J. Korean Soc. Environ. Eng., 38(8), 459~467, 2016
Original Paper
http://dx.doi.org/10.4491/KSEE.2016.38.8.459
ISSN 1225-5025, e-ISSN 2383-7810

기기 중성자방사화 분석을 이용한 대전 지하철 객차 내 PM10과 미량성분의 특성

PM10 and Associated Trace Elements in the Subway Cabin of Daejeon by Instrumental Neutron Activation Analysis

정진희 · 임종명* · 이진홍†
Jin Hee Jeong · Jong Myoung Lim* · Jin-Hong Lee†

충남대학교 환경공학과 · *한국원자력연구원 환경방사능평가팀
Department of Environmental Engineering, Chungnam National University,
**Environmental Radioactivity Assessment Team, Korea Atomic Energy Research Institute*

(Received May 12, 2016; Revised July 12, 2016; Accepted August 1, 2016)

Abstract : In order to assess the pollution status and distribution characteristics of PM and PM-bound species, PM10 samples were collected using mini-volume air sampler at the subway cabin in Daejeon city. Measurements of about 24 elements including toxic metals (e.g., As, Cr, Mn, V, Zn) in PM10 were made by instrumental neutron activation analysis and X-ray fluorescence. The average PM10 concentration was 59.3 ± 14.5 μg/m^3 in the subway cabin with a range of 42.2 to 97.4 μg/m^3, while the associated elemental concentrations were varied in the range of 10^{-3} to 10^5 ng/m^3. It was found that the concentration of Fe (12.5 μg/m^3) was substantially higher than any other element. The Fe concentration was apportioned by about 20% of the PM10 concentration. The results of factor analysis indicate that there are no more than six sources in the cabin (e.g., brake-nonferrous metal particle, resuspended rail dust, fuel combustion, vehicle exhaust, black carbon, Cr-related).
Key Words : *PM10, Trace Elements, Subway Cabin, Indoor Air Quality, Instrumental Neutron Activation Analysis*

요약 : 본 연구는 기기중성자방사화분석법을 이용하여 다중이용시설 중 지하철 객차 내 실내공기 중 미세먼지(PM10)의 미량원소 분포특성과 실내공기질을 평가하고, 향후 실내공기질의 효율적인 제어를 위한 객차 내 PM10의 오염원을 평가하고자 하였다. 대전광역시에서 운행 중인 지하철 객차 내에서 채취한 PM10의 평균농도는 59.3 ± 14.5 μg/m^{3}이었고, 지하철 객차 내 PM10 중 24종의 원소성분을 정량분석한 결과, 농도는 10^{-3}~10^5 ng/m^3 범위에 걸쳐 넓게 분포하였으며, Fe (12.5 μg/m^3)의 농도가 특히 높았다. 이는 지하철 브레이크 시스템과 철로 및 차륜 마찰과 같은 지하철 운행에 의하여 Fe가 상당히 부유되기 때문인 것으로 판단된다. 분석된 미량원소 농도를 바탕으로 오염원을 평가한 결과, brake-nonferrous metal particle, resuspended rail dust, fuel combustion, vehicle exhaust, black carbon, Cr-related가 주요 오염원인 것으로 나타났다.
주제어 : 미세먼지, 미량원소, 지하철 객차, 실내공기질, 기기 중성자방사화분석

1. 서 론

현대인의 대부분은 도시에서 삶을 영위하고 있고, 일반적인 도시인의 경우 1일 24시간 중 85% 이상을 학교나 사무실, 공공건물, 교통수단 등 다양한 실내공간에서 보내고 있다.[1] 그러므로 도시인이 오염된 실내공기에 노출되는 빈도는 매우 높고, 이로 인해 건강상 위해를 입을 가능성 또한 매우 크다. 우리나라도 급속한 도시화를 이루며 다중이용시설과 공동주택 등의 보급 확대로 실내거주 및 실내활동이 증가하고 있다. 특히 어린이나 노약자와 같은 민감계층의 이용시설 수가 '09년 대비 5년 만에 190.7%로 대폭 증가하였으며, 환경성 질환(알레르기성 비염, 아토피, 천식 포함)으로 인한 연간 진료비가 3,500억 원에 달하는 것으로 추정된다.[2] 그러나 대부분의 대기환경을 평가하는 국내외 연구들은 외부 환경대기(ambient air)를 중심으로 이루어져 왔으며 실내공기질에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다.

실내공기는 외부대기의 영향은 물론, 건물이나 건축자재, 혹은 주방 및 난방연료 사용, 흡연 등의 실내활동으로부터 배출되는 물질이 축적되어 오염이 심화된다.[3~5] 실내외 오염원으로부터 배출된 오염물질은 한정된 실내공간에서 지속적으로 순환하며 실내공기질을 악화시킬 뿐만 아니라, 에너지 효율을 위한 건축물 설계의 기밀화로 공공 보건학적 중요성이 커지고 있다.[6] 미국의 경우, 청정대기법(Clean Air Act)에서 설정한 국가대기환경기준(National Ambient Air Quality Standard)의 일부 항목을 실내공기에도 적용하여, 호흡성 입자상 물질(respirable particulate matter, PM10), 이산화질소, 라돈, 오존을 관리하고, 학교와 가정, 사무실, 대형건물 등에서의 환경담배연기, 생물학적 제제(꽃가루, 곰팡이 등), 폼알데하이드, 살충제, 석면, 납 등을 관심대상으로 두고 있다. 우리나라도 '다중이용시설 등의 실내공기질관리법'에 의거하여 5종의 유지기준(PM10, 이산화탄소, 폼알데하이드, 총부유세균, 일산화탄소)과 5종의 권고기준(이산화질소, 라돈, 총 휘발성유기화합물, 석면, 오존)을 규

† Corresponding author E-mail: jinlee@cnu.ac.kr Tel: 042-823-7546 Fax: 042-822-5610

정하였으며, 동 법령을 개정(2016년 3월)함으로써 부처 별로 상이하던 실내공기오염 관리 체계를 일원화하였다.

여러 가지 목적의 실내공간 중에서도 지하환경의 공기는 일반 실내공기와는 달리 자연환기가 거의 불가능하다. 특히, 지하철 공간에서는 지하철도 운행에서 기인한 피스톤의 영향 때문에 끊임없이 오염물질들이 재비산되는 특성이 있어, 실내공기질이 일반 승객뿐만 아니라 근무자들의 건강에 미치는 영향 또한 매우 크다.[7,8] 한편, 실내공기오염물질 중에서도 입자상 오염물질은 동일한 질량의 입자인 경우 입경이 감소할수록 호흡기 계통에 깊숙이 침투할 수 있고, 입경에 반비례하여 표면적이 급증하므로 독성금속 등의 흡착이 용이해진다. 또한 호흡성 입자상 물질(PM10)은 다양한 오염원에서 배출된 독성 미량원소들(As, Cd, Cr, Cu, Mn, Pb, Se, Zn)과 동반 작용하여 인간의 호흡기 계통에 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다.[9~11]

