

## 대구지역 지하철역사 공기여과필터 포집먼지에 함유된 중금속성분의 특성평가

도화석<sup>†</sup> · 송희봉 · 신동찬 · 광진희 · 이명숙 · 윤호석 · 강혜정 · 피영규\*

대구광역시보건환경연구원 · \*대구한의대학교 보건학부

(2008년 10월 18일 접수, 2009년 1월 30일 채택)

### Characteristic Assessment of Heavy Metals in Dusts Collected by the Air Filtration System at Subway Stations in Daegu, Korea

Hwa-Seok Do<sup>†</sup> · Hee-Bong Song · Dong-Chan Shin · Jin-Hee Kwak ·  
Myoung-Sook Lee · Ho-Suk Yoon · Hye-Jung Kang · Young-Gyu Phee\*

Public Health and Environment Institute of Daegu Metropolitan City

\*Department of Health Science, Daeguhaany University

**ABSTRACT** : Samples of subway dust were collected by the air filter system of 30 subway stations on Daegu subway line 1 in January 2008. Samples were sieved below 100  $\mu\text{m}$ , and 14 elements were analyzed using ICP after acid extraction. Results obtained from the source assessment of trace elements using enrichment factor showed that Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, V were influenced by natural sources such as weathered rock and resuspended soil, while Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn were influenced by anthropogenic sources such as fuel combustion and waste incineration. Concentrations were remarkably higher in components from natural sources than in components from anthropogenic sources. Anthropogenic sources were significantly affected by indoor dusts than outdoor dusts. Results of pollution indices of heavy metals indicated that indoor dusts were more contaminated with heavy metal ions than outdoor dusts. The correlation analysis among trace elements indicated that components were much correlated in the order of natural sources-anthropogenic sources, anthropogenic sources-anthropogenic sources, natural sources-natural sources in both indoor and outdoor dusts. Trace element components of outdoor dusts were largely correlated than those of indoor dusts. In addition, indoor dusts were significantly affected by outdoor dusts rather than depth from the surface or the average daily number of subway passengers.

**Key Words** : Subway Dust, Trace Elements, Enrichment Factor, Pollution Indices

**요약** : 2008년 1월에 대구지하철 1호선 총 30개 역사에 대해 각 역사별로 공기여과장치에서 포집된 먼지를 채취하여 100  $\mu\text{m}$  이하로 체거름하고 산추출한 후 ICP로 14개 원소를 분석하였다. 농축계수를 이용한 미량원소성분의 발생원을 평가한 결과, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, V 성분은 암석풍화, 토양재비산 등과 관련된 자연적인 발생원의 영향을 받았고, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn 성분은 연료연소, 폐기물소각 등과 관련된 인위적인 발생원의 영향을 받고 있는 것으로 추정되었다. 미량원소성분의 농도는 자연적인 발생원에서 유래되는 성분이 높았고, 인위적인 발생원에서 유래되는 성분이 낮았다. 인위적인 발생원 성분의 기여도는 실내먼지가 실외먼지에 비해 높았다. 오염지수를 이용한 중금속성분의 오염도를 평가한 결과, 실내먼지는 실외먼지에 비해 중금속으로부터 오염된 것으로 추정되었다. 미량원소성분의 상관성을 분석한 결과, 실내와 실외먼지에서 공통적으로 자연적-인위적발생원 성분간, 인위적-인위적발생원 성분간, 자연적-자연적발생원 성분간의 순으로 유의하게 양호하였다. 그리고 실외먼지는 실내먼지에 비해 미량원소성분간의 유의한 상관성이 많았다. 또한 지하깊이, 이용객수, 실외먼지 등이 실내먼지의 성분에 미치는 영향을 분석한 결과, 실내먼지는 지하깊이나 이용객수의 영향보다는 실외먼지의 직접적인 영향을 많이 받고 있는 것으로 추정되었다.

**주제어** : 지하철먼지, 미량원소성분, 농축계수, 오염지수

### 1. 서론

인간의 생활이 실외보다는 실내에서 주로 이루어짐에 따라 장시간 실내환경 노출이 인체에 미치는 영향에 대한 관심이 고조되고 있다. 실내환경 중 도시 지하철은 현대 사회에서 더 이상 수송수단에만 그치지 않고, 지하철역 주변에 지하상가가 형성되기도 하고, 각 역사 내에서 문화이

