.11	-0.23	0.91	-0.31	-0.24	-0.27	-0.34	-0.19	-0.50	-0.22	0.39	0.85	0.14	1.00

**p<0.01, *p<0.05

생원은 해염 또는 소각활동으로 주로 보고되었지만 (Funasaka *et al.*, 2003; Campbell *et al.*, 2002), 실내에서 Cl은 주로 청소용 세제 및 표백제의 사용, 드라이클리닝한 의류 등으로부터 발생하는 것으로 보고되었다 (Zhao *et al.*, 2006). 본 연구에서도 전동차 객실에서 Cl⁻은 주로 전동차 내부 청소를 위한 염소계 세제의 사용 후 잔류된 염소 성분이 입자상으로 존재하거나 승객들의 의류로부터 발생하는 것으로 추정된다.

측정된 원소들 간의 상관성을 파악하기 위한 목적으로 SPSS Ver. 13.0 통계 프로그램의 피어슨 상관분석 (Pearson correlation analysis)을 이용하여 측정된 16개 원소들 간의 상관관계를 분석하여 표 3에 제시하였다. 분석된 원소들 중 가장 큰 비율로 존재하고 있는 Fe 성분에 대한 결과를 보면 Fe는 Mn과 상관계수 (r)가 0.97로서 가장 높은 상관성을 보였다. 또한 Al (r=0.91), Ti (r=0.91), Cr (r=0.88), Ni (r=0.89), Cu (r=0.88) 등의 원소와도 높은 상관성을 보이는 것으로 확인되었다. 미세먼지에서 토양, 지각 물질과 관련 있는 Al, Si의 경우도 상관계수 0.86으로 통계적으로 유의하게 상관성을 보이는 것으로 확인되었다.

Gehrig *et al.* (2007)의 철로 주변에서 발생하는 미세먼지의 원소들에 대한 질량수지 연구에서 Fe, Mn, Cu가 철도 오염원과 관계되는 주요한 원소임을 확인하였으며, 철로의 마모에 의한 영향을 평가하는 지표 원소로 Cr, Mn, Fe를 열차 간 견인선의 마모에 의한

영향을 평가하는 지표 원소로 Cu를 제시하였다. Bukowiecki *et al.* (2007)의 경우도 대기 중 미세먼지에서 철도의 영향을 평가하기 위한 지표로 Fe/Mn 비를 이용하였다. 또한 Chillrud *et al.* (2004)의 연구에서 지하철 이용 여부에 따라 학생들의 그룹 간 Fe, Mn, Cr 등의 무기원소 노출 정도를 평가하였는데, 지하철을 이용한 학생들 그룹에서 대조군에 비해 Fe, Mn, Cr이 고농도로 노출되고 있음을 확인하였다. 원소들 간의 상관분석 결과와 다른 연구 사례들을 종합해 보았을 때 Fe, Mn, Cr, Cu의 4가지 무기원소는 철도 관련 오염원의 지표 원소로서 구분되어지는 것으로 판단되며 이들 원소에 대한 세부 정보는 향후 미세먼지 오염원 확인 및 기여도의 정량적 평가 시 활용되어질 수 있을 것이라 사료된다. 또한 전동차 객실 내부 환경의 경우도 지하철 운영 시 발생하는 미세먼지의 영향을 크게 받는 것으로 추정할 수 있다.

3.3 PMF 모델링 입력 자료 준비

PMF를 이용하여 지하철 전동차 내 PM₁₀ 오염원을 정량적으로 평가하기 위해서는 원자료 (raw data)를 적절하게 재구성하여 모델에 입력하여야 한다. 2009년 봄철 (3월) 지하철 7호선 전동차에서 30개의 PM₁₀ 시료를 측정하여 분석하였다. PMF 모델링에 사용된 자료는 무기원소 13종 (Mg, Al, Si, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ba, Pb), 음이온 성분 3종 (Cl⁻, NO₃⁻,