지하철은 교통체증이 없고 이용이 편리한 대중교통 수단으로, 러시아워(rush hour)의 인구밀집도가 매우 높기 때문에 지하철 실내공기질에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔다. Kim[12]의 연구결과에 의하면, 서울 지하철 승강장 및 대합실에서 측정된 입자상 오염물질의 농도는 공기역학적 직경 3.3~4.7 μm 범위에서 가장 높았으며, 이는 마찰과 같은 기계적 생성 기작이 중요하기 때문인 것으로 추정할 수 있다. 지하철 역사에서 입자상 물질은 대부분 금속 표면이 마모되면서 발생되어 비정형적이고 날카로우며 모난 형태를 나타내므로[13,14] 인체의 흡입과정에서 영향이 더욱 커진다. 특히 Fe는 일반 대기 중에서도 흔히 발견되는 미량성분으로, 외부 환경대기 중에는 약 1~2% 수준으로 존재하는 것과 달리, 지하철 입자 중에서는 약 40% 정도를 차지하는 것으로 평가되고 있으며, 주로 hematite (Fe_2O_3)와 magnetite (Fe_3O_4) 형태로 존재한다.[15,16] 또한 철염입자(steel dust)는 대기 중 Fe, Mn, Cr의 농도를 부유시키는 주요 원인으로 지적되는데, 지하철 실내공기 중에는 철로와 차륜의 마찰, 브레이크 시스템, 용접 등의 활동으로 인하여 철염입자가 상당수 존재하게 된다. Chillrud[17]는 뉴욕시의 청소년이 지하철 실내공기를 통하여 흡입하게 되는 Fe, Mn, Cr의 수준이 일반 대기의 약 100배에 달할 수 있음을 보고하였으며, 이 3종의 미량성분은 지하철에서 호흡을 통하여 노출되는 가장 중요한 금속으로 평가되고 있다.

그러나 지하철 객차 내 PM10 질량농도는 승객 유동, 스크린도어 개폐, 열차 운행 등의 영향으로 인하여 농도가 급변할 수 있으므로 쾌적한 실내공기질을 유지하기 위해서는 실시간 농도 변화를 확인하고, 적절한 환기시스템을 가동하여야 한다. 또한, 지하철 실내공기질은 지하철 운행을 위하여 채택한 시스템(철로 및 차륜의 재질, 제동 방식, 운행빈도, 사용 연한, 공조시설 등)에 따라 달라질 수 있다. 따라서 인구의 밀집도가 높은 지하철 역사 내 지하공간의 실내공기오염이 인체에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 각 시설별로 실내공기질에 대한 정량적인 조사연구를 통한 물리화학적 특성 파악이 선행되어야 한다.

본 연구의 대상지역인 대전광역시 지하철은 2006년 3월 개통되어 일평균 약 100,000명 이상(2011년 10월 수송실적 기준)이 이용하고 있는 대표적인 대중교통수단으로써, 22.6 km 길이의 지하터널에 22개의 정거장을 갖춘 1호선이 현재 운행되고 있으며, 향후 2호선을 증설할 계획이다. 모든 승강장에 스크린도어를 설치하여 승객의 안전을 도모하고 열차의 운행/정차 시 발생되는 바람을 차단하며 객차로 유입되는 오염물질을 막을 수 있도록 설계되어 있다. 한편, 공조시설 운영과 터널 내 물청소 등의 적절한 관리가 수반되지 않을 경우, 터널 내 오염물질이 지속적으로 축적되고 객차 내부로 유입되는 양이 상대적으로 증가하여 지하철 객차 내에 고농도 오염물질이 축적될 수도 있다.

본 연구는 시료채취(중량법) 및 실시간 장비(광산란법)를 이용하여 대전광역시 지하철 객차 내에서 호흡성 입자상 오염물질로 알려져 있는 PM10의 질량농도 준위를 파악하였다. 그리고 As, Cr, Mn, V, Zn 등과 같은 독성금속을 포함한 24종의 미량성분을 기기 중성자방사화분석법(instrumental neutron activation analysis, INAA)과 파장분산형 X선 형광분석법(wavelength dispersion X-ray fluorescence spectrometry, WD-XRF)을 이용하여 정량분석하고 미량성분의 분포 특성을 확인하였다. 또한, 향후 실내공기질의 효율적인 관리를 위해 다변량 통계기법을 활용하여 지하철 객차 내 실내공기 오염원을 추정하였다.

2. 연구방법

2.1. PM10 시료채취

대전광역시 지하철 객차 내 PM10 시료를 채취하기 위해 운행 중인 객차 내에 저용량 공기채취기(MiniVol, Airmetrics, USA)를 설치하였다. 대전광역시 지하철은 기관차량을 포함하여 총 4칸의 차량이 연결된 구조로, 설치지점은 승객들의 호흡 고도를 고려하여 승객의 유동량이 많은 2번째 차량의 객차좌석 위로 선정하였다. PM10 시료채취는 2011년 6월부터 9월까지의 기간 중 총 28일간 2차례에 걸쳐 집중적으로 실시하였으며(1차: 2011년 6월 24일~2011년 7월 10일, 2차: 2011년 8월 16일~2011년 9월 6월, 총 28시료), 1개 시료의 채취시간은 열차 운행 시작부터 종료까지의 1일 운행시간(오전 6시~오후 11시, 총 17시간)으로 하였다. 시료채취 시 유속은 5 L/min으로 고정하였고 유속의 보정과 교정을 위하여 Gillian Gilibrator 2 Calibration System (Sensidyne, LP)을 사용하였다. PM10은 기계적 강도가 강하고 미량성분에 대해 화학적으로 매우 작은 바탕농도를 갖고 있어 미량성분의 분석에 효율적인 pore 형태의 polycarbonate membrane filter (®Nuclepore, 0.4 μm pore size, 47 mm diameter, Whatman)를 사용하여 채취하였다. 채취한 PM10 시료는 항온(25℃), 항습 상태(50%)의 데시케이터에서 1일간 보관

한 후, 전기적 하전을 중화시키기 위하여 ^{210}Po 선원을 넣어 둔 전자식 저울(XPE26, readability: 1 μg, Mettler-Tolledo International Inc.)에서 칭량하고, 밀봉하여 시료분석 전까지 데시케이터에 보관하였다.

한편, 여지 위에 시료를 포집하여 무게를 칭량하는 중량법은 신뢰할 수 있는 공정시험법이자, 구성성분 분석용 시료를 확보할 수 있다는 점에서 매우 유용하다. 그러나, 유효한 시료를 채취하려면 24시간 혹은 그 이상이 소요되고, 정기적인 여지 교체과정이 필요하므로 실시간 농도의 확인이 불가능하다.[18] 따라서 본 연구에서는 광산란(light scattering) 방식의 실시간 측정장비를 이용하였으며, 이 장비는 입자상 물질에 의한 산란광의 양이 질량농도에 비례하는 원리를 이용하여 대기 중 PM10의 순간농도를 포착할 수 있다. 실시간 분석장비(Microdust PM monitor, Casella, USA)는 저용량 공기채취기와 동일한 지점에 설치하여 운용하였고, 측정시간은 시료 1개당 누적시간과 같다. 측정에 앞서 최적화된 절차에 따라 base-level (zero span)을 확인하고, 보증된 표준시료를 이용하여 교정한 후 사용하였다. 그리고 결과의 신뢰성 향상을 위하여 자동 수집된(logging interval: 10 sec) PM10 자료 중 zero stability (2 μg/m^3) 미만의 측정값은 제외하였다.