벤트가 시행되는 등 쇼핑문화의 장이 조성됨으로써 시민들에게 또 하나의 생활공간으로 자리 잡고 있다.<sup>1)</sup> 이러한 지하철 노선의 확충은 지하공간을 인간의 새로운 활동영역으로 확대시키면서 지하철 공기질이 인간의 건강에 위대한 영향을 직·간접적으로 줄 수 있으며 지하공간오염이라는 새로운 문제를 야기하고 있다. 지하역사 공기질은 구조물 내의 인공적인 환기시설이나 배기시설만으로는 지하공간의 실내공기를 쾌적하게 유지할 수 없다는 환경보건학적인 문제점을 지적할 수 있다. 더욱이 지하에서의 활동 시간과 이용객의 수가 증가될 것이 예상됨에 따라 지하생

<sup>†</sup> Corresponding author

E-mail: dhs2580@daegumail.net

Tel: 053-760-1291

Fax: 053-760-1333

활공간에서의 실내공기오염은 매우 심각해질 수 있다. 지하철과 관련한 실내 공기질 중 특히 먼지문제는 다른 오염물질 또는 오염현상에 비하여 심각한 사회문제로 대두되고 있다. 지하철역사 미세먼지의 주요 오염원으로는 지하철 운행과정에서 열차풍 등에 의한 발생, 운행시간 동안의 지하철 이용객과 외부공기에 의한 유입 등을 들 수 있다. 따라서 지하철역사 근로자와 이용승객들이 이와 같은 원인으로 부터 발생된 미세먼지에 계속적으로 노출되어지며, 일부 미세먼지에 중금속이 오염되었을 경우 보건학적으로 인체위해성이 예상되어진다.<sup>2~6)</sup>

대구 지하철역사의 경우 공기질 관리를 위한 데미스터, 자동재생형필터, 프리-미디엄필터 등의 여과를 거치는 총 3단계의 공기여과장치를 갖추고 있으나 여과장치를 거치지 않고도 출입보행계단을 통해 직접적으로 지하에 유입되므로 실외공기의 영향을 크게 받는 반개방형태의 구조물로 되어있다.<sup>6)</sup> 미세먼지를 줄이기 위한 하나의 방법으로 외부로부터의 역사 내 오염물질 유입을 차단하는 스크린도어가 설치된 곳은 역사전체 56개 중 2곳(3.6%) 뿐이다. 스크린도어 설치현황은 대전시 100%, 부산시 19%, 광주시 15%, 인천 0%로서 대구의 경우 인천을 제외하고는 가장 낮은 설치율을 나타내고 있다.<sup>7)</sup> 또한 공기여과장치를 통해 공급되는 외부공기는 필터의 사양에 의해 입자상물질이 포집되며 역사내의 공기를 재순환하는 방식도 갖추고 있어 역사내의 공기도 여과장치를 거친 후 재공급하게 된다. 이러한 과정에서 공기여과장치의 필터에 포집된 먼지는 실외 공기 유입 시 포집된 먼지와 역사내로 공급된 공기를 재순환하는 과정에서 포집된 먼지로 구분된다. 여기서 전자를 실외먼지라고 하며 후자를 실내먼지로 구분할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 지하철역사에 설치된 공기여과장치에 포집된 먼지를 실외먼지와 실내먼지로 구분하여 분석

하고 실내·외 먼지에 함유되어 있는 미량원소성분을 분석하여 농축계수를 이용한 미량원소성분의 발생원을 개략적으로 규명하고, 지하철 역사의 실내·외 먼지에 함유된 미량원소성분의 농도분포특성을 파악하고, 이미 연구된 송등<sup>8,9)</sup>의 도로먼지와 교실먼지와의 오염수준을 비교하고, 오염지수를 이용한 유해 중금속성분의 오염도를 평가하고, 최종적으로 미량원소성분간의 상관성 분석 및 지하철역사의 깊이와 이용객수가 실내먼지에 미치는 영향과 실외먼지가 실내먼지에 미치는 영향을 평가하고자 한다. 이와 같은 연구결과는 지하철 공기질 관리를 위한 환기시스템의 운영과 필터의 관리 등에 활용하여 보다 쾌적한 지하철역사 환경을 만들어 시민보건향상에 기여할 것으로 기대된다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 채취지점 및 기간

시료채취지점은 대구광역시의 지하철 1호선 총 30개 역사에 대해 각 역사별로 총 3단계의 제진과정을 거치는 공기여과장치(Air Filter System)에서 포집된 먼지를 대상으로 하였다. 먼지시료는 지상으로 부터 강제적으로 유입해 단순히 외부공기만을 여과하는 Demister(입경이 큰 먼지 제거)를 거친 Auto Air Filter(입경이 10 µm 이상인 먼지 55% 이상 제거)에 포집된 먼지(이하, 실외먼지), 그리고 이러한 과정으로 여과된 공기와 재순환사용을 위한 실내공기를 혼합해 여과하는 Pre-Medium Filter(입경이 1~5 µm 인 먼지 85% 이상 제거)에 포집된 먼지(이하, 실내먼지)를 각각 채취하였다. 각 채취지점의 지하층수, 지하깊이, 이용객수, 출입구수를 비롯한 지상의 주변 환경(교차로·대형시장·국철역·공장 등 인접)에 대한 특성<sup>10)</sup>은 Table 1과 같고, 이들은 결과해석의 보조자료로 활용하였다.