SO₄²⁻)으로 구성된 30×16 행렬 자료이다. 시료 구성에는 각 행(row)에 시료들이 위치하고 열(column)에는 각 시료 분석항목들의 농도 값이 위치하도록 하는 Q mode를 사용하였다. 분석된 항목 중에는 결측된 자료와 검출한계 이하의 자료가 존재하는데, 이러한 자료가 많이 존재하는 경우 항목 자체를 모델링에서 제외하는 것이 가장 바람직한 방법이나, 항목 자체를 제외하는 것보다 적당한 방법을 이용하여 이런 값들을 대체하는 방법이 있다. 본 연구에서는 검출한계 이하의 값에 대해서는 검출한계 값의 1/2로 대체하며, 결측된 자료에 대해서는 해당 화학종의 기하평균으로 대체하는 방법(Lee et al., 2002; Polissar et al., 1998)을 사용하였다.

PMF 모델링을 실시할 때는 위에서 언급한 측정치 외에 측정치의 불확도 자료가 필요하다. 이는 PMF 모델링 실행 시 각 자료에 가중치를 부여하는데, 검출한계 미만의 자료나 결측자료에 대해서는 불확도를 크게 함으로써, 이들 자료의 가중치를 감소시키고 모델결과의 현실성을 부여할 수 있다(Oh et al., 2009). 오차추정 과정에서 불확도 S_{ij}(error)는 식(3)과 같이 계산할 수 있다. 불확도를 계산하기 위해서 오차분율(fraction error)을 사용하는데 이는 식(3)의 k에 해당한다. 또한 식(3)에서 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).

$$S_{ij} = [MDL] / 3 + k \times X_{ij} \quad (3)$$

본 연구에서도 식(3)를 이용하여 불확도를 계산하였으며, 검출한계 미만의 자료와 결측치에 대해서는 큰 값의 오차 분율을 할당하였다.

3.4 전동차 객실 내 PM₁₀ 오염원 확인 및 기여도 추정

오염원을 확인하고 평가하는 데 가장 중요하게 고려해야 할 사항은 오염원의 개수, 즉, 인자수를 결정하는 것이다. PMF 모델링에서 결정된 인자수에 따라 해석이 달라질 수 있기 때문에 인자수를 변화시켜 가면서 반복적인 모델링을 수행하고 물리적으로 의미있는 최적의 인자수를 결정해야 한다(Song et al., 2001).

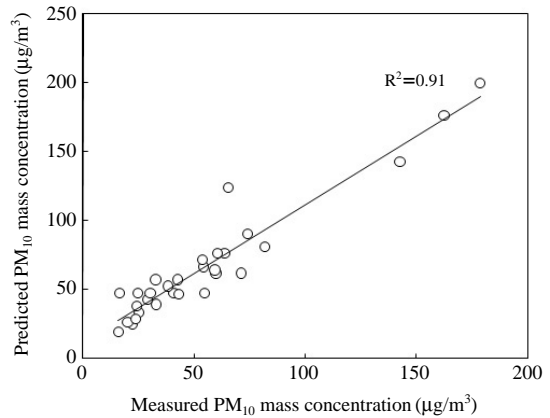


Fig. 4. Comparison of measured and predicted PM₁₀ mass concentration.

인자의 수가 너무 많으면 실제 존재하지 않는 오염원의 출현 가능성이 클 수 있고, 이와 반대로 인자의 수가 너무 적으면 여러 오염원이 중복되어 나타날 수 있다(Lee et al., 2010).

PMF 모델링 결과, 7호선 전동차 객실에서 PM₁₀ 오염원의 수는 4개로 추정되었다. 인자수를 결정한 뒤 Fpeak의 값을 -1.0에서 1.0까지 0.1 단계씩 변화를 주어 모델링을 실시하였으며, Q값이 일정하게 유지되는 범위 내에서 최적의 회전 자유도를 결정하였다(Han et al., 2006; Kim et al., 2003; Song et al., 2001). 본 연구에서 최적의 Fpeak는 0.0으로 나타났다. PMF 모델링으로부터 산출된 오염원 분류표와 오염원 기여도를 정량적으로 평가하기 위해 측정된 PM₁₀ 질량농도와 추정된 오염원 기여도 값에 대한 다중회귀분석을 실시한 후 생성된 계수를 이용하여 표준화시켰다.