2.2. 미량원소 분석

INAA는 동시 다원소 분석이 가능하고 일반 금속시험법에서 수반되는 전처리 과정(용해, 농축, 희석)이 필요하지 않는 비파괴분석법으로, Si, P, S, Sn, Tl, Pb 또는 경원소의 정량에는 제한적이지만, Al, As, Co, Cr, Mn, Fe, Sc, Se, V, Zn, halogen 및 rare earths와 같은 원소에 대해 우수한 분석감도와 낮은 검출한계를 갖는 분석기법이다. 또한 매질에 따른 영향이 거의 없어 다양한 고체상 환경시료 분석에 광범위한 적용능력을 가지며,[19~21] 본 연구와 같이 지하철 실내공간에서 철도차량의 운행으로 발생되는 Ca, Fe-enriched PM10 분석에도 적합하다. INAA는 시료의 준비와 조사, 냉각, 계측의 과정에 따라 이루어지며 분석시료의 방사화를 위하여 한국원자력연구원의 연구용원자로(HANARO)의 중성자 조사시설인 기송관(PTS, Φ_{th} = 2.95 × 10^{13} n/cm^2·sec) 조사장치를 이용하였다. 모든 시료는 조사시간 동안의 중성자속 차이 등에 영향을 받지 않도록 동일한 기하학적 조건에서 조사함으로써 분석오차를 최소화하고, 정확한 중성자속과 변동을 측정하기 위하여 Al-Au activation wire (Al 99.99%)를 시료와 함께 조사하였다. 방사능 계측에 사용한 고순도 게르마늄 반도체 검출기(EG&G ORTECT)는 25% relative efficiency, ^{60}Co의 1332 keV에서 1.85 keV FWHM, peak to Compton ratio가 45 : 1이며 감마선의 측정 및 분석, 에너지와 검출효율 검정을 위하여 Gamma Vision (EG & G ORTEC) 프로그램을 사용하였다. 통계적 오차를 줄이기 위하여 계측시간을 알맞게 조절하였으며, 불감시간은 5% 이하로 유지하였다.[22]

한편, 대기 중 입자상 오염물질의 주요성분으로 존재하는 S와 Si는 INAA로 정량이 되지 않아 보완적인 분석법으로써 WD-XRF (ZSX100e, Rigaku, Japan)를 사용하였다. 대기압에서 진공상태로 전환되는 과정에서 입자상 오염물질의 재비산에 의한 측정오차를 배제하기 위하여 polyester 재질의 Mylar film (thin-film, polyester, 7.6 cm × 91.4 m, Chemplex)을 조사경 전단부에 고정함으로써 기기의 오염을 억제하였고, 시료와 동일한 매질(backing material: Nuclepore® polycarbonate aerosol membranes)에 미량성분이 고르게 도포된 ring mount 형태의 인증표준물질인 XRF Calibration Standards (Micromatter™, Canada)을 이용하여 원소농도와 신호감도를 교정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 분석 정도관리

INAA 분석결과의 정도관리를 위하여 2종의 인증표준물질을 사용하였다. 하나는 대기 중 농도와 가장 유사한 인증표준물질로 평가받고 있는 NIST (National Institute of Standards and Technology, USA) SRM (Standard Reference Material) 2783 (air particulate on filter media)이고, 다른 하나는 실내공기질 평가에 유효한 NIST SRM 2584 (trace elements in indoor dust)로 시료와 동일한 분석조건에 따라 분석하였다. 그 결과, NIST SRM 2783의 경우 상대오차가 As (-14.1%)과 Sc (10.9%)을 제외하면 모두 10%보다 작았고, 특히 Ca, Co, K, Mg, Mn, Na, Sb, Sm, Ti, V, Z는 상대오차가 5% 미만으로 매우 높은 정확도를 보였다. 또한 상대표준편차가 Ca, Co, Cu, Mg, Sb, Zn는 10%를 초과하였지만 Al, As, Ce, K, Mn, Na, Sc, Ti, V은 5% 이하의 분석값을 보였다. NIST SRM 2584의 경우, As, Ba, Ca, Cr, Fe, Mg, Mn, Na는 5% 미만의 상대오차와 상대표준편차를, 그리고 나머지 성분은 모두 10% 미만의 상대오차와 상대표준편차를 갖는 것으로 나타나 높은 분석 정확도와 정밀도를 보였다(Table 1).

WD-XRF는 원소별로 특정한 에너지를 방출하여 일련의 스펙트럼을 얻음으로써 정성적인 분석이 가능하며, 성분의 정량분석을 위하여 인증표준물질을 이용한 표준 검량선(calibration curve)을 필요로 한다. 본 연구에서는 대기 중 PM10의 미량성분 정량분석을 위하여 전술한 바와 같이 시료와 동일한 매질(backing material: Nuclepore® polycarbonate aerosol membranes)에 미량성분이 고르게 도포된 ring mount 형태의 인증표준물질인 XRF Calibration Standards (Micrometer™, Canada)을 사용하였다. 그리고 예비 실험을 통하여 도출된 최적의 분석조건으로 인증표준물질을 분석한 결과를 이용하여 검량선을 작성하였는데, S와 Si의 결정계수(R^2)가 0.99 이상으로 매우 양호한 결과를 보였다.

Table 1. Analytical results of NIST SRM 2783 (air particulate on filter media) and 2584 (trace elements in indoor dust) by INAA

Item	NIST SRM 2783				NIST SRM 2584			
	Certified value	Experimental value	RE	RSD	Certified value	Experimental value	RE	RSD
	(ng/filter)				(mg/kg)			
	Mean ± Unc. (2s)[a]	Mean ± SD (1s)	(%)		Mean ± Unc. (2s)[a]	Mean ± SD (1s)	(%)	
Al	23210 ± 530	21793 ± 614	-6.1	2.8	23200 ± 600	23127 ± 2085	-0.3	9
As	11.8 ± 1.2	10.1 ± 0.51	-14.1	5	17.4 ± 4.2	16.9 ± 0.8	-3.1	4.9
Ba	335 ± 50	363 ± 20.7	8.2	5.7	1300	1332 ± 25	2.5	1.9
Ca	13200 ± 1700	13169 ± 1342	-0.2	10.2	63300 ± 3000	66193 ± 1355	4.6	2
Co	7.7 ± 1.2	7.51 ± 0.96	-2.5	12.8				
Cr	135 ± 25	148 ± 14.11	9.8	9.5	135 ± 9.1	129 ± 4.9	-4.2	3.8
Cu	404 ± 42	365 ± 47.0	-9.7	12.9				
Fe	26500 ± 1600	28867 ± 2041	8.9	7.1	16400 ± 1200	16500 ± 300	0.6	1.8
K	5280 ± 520	5213 ± 162	-1.3	3.1	9500 ± 1400	9107 ± 827	-4.1	9.1
Mg	8620 ± 520	8593 ± 1067	-0.3	12.4	15900 ± 300	16447 ± 289	3.4	1.8
Mn	320 ± 12	329 ± 0.49	2.8	0.1	370	356 ± 14	-3.9	3.8
Na	1860 ± 100	1840 ± 21.9	-1.1	1.2	27700 ± 1200	27613 ± 472	-0.3	1.7
Sb	71.8 ± 2.6	75 ± 8.11	4.1	10.8	14	13 ± 0.3	-6	2.3
Sc	3.54 ± 0.28	3.9 ± 0.19	10.9	4.9	4	3.7 ± 0.4	-8.3	9.9
Th	3.23 ± 0.59	3.5 ± 0.33	6.8	9.7	4	3.8 ± 0.2	-5.4	5.4
Ti	1490 ± 240	1463 ± 58.7	-1.8	4	4200 ± 300	4303 ± 341	2.5	7.9
V	48.5 ± 6	49 ± 1.56	1.8	3.2	34	37 ± 0.9	7.5	2.5
Zn	1790 ± 130	1731 ± 230	-3.3	13.3	2580 ± 150	2357 ± 150	-8.7	6.4

[a]Expanded uncertainty with the coverage factor of two (approximately 95% confidence)

3.2. 지하철 객차 내 PM10 농도특성

대전광역시의 운행 중인 지하철 객차 내에서 연구기간 동안 채취한 PM10의 산술평균농도는 59.3 ± 14.5 μg/m^{3}로, 전체 측정값은 최저 42.2 μg/m^{3}부터 최고 97.4 μg/m^3 사이에 분포하였다. 빈도분석 결과, 40~70 μg/m^{3}의 농도범위에 전체 측정값의 85.7%가 집중되어 있었고 70 μg/m^3 이상인 경우가 4회(14.3%) 발생하였다. '실내공기질관리법'이 개정됨에 따라 지하철('도시철도법' 제2조제2호에서 지정하는 도시철도차량)도 적용대상에 포함되었는데, 본 연구기간 동안 측정된 지하철 객차 내 PM10 농도는 '실내공기질관리법'의 유지기준(150 μg/m^3)을 초과하지는 않았다. 대중교통의 특성상 승객 수는 주중의 출퇴근 러시아워에 가장 밀집되고, 주말에는 이용객이 적은 경향이 있는데, 대전 지하철의 1일 운행 횟수는 주말(105회)보다 주중(112회)에 약 10%가 더 많다. PM10 농도를 주중과 주말로 구분하여 비교하면 주중의 경우 61.2 ± 13.5 μg/m^3 (47.0~97.4 μg/m^3), 주말은 54.4 ± 16.8 μg/m^3 (42.2~91.4 μg/m^3)로 주중에 상대적으로 높았고, 95% 신뢰수준에서 평균농도의 차이가 통계적으로 유의한 것(p = 0.04)으로 나타났다. 본 연구는 단기간이지만, 일반적으로 지하철 운행 빈도는 입자상 오염물질의 농도에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.[7,8,23)]

지하철의 입자상 오염물질의 농도수준은 지역마다 서로 상이한 특성을 보이는데, 이는 각 철로의 위치(지상/지하), 운영 시작 시기 및 운행정도, 난방장치, 환기시스템 및 스크린도어, 철로 세정작업 등의 영향을 받는다.[14)] 따라서 선행연구와 본 연구결과를 비교해 보면(Table 2), 서울은 노선 및 시간대[24)]와 유동량[25)]에 따라 차이가 있으나 국내 유지기준을 초과하는 사례가 관측되었다. 그리고 국내외 여러 지하철 객차에서 계절차가 뚜렷한 농도(겨울 > 여름)를 기록한 바 있다.[25~27)] Taipei 사례[7)]를 보면 객차 내 PM10 농도가 지하철 터널과 승강장을 통해 유입되는 고농도 입자상 물질의 영향을 받아 상승함을 확인할 수 있고, Los Angeles[28)]의 도시철도는 지상노선보다 지하노선에서, Barcelona[16)]에서는 기존노선이 신규노선보다 오염이 심한 것을 볼 수 있다. 본 연구결과는 대전 지하철(2006년 개통)의 객차 내 PM10 농도가 서울 1기 지하철(1~4호선, 1970~1985 개통) 농도의 1/2 정도 수준이고, 같은 계절(여름)의 2기 지하철(5~8호선, 1990~2001 개통)보다는 다소 양호한 수준임을 보여준다.

선행연구에 의하면 지하철 역사나 객차에서 연속 측정한 미세먼지의 실시간 농도는 지하철 운행이 시작되는 시점부터 급증하여 하루 중 변화가 크고, 운행이 종료되면 급감하는 경향을 보인다.[18,29)] 실시간 PM10 농도분석 장비를 이용하여 지하철 객차 내 PM10 농도를 관측한 결과, 변화 추이가 불규칙하고 변동 폭이 매우 커서, 순간 최대농도가 358 μg/m^3 수준까지 상승하는 것으로 나타났다(Fig. 1). 중량법으로 측정한 PM10 농도와 실시간 측정값으로 계산한 일평균 농도를 비교하면, 실시간 PM10은 순간농도를 10초 간격으로 수집하므로 측정값의 변동이 매우 심하고 일평균 농도

로 환산해도 중량법 PM10 보다 변화가 심한 것으로 나타났다(Fig. 2). 실시간 PM10의 농도가 중량법 측정결과보다 높은 경우, 순간농도의 최대값이 상대적으로 매우 높은 수치까지 상승하였고, 이러한 농도 차이는 지하철 운행 중 객차 내에 고농도 입자상 오염물질이 정체되어 있기 때문인 것으로 판단된다.

Table 2. PM10 measurements in subway systems

City/Country	Description	PM10 (μg/m^3)	Reference
Daejeon, Korea	Line #1 (weekday)	61.2 ± 13.5 (47.0~97.4)	This study (2011)
	Line #1 (weekend)	54.4.2 ± 16.8 (42.2~91.4)	
Seoul, Korea	Bundang	150 (AM), 196 (PM)	Kwon et al.[23]
	Gyeongbu	116 (AM), 125 (PM)	
	Gyeongin	117 (AM), 205 (PM)	
	Line #2	128 (AM), 189 (PM)	
	Line #3	179 (AM), 93 (PM)	
	Line #4	91 (AM), 119 (PM)	
	Line #7 (rush hour)	70.1 ± 24.4 (Spring)	Park et al.[24]
		63.4 ± 18.8 (Summer)	
		62.4 ± 18.5 (Fall)	
		152.8 ± 25.8 (Winter)	
	Line #7 (non-rush hour)	64.1 ± 13.0 (Spring)	
		85.1 ± 22.2 (Summer)	
		37.0 ± 8.6 (Fall)	
		90.2 ± 8.6 (Winter)	
Los Angeles, USA	Gold line (ground level)	16 (6-53)	Kam et al.[27]
	Red level (underground)	31 (14-107)	
Taipei, Taiwan	R1 (elevated/ground/ underground)	36 ± 19 (10-93)	Cheng et al.[7]
	R2 (underground)	53 ± 16 (26-97)	
	R3 (underground)	40 ± 12 (22-71)	
	R4 (underground)	35 ± 10 (19-65)	
Hong Kong, China	KCR (90% ground track)	60 ± 12 (41-89)	Chan et al.[34]
	MTR (underground)	44 ± 16 (23-85)	
	LRT (ground track only, low traffic flow)	41 ± 7 (30-57)	
Berlin, Germany	Underground	153 ± 22.0 (Summer)	Fromme et al.[25]
		141 ± 17.0 (Winter)	
Prague, Czech	Underground	82.3 (Summer)	Braniš[26]
		125.5 (Winter)	
Barcelona, Spain	L3 (old line)	79 (52-100)	Querol et al.[16]
	L5 (old line)	79 (77-87)	
	L9 (new line)	48 (36-54)	

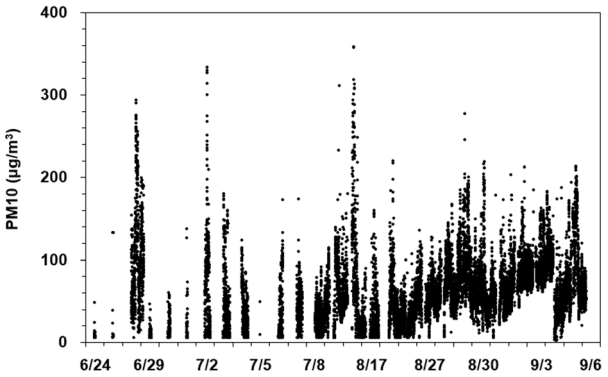

Fig. 1. Real time variation of PM10 concentration in the subway cabin of Daejeon, Korea.