PMF 모델링을 통하여 구한 PM₁₀ 농도값이 얼마나 실제 농도값을 설명하는가를 나타내는 결정계수 값(R²)을 그림 4에 나타내었다. 이때 PM₁₀ 질량농도 사이의 결정 계수(R²)가 0.91로 모델을 통한 추정치가 실측치를 비교적 잘 설명하고 있는 것으로 확인되었다.

그림 5에는 PMF 모델링으로부터 산출된 전동차 객실 내 PM₁₀ 오염원 분류표를 제시하였으며 본 연구에서는 추정된 오염원의 최적 수는 4개로 확인되었다. 수용방법론 중 PMF는 오염원 분류표(source profile)가 존재하지 않는 환경에 적합한 방법이지만 산출된 오염원을 확인할 때 오염원에 대한 정보가 부족

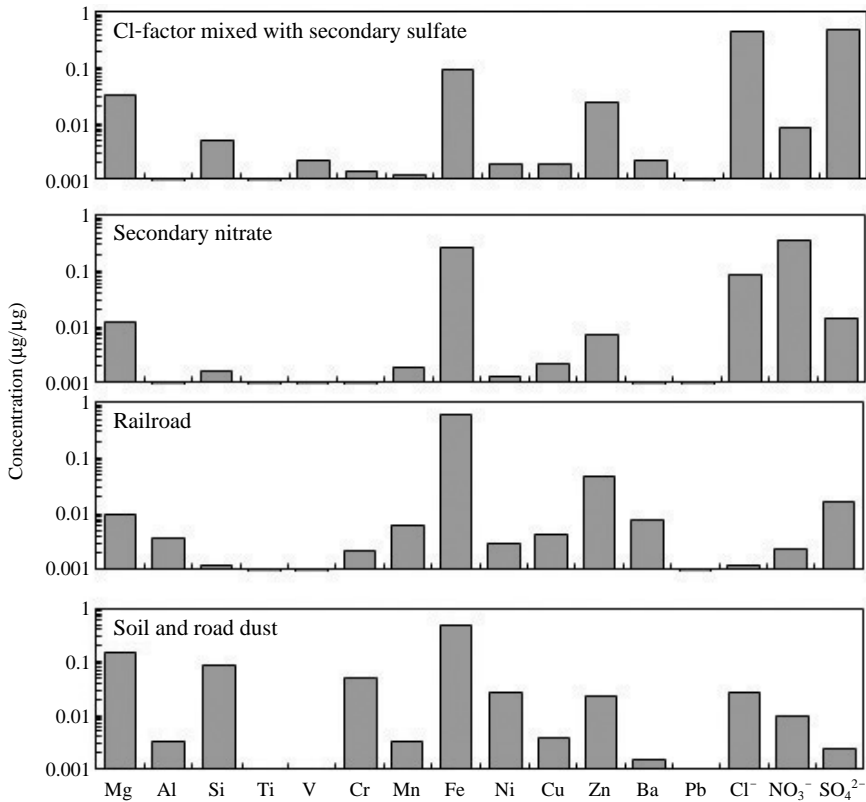


Fig. 5. Source profiles determined by PMF modeling.

하여 많은 어려움이 따른다. 따라서 연구 환경 특성에 대한 선행조사, 발생 가능한 오염원의 화학종 배출 특성, 관련 문헌에 대한 충분한 조사가 이루어져야 한다. 본 연구에서도 철도 환경에 대한 기본 조사를 바탕으로 각 오염원에 대하여 화학종의 농도 및 분율, 화학종간 통계적 분석 및 각 오염원에 대한 특정 확인자(marker)를 바탕으로 오염원을 확인하였다.

전동차 객실 내 PM₁₀의 주요 오염원은 토양 및 도로비산 관련, 철도 관련, 2차 분진으로 질산염관련 오염원과 염소 및 황산염 관련 오염원의 4가지로 확인되었다. 첫 번째 오염원의 경우 토양 및 도로비산(soil and road dust) 관련 오염원으로 분류하였다. 일반적으로 토양 성분의 오염원 프로파일에서는 Si가 10% 이상의 분율을 보이는 것으로 본 연구에서 생성된 첫 번째 오염원에서도 Si가 약 10% 정도의 질량 분율을 보이는 것으로 확인되었다. 전동차 내 토양 및 도로비산 오염원의 PM₁₀에 대한 기여도는 27.2% (14.9

µg/m³)로 나타났으며 이는 Lee *et al.* (2010)의 지하철 승강장 내 PM₁₀ 연구에서 확인된 토양 및 도로비산면지 관련 오염원의 기여율 26.1%, 26.3%와 유사한 기여도 값을 보이는 것으로 확인되었다.

두 번째 오염원은 앞서 언급한 바와 같이 여러 문헌을 통해 규명되어진 바 있는 철도 운행과 관련된 주요 추적자 원소 Fe, Mn, Cu, Ba이 크게 기여하고 있다. 이는 전동차의 운행 시 열차 레일의 마모, 브레이크 마모, 전력 공급선 및 견인선의 마모로부터 주로 발생하는 것으로, 전동차 내 상부 환기구에서 급기 시 터널로부터 일부 유입되거나 열차풍에 의해 전동차 내부로 유입되는 것으로 판단된다. 철도관련 오염원은 전동차 내 PM₁₀에 대해 47.6% (26.1 µg/m³)로 본 연구에서 추정된 오염원 중 가장 크게 기여하는 것으로 확인되었다.

세 번째 오염원은 NO₃⁻가 크게 기여하고 있는 오염원으로 2차 분진 중 질산염 관련(secondary nitrate)

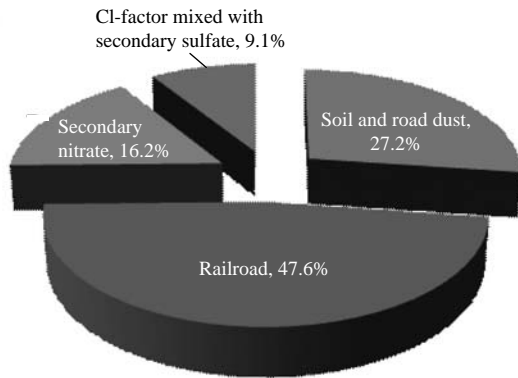


Fig. 6. Average source contributions estimated by PMF model in the subway cabin.

오염원으로 추정하였다. 본 연구에서는 이온 성분 중 음이온 성분만 측정하였기 때문에 양이온 성분과의 이온 밸런스, 결합 형태를 직접적으로 예측할 수 없었지만 Kang *et al.* (2008)의 지하철 내 개별입자 분석 연구에서와 같이 NO₃⁻ 이온이 NH₄⁺, Na⁺, Ca²⁺ 등의 양이온 성분과 결합된 형태로 질산염 입자가 존재하는 것으로 추정된다.

한편 네 번째 오염원의 경우 SO₄²⁻ 이온과 함께 Cl 이온의 기여도가 0.5 이상으로 비교적 큰 수치로 확인되었으며 이를 염소 및 2차 황산염 관련(Cl-factor mixed with secondary sulfate) 오염원으로 분류하였다. 질산염(NO₃⁻)과 황산염(SO₄²⁻)은 2차 생성 분진으로 분류되며 연료의 고온 연소과정에 의해 생성되는 SO_x, NO_x가 입자화 전환과정을 거쳐 미세입자 형태로 존재 한다(Khoder, 2002; Wilson *et al.*, 2002). 본 연구에서 확인된 2차 분진은 외기 중 차량을 포함한 화석 연료의 연소산물로 판단되며, 환기장치를 통한 외기 유입 시 승강장으로 유입된 후 전동차 문 개폐 시 전동차 내부로 유입된 것으로 판단된다. 네 번째 오염에서 Cl-factor와 황산염이 분류되지 않아 전동차 내에서 구체적으로 2차 분진만(질산염+황산염)의 기여도를 산출할 수 없었지만 16.2% (8.9 µg/m³)~25.3% (13.9 µg/m³)의 기여도를 보이는 것으로 추정된다. 이는 승강장 내 PSD(platform screen door) 설치 유무에 따른 PM₁₀ 오염원 비교 연구에서 나타난 이차분진의 기여도 14.8%, 29.9%와 유사한 기여도 값을 보이는 것으로 확인되었다(Lee *et al.*, 2010). 반면 Cl의 경우 실내에서 염소계 세제 사용 및 의류의 드라이클리닝