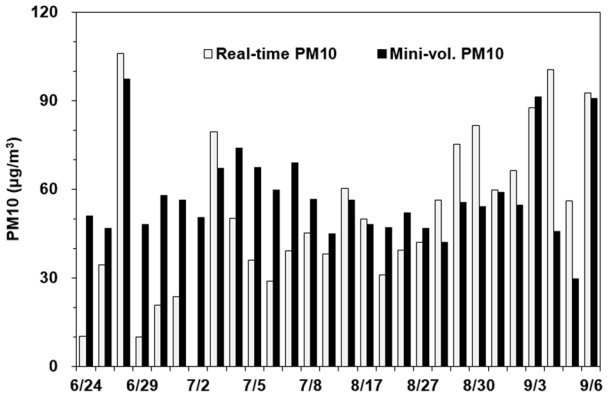

Fig. 2. Comparison of daily PM10 concentrations in the subway cabin using mini-volume air sampler and real-time measurement instrument.

3.3. 지하철 객차 내 미량성분의 분포특성

INAA와 WD-XRF를 이용하여 지하철 객차 내에서 채취한 PM10 중 미량성분 24종(Al, As, Ba, Br, Ca, Cl, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, I, K, La, Mg, Mn, Na, S, Sb, Sc, Si, Ti, V, Zn)을 정량 분석한 결과, 각 성분의 농도는 10^{-3}~10^{5} ng/m^3 범위로 매우 넓게 분포하였으며 Fe (12.5 μg/m^3)의 농도가 가장 높은 수준이었다(Table 3). 독성금속류 원소들의 산술평균농도는 각각 As가 1.90 ± 1.13 ng/m^3, Cr이 64.0 ± 7.90 ng/m^3, Mn이 157.2 ± 73.0 ng/m^3, V는 4.68 ± 3.64 ng/m^3, Zn이 132.6 ± 34.2 ng/m^{3}이었다. 지하철 객차 내 미량성분의 농도 특성을 평가하기 위하여 인근의 대전광역시 1, 2산업단지의 PM10 내 농도[30]와 비교하였다. 두 그룹의 농도비(Ratio = subway cabin/ambient air)의 평균을 나타낸 Fig. 3을 보면, 미량성분의 농도비는 대부분의 경우 객차 내 농도가 외부대기 중에서의 농도와 유사하다. 그러나 Ba, Br, Fe, Cr, Mn의 경우 농도비가 3.3~19.4로 객차 내 농도가 매우 높은 수준인 것으로 나타났다. 지하철 브레이크에서 발생되는 입자(flake)는 독특한 화학적 특성을 가지고, 사용하는 시스템(브레이크 패드의 재질과 조성, 제동 방식 등)에 따라 달라질 수 있다. 일반적으로 탄소성분(carbonaceous)이 높고 Ba이 크게 부유된 수준으로 나타나는데,[31] 본 연구지

Table 3. A statistical summary of elemental concentrations associated with PM10 in the subway cabin of Daejeon, Korea (unit: ng/m^3)

	Mean	Median	SD	CV (%)	Min	Max	N
Al	319.2	267.9	160.4	50.2	139.8	691.0	28
As	1.90	1.58	1.13	59.5	0.63	5.14	28
Ba	842.6	634.6	482.2	57.2	411.8	2124.5	28
Br	139.7	129.7	114.7	82.1	22.8	304.4	28
Ca	546.8	523.7	128.7	23.5	270.8	767.0	28
Cl	351.1	319.5	213.9	60.9	73.8	860.1	28
Co	0.71	0.72	0.15	21.7	0.41	1.07	28
Cr	64.0	63.1	7.9	12.3	52.9	84.7	28
Cs	1.29	1.30	0.23	18.1	0.85	1.70	24
Cu	276.8	214.2	143.9	52.0	136.4	581.5	28
Fe	12483.4	12379.7	2263.5	18.1	9045.3	17544.4	28
I	2.99	2.43	1.62	54.3	1.03	6.94	28
K	165.7	141.0	74.2	44.8	60.1	340.6	27
La	0.24	0.22	0.07	30.9	0.13	0.42	26
Mg	221.8	214.2	85.5	38.5	111.4	385.7	18
Mn	157.2	126.7	73.0	46.5	81.5	359.2	28
Na	175.3	153.7	91.6	52.3	65.4	376.1	26
S	1724.7	1618.0	1082.4	62.8	256.8	3586.9	27
Sb	1.52	1.49	0.79	51.8	0.26	3.52	28
Sc	0.02	0.02	0.01	46.2	0.00	0.05	28
Si	446.6	403.6	125.6	28.1	263.5	743.1	28
Ti	37.4	32.8	14.2	38.0	15.3	69.5	20
V	4.68	3.75	3.64	77.7	0.83	15.1	28
Zn	132.6	127.2	34.2	25.8	72.3	228.9	28

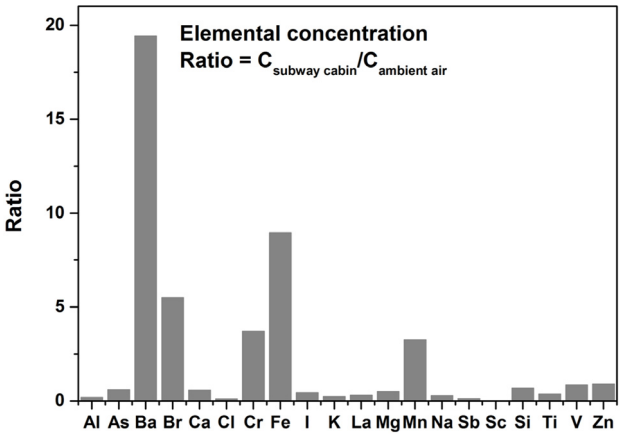

Fig. 3. Ratio of elemental concentration for the subway cabin and ambient air; The elemental concentration in ambient air were used from ref 30.

역에서도 객차 내 Ba 농도가 외부대기보다 20배 정도 높았다. Br은 이동오염원과 연관된 미량성분으로, 자동차 연비 향상을 위하여 첨가되는 원소이며, 농약 등을 사용하는 농촌 지역에서 높게 분포하는 원소이다.[32] 연구지역의 특성을 고려할 때 농업활동의 영향은 배제할 수 있으므로, 외부의 이동오염원으로부터 발생된 Br이 실내공간으로 유입되었으리라 추정된다. 그러나 지하철 실내공간에서 Br이 크게 부유된 선행사례는 찾기 어렵고, 상기 원인추정만으로는 객차 내 높은 Br 농도를 충분히 설명할 수 없으므로 본 연구 결과가 대전광역시 지하철의 독특한 특성을 반영한 것인지를 명확히 하려면 후속연구가 필요할 것으로 사료된다. Fe는 지하철 실내공간에서 높은 농도로 존재하는 대표적인 원소성분으로, 선행연구에 의하면 외부대기보다 7~300배 부유될 수 있다.[29] 본 연구에서는 산술평균이 12.5 ± 2.3 μg/m^{3}로 PM10 질량농도(59.3 ± 14.5 μg/m^3)의 약 20%를 차지하였다. 또한, 분석한 원소 중 Mn/Fe 비가 0.01로 나타나, 차륜과 철로에서 기인하는 입자가 객차 내로 유입되었음을 알 수 있다.[31] 즉, 대전 지하철 객차 내 실내공기 중 미량성분은 대부분 외부대기 중 농도와 비슷한 수준이나, 지하철 운행으로 배출되는 원소성분은 외부대기에 비하여 농도가 매우 높은 것으로 나타났다.

원소의 분포특성을 비교한 과거의 연구들을 보면, 주로 부화계수(enrichment factor, EF)를 사용하여 외부대기뿐만 아니라 실내공기 중 원소의 인위적 오염의 정도를 비교한 것을 볼 수 있다.[33,34] 부화계수는 Al, Fe, Si와 같이 대표적인 지각구성원소를 이용하여 대상물질들 간의 상대적인 농도비($EF=\{X/Al\}_{sample}/\{X/Al\}_{crust}$)를 계산하여 인위적인 오염 정도를 평가한다. 여기서 X는 비교의 중심이 되는 관심대상 원소성분의 농도를 의미하며, 본 연구에서는 Al을 이용하여 각각의 원소성분에 대한 부화계수를 평가하였다. Fig. 4는 그 비교결과를 보여주는데, 자연적인 지각구성비의 변동에 따른 불확도를 고려하였을 때, 부화계수 값이 10 혹은 100을 초과하는 경우, 해당 원소가 인위적 오염원의 영향을 받았다고 판단할 수 있다. 지하철 객차에서의 분석대상 원소 중에서 Ca, K, La, Mg, Na, Sc, Si, Ti는 EF가 10 미만이었고, 따라서 지각구성원소를 포함하는 이 원소들은 인위적 오염원의 영향을 무시할 수 있는 것으로 확인되었다. EF가 100을 초과하여 인위적 오염원의 영향을 받았을 것으로 판단되는 원소성분은 크기순으로 Cs (103), Fe (108), As (356), Ba (387), Zn (549), Cr (559), Cl (802), I (1669), Sb

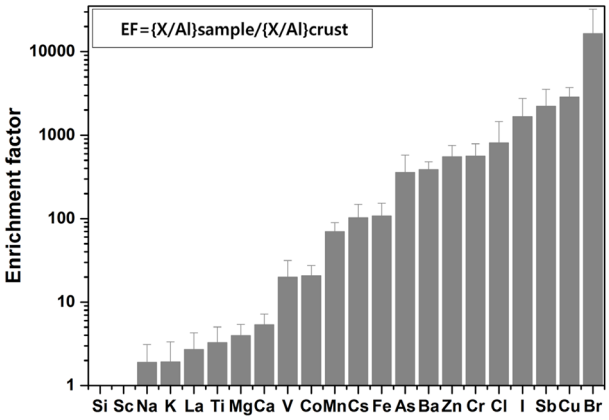

Fig. 4. Results of enrichment factor analysis of elemental concentration in the subway cabin.

(2212), Cu (2867), Br (16457)이었는데, 이중 Cs, Fe, Ba, Cr의 경우 외부대기보다 지하철 객차 실내공기가 인위적인 오염원의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

인자분석(factor analysis)은 주어진 자료 변수들의 상관성과 변동성을 이용해 통계적으로 유의한 주요 공통인자를 추출하는 다변량 통계기법의 하나이며,[35] 대기환경 분야에서는 주로 수용지점에서 측정된 입자의 화학성분 자료를 바탕으로 주요 오염원을 확인하는 목적으로 널리 이용되는 방법이다. 본 연구에서는 지하철 객차 내에서 측정된 원소성분들의 농도분포를 결정짓는 주요 발생원을 확인하기 위해 통계 프로그램 SPSS (version 22.0)를 이용하여 인자분석을 수행하였고, 그 결과 6개의 주요 공통인자가 추출되었다. 추출된 6개의 인자는 brake-nonferrous metal particle, resuspended rail dust, fuel combustion, vehicle exhaust, black carbon, Cr-related로, 이들은 총 분산의 80.2%를 설명하고 있다. 첫 번째 인자는 총 분산의 21.8%에 해당하였고 Al, Ba, Cu, Mn의 인자부하량이 높게 나타났는데, Ba과 Cu는 브레이크 마모로 발생되는 입자에서 관찰되고,[33,38] Mn은 지하철 철염입자에서 주요하게 나타나는 원소[19]이다. 객차 내 Al은 외부대기와 유사한 농도수준으로, 지하철 운행에 의하여 현저히 부유되는 원소는 아니지만, Ba (0.928), Cu (0.866), Mn (0.868)과 높은 상관성을 보이고 있어($p < 0.01$), 지하공간에 존재하는 Al이 지하철 운행으로 배출된 입자와 결합된 구조를 이루는 것으로 추정할 수 있다.[39] 따라서 첫 번째 인자는 brake-nonferrous metal particle로 판정하였다. 두 번째 인자는 Co (0.70), Sc (0.81), Si (0.78)와 같은 지각구성원소와 함께 Ca (0.71)과 Fe (0.70)이 높은 인자부하량을 보이는 것으로 확인되었다. 이는 철로 및 차륜의 마모 등의 기작으로 Fe가 부유될 뿐만 아니라, 철로의 구조물이 콘크리트 재질로 이루어져 Ca 인자부하량이 복합적으로 나타난 결과로, 지하철의 반복 운행에 의하여 재비산되는 입자상 오염물질로 판단되어 resuspended rail dust로 판정하였으며, 총 분산의 16.9%를 차지하였다. 대기 중 K은 지각에서 기인하는 자연발생적 오염 이외에도 다양한 인위적 오염원에서 발생하는데, 주로 지각구성물질, 화석연료의 연소, 그리고 생체(biomass) 소각에서 기인한다.[40~42] 또한 As과 Sb는 화석연료 사용이나 소각로 등의 연소 기작과 관련이 있어, 이를 종합하여 볼 때 세 번째 인자는 fuel combustion으로 판단할 수 있다. 네 번째 인자는 vehicle exhaust로 Br과 Zn는 연료 또는 윤활유 첨가제로 사용되어 배기가스와 함께 배출되는 원소성분으로 알려져 있고[32] 다섯 번째 인자는 black carbon (0.91) 이외의 원소성분은 인자부하량이 높지 않아 명료하게 black carbon으로 판정할 수 있다. 여섯 번째 인자의 경우 Cr과 La가 혼재된 Cr-related로 판단된다. Helsingki의 지하(underground-level)에 위치한 역사에서의 미세먼지(PM2.5) 중 Cr 농도가 지상(ground-level)보다 최대 60배 높게 측정된 바 있고,[29] 뉴욕시 지하철 역사에서의 실내공기에 장기간 노출될 경우 인체에 유입되는 고농도 Cr의 잠재적 위험성에 주목하였다.[17] 해당 인자의 지표원소가 불충분하여 명확한 결론을 내릴 수는 없으나, 여섯 번째 인자 역시 지하철 운행의 영향을 반영하는 것으로 추정해볼 수 있다. 즉, 총 여섯 인자 중 #1, #2, #6은 지하철 운행 등의 영향이, #3, #4, #5번 인자는 외부대기의 영향이 주요 원인인 것으로 판단된다.