후 실내 공간에 잔류하는 것으로 확인되었으며 실내 거주 공간 및 개인의 미세먼지 노출에 대한 기여도는 각각 19.1%, 8.0%로 나타났다(Zhao *et al.*, 2006). 본 연구에서 분류된 Cl-factor는 9.1% (5 µg/m³) 이하의 이는 차량 운행 전/후 객실 청소 및 차량 운행 중 승객들의 의류 등으로부터 발생하는 것으로 추정되며 향후 전동차 등 실내 공간에서 Cl-factor에 대한 추가적인 연구가 요구되는 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 지하철 전동차 객실 내부의 미세먼지 특성을 파악하기 위해 지하철 7호선 전동차 객실을 대상으로 2009년 봄철과 2010년 봄, 여름, 가을, 겨울철, 혼잡시간대 및 비혼잡 시간대로 구분하여 PM₁₀ 농도를 측정하였으며, 측정된 시료에 대한 성분 분석을 통해 그 화학적 특징을 분석하였다. 또한 분석이 완료된 시료를 PMF를 적용하여 전동차 객실 내부 미세먼지 주요 오염원을 확인하였다.

연구 결과에 의하면 계절별 전동차 객실에서 측정된 PM₁₀ 농도는 겨울철에 농도가 가장 높게 나타났으며 혼잡, 비혼잡 시 152.8 µg/m³, 90.2 µg/m³로 각각 나타났다. 겨울철의 경우 낮은 환기율이 전동차 내 PM₁₀ 농도에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 혼잡 시간대에 측정된 PM₁₀ 농도는 비혼잡 시간대에 비해 평균 30% 정도 더 높은 수준을 보이고 있음을 확인할 수 있었다.

성분분석 결과 측정된 미세먼지 중 무기원소 함유 비율이 평균 52.5%, 음이온 함유 비율이 평균 10.2%, 그 외 양이온, 유기 및 무기 탄소 등 분석되지 못한 성분에 대한 비율이 37.3%를 차지하는 것으로 확인되었으며 분석 원소 중 철(Fe)성분이 가장 큰 비율로 검출되었는데 PM₁₀ 농도에 대해 평균 10~70% 범위의 높은 분율을 보이는 것으로 확인되었다. 또한 Fe 은 Mn (r=0.97), Ti (r=0.91), Cr (r=0.88), Ni (r=0.89), Cu (r=0.88)와 통계적으로 유의하게 (p<0.01) 높은 상관성을 보이며, 이는 철도 관련 오염원의 지표 원소로서 구분되어지는 것으로 판단된다. 이들 원소에 대한 세부 정보는 향후 미세먼지 오염원 확인 및 기여도의 정량적 평가 시 활용되어질 수 있을 것이라 사료된다.