Table 4. Result of factor analysis after varimax rotation

	Factor1	Factor2	Factor3	Factor4	Factor5	Factor6
Black carbon	0.08		0.10	0.01	0.91	
Al	0.93	0.15	0.06	0.12		0.08
As	0.22	0.40	0.64	0.14	0.42	
Ba	0.97	0.17		0.04	0.04	
Br		0.11		0.86		
Ca	0.26	0.71		0.36	0.14	
Cl	0.18			0.26		
Co	0.36	0.70		0.23		0.06
Cr		0.14		0.68	0.33	0.43
Cu	0.93	0.20	0.02	0.13	0.03	
Fe	0.24	0.70			0.25	0.09
I	0.43		0.52			0.25
K		0.03	0.63	0.50	0.10	0.39
La		0.15		0.06		0.87
Mn	0.93	0.13	0.00		0.11	0.12
Na	0.31		0.17	0.57		0.15
Sb	0.12	0.14	0.85	0.03		
Sc		0.81	0.11	0.02		0.14
Si		0.78	0.31		0.00	0.11
V	0.62		0.40	0.31	0.21	0.15
Zn	0.08	0.63	0.34	0.42		
Variance	4.56 (21.8%)	3.54 (16.9%)	2.97 (14.2%)	2.80 (13.3%)	1.50 (7.12%)	1.46 (6.93%)
Source identification	Brake-non ferrous metal particles	Resuspended rail dust	Fuel combustion	Vehicle exhaust	Black carbon	Cr-related

4. 결 론

본 연구는 기기 중성자방사화분석법과 X선 형광분석법을 이용하여 다중이용시설 중 지하철 객차 내 실내공기 중 PM10의 미량원소 분포특성과 실내공기질을 평가하고, 향후 실내공기질의 효율적인 제어를 위해 객차 내 PM10의 오염원을 평가하고자 하였다. 대전광역시에서 운행 중인 지하철 객차 내에서 채취한 PM10의 평균농도는 59.3 ± 14.5 μg/m^{3}로 국내 기준치와 비교하면 높지 않은 수준이었으나, 순간 최대농도는 358 μg/m^{3}까지 상승하는 것으로 나타났다. 지하철 객차 내 PM10 중 24종 원소성분을 정량분석한 결과, 각 성분의 농도는 10^{-3}~10^5 ng/m^3 범위에 넓게 분포하였고, Fe (12.5 μg/m^3)의 농도가 특히 높았다. 그리고 Ba, Br,

Fe, Cr, Mn의 경우 일반 대기 중 금속원소와 비교할 때 매우 높은 수준인 것으로 나타났다. 특히 Fe의 농도는 평균 12.5 ± 2.3 μg/m^{3}으로 PM10 질량농도의 약 20%를 차지하였으며, Mn/Fe 비를 통하여 차륜과 철로에서 기인하는 입자가 객차 내로 유입되었음을 유추할 수 있었다. 또한 오염원 평가 결과, brake-nonferrous metal particle, resuspended rail dust, fuel combustion, vehicle exhaust, black carbon, Cr-related 가 주요 오염원인 것으로 나타났는데, 지하철 브레이크 시스템과 철로 및 차륜 마찰과 같은 지하철 운행과 관련된 오염원(인자 #1, #2, #6)과 외부대기의 영향을 받는 오염원(인자 #3, #4, #5)으로 구분할 수 있었다.

Acknowledgement

본 연구는 충남대학교 연구기금의 지원으로 수행되었습니다.

KSEE

References

1. Wallace, L., "Indoor particles: a review," *J. Air Waste Manage.*, **46**(2), 98~126(1996).
2. Ministries concerned, Master plan for indoor air quality control(2015~2019), (2015).
3. Lim, J. M., Jeong, J. H., Lee, J. H., Moon, J. H., Chung, Y. S. and Kim, K. H., "The analysis of PM2.5 and associated elements and their indoor/outdoor pollution status in an urban area," *Indoor Air*, **21**(2), 145~155(2011).
4. WHO, "WHO Guidelines for indoor air quality," Selected pollutants. WHO Regional Office for Europe Regional Publications, Copenhagen(2010).
5. Monn, C. H., Fuchs, A., Högger, D., Junker, M., Kogelschatz, D., Roth, N. and Wanner, H. U., "Particulate matter less than 10 μm (PM 10) and fine particles less than 2.5 μm (PM 2.5): relationships between indoor, outdoor and personal concentrations," *Sci. Total Environ.*, **208**(1), 15~21(1997).
6. Nam, B. H., Hwang, I. J. and Kim, D. S., "Pattern Classification of PM-10 in the Indoor Environment Using Disjoint principal Component Analysis," *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **18**(1), 25~37(2002).
7. Cheng, Y. H., Lin, Y. L. and Liu, C. C., "Levels of PM 10 and PM 2.5 in Taipei rapid transit system," *Atmos. Environ.*, **42**(31), 7242~7249(2008).
8. Nieuwenhuijsen, M. J., Gomez-Perales, J. E. and Colvile, R. N., "Levels of particulate air pollution, its elemental composition, determinants and health effects in metro systems," *Atmos. Environ.*, **41**(37), 7995~8006(2007).
9. Wilson, W. E. and Suh, H. H., "Fine particles and coarse particles: concentration relationships relevant to epidemiologic studies," *J. Air Waste Manage.*, **47**(12), 1238~1249(1997).
10. Schwartz, J., Dockery, D. W. and Neas, L. M., "Is daily mortality associated specifically with fine particles?," *J. Air Waste Manage.*, **46**(10), 927~939(1996).
11. Hidy, G. M., Appel, B. R., Charlson, R. J., Clark, W. E., Friedlander, S. K., Hutchison, D. H., Smith, T. B., Suder, J., Wesolowski, J. J. and Whitby, K. T., "Summary of the California aerosol characterization experiment," *J. Air Pollut. Contr. Assoc.*, **25**(11), 1106~1114(1975).
12. Kim, D. S., Kim, S. D., Kim, Y. S., Shin, E. B. and Lee, T. J., "Quantitative determination of aerosol contribution in Seoul metropolitan subway stations," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **16**(3), 309~319(1994).
13. Sitzmann, B., Kendall, M., Watt, J. and Williams, I., "Characterisation of airborne particles in London by computer-controlled scanning electron microscopy," *Sci. Total Environ.*, **241**(1), 63~73(1999).
14. Grass, D. S., Ross, J. M., Family, F., Barbour, J., Simpson, H. J., Coulibaly, D., Hernandez, J., Chen, Y., Slavkovich, V., Li, Y., Graziano, J., Santella, R. M., Brandt-Rauf, P. and Chillrud, S. N., "Airborne particulate metals in the New York City subway: A pilot study to assess the potential for health impacts," *Environ. Res.*, **110**(1), 1~11(2010).
15. Karlsson, H. L., Nilsson, L. and Moller, L., "Subway particles are more genotoxic than street particles and induce oxidative stress in cultured human lung cells," *Chem. Res. Toxicol.*, **18**(1), 19~23(2005).
16. Querol, X., Moreno, T., Karanasiou, A., Reche, C., Alastuey, A., Viana, M., Font, O., Gil., J., Miguel, E. and Capdevila, M., "Variability of levels and composition of PM 10 and PM 2.5 in the Barcelona metro system," *Atmos. Chem. Phys.*, **12**(11), 5055~5076(2012).
17. Chillrud, S. N., Epstein, D., Ross, J. M., Sax, S. N., Pederson, D., Spengler, J. D. and Kinney, P. L., "Elevated airborne exposures of teenagers to manganese, chromium, and iron from steel dust and New York City's subway system," *Environ. Sci. Technol.*, **38**(3), 732~737(2004).
18. Kim, S. J., Kang, H. S., Son, Y., S., Yoon, S. L., Kim, J. C., Kim, G. S. and Kim, I., W., "Compensation of light Scattering method for real-time monitoring of particulate matters in subway stations," *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **26**(5), 533~542(2010).
19. Quann, R. J., Neville, M., Janghorbani, M., Mims, C. A. and Sarofim, A. F., "Mineral matter and trace-element vaporization in a laboratory-pulverized coal combustion system," *Environ. Sci. Technol.*, **16**(11), 776~781(1982).
20. Koeberl, C., "Instrumental neutron activation analysis of geochemical and cosmochemical samples: a fast and reliable method for small sample analysis," *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **168**(1), 47~60(1993).
21. Landsberger, S., "Trace element determination of airborne particles by neutron activation analysis," Elemental Analysis of Airborne Particles, Gordon and Breach, Malaysia(1999).
22. Lim, J. M., Lee, J. H. and Chung, Y. S., "Chemical characteristics and sources of fine ambient particulate matter from the thirt and fourth industrial complex area of Daejeon city, Korea," *Anal. Sci. Technol.*, **20**(1), 33~40(2007).
23. Song, H. B., Kim, D. K., Do, H. S., Han, G. H., Leem. J.