수용모델링 결과에 의하면 지하철 전동차 객실에서 PM₁₀의 주요 오염원은 토양 및 도로비산오염원(soil and road dust), 철도 관련 오염원(railroad), 이차분진 중 질산염관련오염원(secondary nitrate), 염소 및 2차 황산염 관련 오염원(Cl-factor mixed with secondary sulfate)의 4가지 오염원으로 분류하였으며 기여도는 각각 27.2%, 47.6%, 16.2%, 9.1%로 확인되었다. 가장 큰 기여율을 보이고 있는 Railroad 오염원의 경우 전동차의 운행 시 열차 레일의 마모, 브레이크 마모, 전력 공급선 및 건인선의 마모로부터 주로 발생되는 것으로, 전동차 내 상부 환기구에서 급기 시 터널로부터 유입되어 영향을 미치는 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참고 문헌

- Adams, H.S., M.J. Nieuwenhuijsen, R.N. Colvile, M.A. McMullen, and P. Khandelwal (2001) Fine particle (PM_{2.5}) personal exposure levels in transport micro-environments, London, UK. *The Science of the Total Environment*, 279(1-3), 29-44.
- Brainš, M., L. Rezacova, and M. Domasova (2005) The effect of outdoor air and indoor human activity on mass concentrations of PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ in a classroom, *Environ. Res.*, 99, 143.
- Brainš, M. (2006) The contribution of ambient sources to particulate pollution in spaces and trains of the Prague underground transport system, *Atmospheric Environment*, 40, 348-356.
- Bukowiecki, N., R. Gehrig, M. Hill, P. Lienemann, C.N. Zwicky, B. Buchmann, E. Weingartner, and U. Baltensperger (2007) Iron, manganese and copper emitted by cargo and passenger trains in Zurich (Switzerland): Size-segregated mass concentrations in ambient air, *Atmospheric Environment*, 41, 878-889.
- Campbell, S.W., M.C. Evans, and N.D. Poor (2002) Predictions of size-resolved aerosol concentrations of ammonium, chloride and nitrate at a bay side site using EQUISOLV II, *Atmospheric Environment*, 36(27), 4299-4307.
- Chan, L.Y., W.L. Lau, S.C. Lee, and C.Y. Chan (2002) Commuter exposure to particulate matter in public transportation modes in Hong Kong, *Atmospheric Environment*, 36, 3363-3373.
- Chillrud, S.N., D. Epstein, J.M. Ross, S.N. Sax, D. Pederson, J.D. Spengler, and P.L. Kinney (2004) Elevated airborne exposures of teenagers to manganese, chromium, and iron from steel dust and New York City's subway system, *Environmental Science and Technology*, 38, 732-737.
- Fromme, H., D. Twardella, S. Dietrich, D. Heitmann, R. Schierl, B. Liebl, and H. Ruden (2007) Particulate matter in the indoor air of classrooms-exploratory results from Munich and surrounding area, *Atmospheric Environment*, 41, 854-866.
- Funasaki, K., M. Sakai, M. Shinaya, T. Miyazaki, T. Kamiura, S. Kaneco, K. Ohta, and T. Fujita (2003) Size distributions and characteristics of atmospheric inorganic particles by regional comparative study in urban Osaka, Japan, *Atmospheric Environment*, 37, 4597-4650.
- Gehrig, R., M. Hill, P. Lienemann, C.N. Zwicky, N. Bukowiecki, E. Weingartner, U. Baltensperger, and B. Buchmann (2007) Contribution of railway traffic to local PM₁₀ concentrations in Switzerland, *Atmospheric Environment*, 41(5), 923-933.
- Han, J.S., K.J. Moon, S.J. Lee, Y.J. Kim, S.Y. Ryu, S.S. Cliff, and S.M. Yi (2006) Size-resolved source apportionment of ambient particles by positive matrix factorization at Gosan background site in East Asia, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 211-223.
- Hwang, I.J., T.O. 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.
- Johansson, C. and P.A. Johansson (2003) Particulate matter in the underground of Stockholm, *Atmospheric Environment*, 37, 3-9.
- Kang, S.N., H.J. Hwang, Y.M. Park, H.K. Kim, and C.U. Roh (2008) Chemical compositions of subway particles in Seoul, Korea determined by a quantitative single particle analysis, *Environmental Science and Technology*, 42, 9051-9057.
- Karlsson, H.L., L. Nilsson, and L. Moller (2005) Subway particles are more genotoxic than street particles and

- induce oxidative stress in cultured human lung cells, *Chemical Research in Toxicology*, 18, 19-23.
- Khoder, M.I. (2002) Atmospheric conversion of sulfur dioxide to particulate sulfate and nitrogen nitric acid in an urban area, *Chemosphere*, 49, 675-684.
- 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 and Waste Manage. Assoc.*, 55, 1190-1199.
- Kim, E., T.V. Larson, P.K. Hopke, C. Slaughter, L.E. Sheppard, and C. Claiborn (2003) Source identification of PM_{2.5} in an arid Northwest U.S. City by positive matrix factorization, *Atmospheric Research*, 66, 291-305.
- Kim, J.K. and N.W. Paik (2004) Characteristics on airborne particle in subway of Seoul city, Korea *J. of Env. Health.*, 30(2), 154-160.
- Kim, K.Y., J.B. Park, C.N. Kim, and K.J. Lee (2006) Assessment of airborne bacteria and particulate matters distributed in Seoul metropolitan subway stations, *Kor. J. of Env. Health.*, 32(4), 254-261.
- 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. Kim, S.D. Kim, and D.S. Kim (2010) A comparative study on PM₁₀ source contribution in a Seoul metropolitan subway station before/after installing platform screen doors, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 26(5), 543-553.
- Li, T.T., Y.H. Bai, Z.R. Liu, J.F. Liu, G.S. Zhang, and J.L. Li (2006) Air quality in passenger cars of the ground railway transit system Beijing, China, *Science of Total Environment*, 367, 89-95.
- Nieuwenhuisen, M.J., J.E. Gomez-Perales, and R.N. Colville (2007) Levels of particulate air pollution, its elemental composition, determinants and health effects in metro systems, *Atmospheric Environment*, 41, 7995-8006.
- 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, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 25(2), 108-121.
- 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.
- Park, D.S., Y.M. Cho, C.K. Lee, and B.H. Park (2004) Study on the quality of air inside tunnel, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38, 363-364.
- Park, D.U. and K.C. Ha (2008) Characteristics of PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂ and CO monitored in interiors and platforms of subway train in Seoul, Korea, *Environment International*, 34(5), 629-634.
- Paterson, K.G., J.L. Sagady, D.L. Hooper, S.T. Bertman, M.A. Carroll, and P.B. Shepson (1999) Analysis of air quality data using positive matrix factorization, *Environ. Sci. & Technol.*, 33(4), 635-641.
- Polissar, A.V., P.K. Hopke, P. Paatero, W.C. Malm, and J.F. Sisler (1998) Atmospheric aerosol over Alaska, 2. Elemental composition and sources, *J. of Geophysical Research*, 103(D15), 19045-19057.
- Pope, C.A., D.V. Bates, and M.E. Raizenne (1995) Health effects of particulate air pollution: time for reassessment *Environmental Health Perspectives*, 103, 472-480.
- Seaton, A., J. Cherrie, M. Dennekamp, K. Donaldson, J.F. Hurley, and C.L. Tran (2005) The London underground: dust and hazards to health, *Occupational and Environmental Medicine*, 62, 355-362.
- Seoul (2009) <http://stat.seoul.go.kr>
- Seoul Metropolitan Rapid Transit Corporation (2010). http://www.smrt.co.kr/Intro/General/General_state.jsp
- http://www.smrt.co.kr/News/Library/Library_usable_view.jsp
- Sitzmann, B., M. Kendall, J. Watt, and I. Williams (1999) Characterisation of airborne particles in London by commuter-controlled scanning electron microscopy, *Science of the Total Environment*, 241(1-3), 63-73.
- 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.
- Wilson, W.E., J.C. Chow, C. Claiborn, W. Fusheng, J. Engelbrecht, and J.G. Watson (2002) Monitoring of particulate matter outdoors, *Chemosphere*, 49, 1009-1043.
- Zhao, W., P.K. Hopke, G. Noris, R. Williams, and P. Paatero (2006) Source apportionment and analysis on ambient and personal exposure samples with a combined receptor model and adaptive blank estimation strategy, *Atmospheric Environment*, 40, 3788-3801.