L., Hong, S. H., Kim, M., H. and Baek, S. O., "Evaluation of indoor air quality and the perception of subway in Taegu area," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **23**(2), 337~348(2001).
24. Kwon, S. B., Cho, Y., Park, D. and Park, E. Y., "Study on the indoor air quality of Seoul metropolitan subway during the rush hour," *Indoor Built Environ.*, **17**(4), 361~369(2008).
25. Park, D. S., Oh, M. S., Yoon, Y. H., Park, E. Y. and Lee, K. Y., "Source identification of PM 10 pollution in subway passenger cabins using positive matrix factorization," *Atmos. Environ.*, **49**, 180~185(2012).
26. Fromme, H., Oddoy, A., Piloty, M., Krause, M. and Lahrz, T., "Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and diesel engine emission (elemental carbon) inside a car and a subway train," *Sci. Total Environ.*, **217**(1-2), 165~173(1998).
27. Braniš, M., "The contribution of ambient sources to particulate pollution in spaces and trains of the Pragu underground transport system," *Atmos. Environ.*, **40**(2), 348~356(2006).
28. Kam, W., Cheung, K., Daher, N. and Sioutas, C., "Particulate matter (PM) concentrations in underground and ground-level rail systems of the Los Angeles Metro," *Atmos. Environ.*, **45**(8), 1506~1516(2011).
29. Aarnio, P., Yli-Tuomi, T., Kousa, A., Mäkelä, T., Hirsikko, A., Hämeri, K., Räisänen, M., Hillamo, R., Koskentalo, T. and Jantunen, M., "The concentrations and composition of and exposure to fine particles (PM 2.5) in the Helsinki subway system," *Atmos. Environ.*, **39**(28), 5059~5066(2005).
30. Lim, J. M., Lee, J. H., Moon, J. H., Chung, Y. S. and Kim, K. H., "Source apportionment of PM 10 at a small industrial area using Positive Matrix Factorization," *Atmos. Res.*, **95**(1), 88~100(2010).
31. Moreno, T., Martins, V., Querol, X., Jones, T., BeruBe, K., Minguillon, M. C., Amato, F., Capdevila, M., Miguel, E., Centelles, S. and Gibbons, W., "A new look at inhalable metalliferous airborne particles on rail subway platforms," *Sci. Total Environ.*, **505**, 367~375(2015).
32. Chueinta, W., Hopke, P. K. and Paatero, P., "Investigation of sources of atmospheric aerosol at urban and suburban residential areas in Thailand by Positive Matrix Factorization," *Atmos. Environ.*, **34**(20), 3319~3329(2000).
33. Slezakova, K., Pereira, M. C. and Alvim-Ferraz, M. C., "Influence of tobacco smoke on the elemental composition of indoor particles of different sizes," *Atmos. Environ.*, **43**(3), 486~493(2009).
34. Gemenetzis, P., Moussas, P., Arditsoglou, A. and Samara, C., "Mass concentration and elemental composition of indoor PM 2.5 and PM 10 in University rooms in Thessaloniki, northern Greece," *Atmos. Environ.*, **40**(17), 3195~3206(2006).
35. Do, H. S., Song, H. B., Shin, D. C., Kwak, J. H., Lee, M. S., Yoon, H. S., Kang, H. J. and Phee, Y. G., "Characteristic assessment of heavy metals in dusts collected by the air filtration system at subway stations in Daegu, Korea," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **31**(1), 42~50(2009).
36. Harman, H. H., "Modern factor analysis," University of Chicago Press(1976).
37. Chan, L. Y., Lau, W. L., Lee, S. C. and Chan, C. Y., "Commuter exposure to particulate matter in public transportation modes in Hong Kong," *Atmos. Environ.*, **36**(21), 3363~3373(2002).
38. Rodrıguez, S., Querol, X., Alastuey, A., Viana, M. M., Alarcon, M., Mantilla, E. and Ruiz, C. R., "Comparative PM 10-PM 2.5 source contribution study at rural, urban and industrial sites during PM episodes in Eastern Spain," *Sci. Total Environ.*, **328**(1), 95~113(2004).
39. Mugica-Alvarez, V., Figueroa-Lara, J., Romero-Romo, M., Sepulveda-Sanchez, J. and Lopez-Moreno, T., "Concentrations and properties of airborne particles in the Mexico City subway system," *Atmos. Environ.*, **49**, 284~293(2012).
40. Watson, J. G. and Chow, J. C., "Source characterization of major emission sources in the imperial and Mexicali Valleys along the US/Mexico border," *Sci. Total Environ.*, **276**(1), 33~47(2001).
41. Watson, J. G., Chow, J. C. and Houck, J. E., "PM 2.5 chemical source profiles for vehicle exhaust, vegetative burning, geological material, and coal burning in Northwestern Colorado during 1995," *Chemosphere*, **43**(8), 1141~1151(2001).
42. Moschandreas, D. J., Winchester, J. W., Nelson, J. W. and Burton, R. M., "Fine particle residential indoor air pollution," *Atmos. Environ.*, **13**(10), 1413~1418(1979).