**Table 1.** Identification of sampling sites in subway station (Daegu Line 1)

Sites	Depth (m)	Passenger (person/day)	Gate (basement)	Ground environment	Sites	Depth (m)	Passenger (person/day)	Gate (basement)	Ground environment
# 1	19.0	16,055	4 (B3F)		#16	18.7	20,782	4 (B3F)	Market Station
# 2	16.2	8,533	4 (B2F)		#17	21.8	10,613	4 (B3F)	Market
# 3	13.7	8,573	4 (B2F)		#18	17.9	8,998	8 (B2F)	Crossroads
# 4	14.0	22,731	8 (B2F)	Crossroads	#19	20.4	23,680	4 (B3F)	Station
# 5	14.8	8,708	8 (B2F)	Crossroads	#20	15.8	9,154	4 (B2F)	Crossroads
# 6	18.2	8,295	4 (B3F)		#21	23.9	11,347	4 (B4F)	
# 7	17.0	19,399	3 (B2F)	Crossroads	#22	24.7	3,011	4 (B4F)	
# 8	16.0	6,340	4 (B2F)		#23	20.6	6,107	4 (B3F)	
# 9	19.1	7,908	4 (B2F)		#24	15.6	6,523	4 (B2F)	
#10	15.1	6,990	4 (B2F)	Crossroads	#25	14.7	4,484	4 (B2F)	
#11	14.6	12,800	3 (B2F)		#26	15.8	2,618	3 (B2F)	
#12	19.3	8,463	4 (B3F)		#27	14.7	7,284	4 (B2F)	
#13	14.0	11,961	4 (B2F)	Crossroads	#28	14.7	5,184	4 (B2F)	Factory Crossroads
#14	19.0	9,399	4 (B3F)	Crossroads	#29	14.5	7,317	4 (B2F)	
#15	18.4	38,929	4 (B3F)	Crossroads	#30	16.2	10,036	5 (B2F)	

이들 총 30곳의 지하역사 먼지시료는 겨울철인 2008년 1월 14일부터 1월 16일까지 총 3일간에 걸쳐 직장인들의 출·퇴근 및 학생들의 등·하교 등의 활동으로 인해 열차 운행 횟수가 휴일에 비해 상대적으로 많은 평일(14일/8곳, 15일/7곳, 16일/15곳)에 채취하였다. 또한 시료채취당일의 모든 날씨는 비교적 맑고 건조한 상태(평균기온 : 0.5℃, 평균습도 : 43.0%, 주풍향 : 서~북서풍, 평균풍속 : 2.6 m/sec, 강수량 : 무강수)에서 이루어졌다.<sup>11)</sup>

2.2. 시료채취 및 분석

지하역사에서 채취한 먼지시료는 크린지퍼백(LDPE : 크린랩, 25 cm×30 cm, 한국)에 담아 밀봉한 후 실험실로 운반하였다. 이들 시료를 실온에서 자연건조 시킨 후 표준망체(Standard Testing Sieve : 청계상공사, Aperture 100 μm, 한국)를 이용하여 100 μm 이하로 분리해 분석용 시료로 하였다. 시료분석은 테프론비커에 전자식저울(Electronic Balance : Ohaus, Galaxy 200D, Germany)로 정확히 취한 분석용 시료 1.0 g과 2 : 2 : 2 HCl-HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O의 혼합용액(HCl과 HNO<sub>3</sub>은 유해금속추출용, H<sub>2</sub>O은 크로마토그래피용) 6 mL를 넣고 초음파추출기(Ultrasonic Extractor : Elma, Transsonic 890/H, Germany)로 95℃에서 2시간 동안 추출한 용액을 방냉하고 메스플라스크에 멤브레인필터로 여과한 후 탈이온수인 증류수를 넣어 최종액량이 정확히 25 mL가 되도록 하였다.<sup>8,9,12)</sup> 이러한 전처리 과정을 거친 시료를 유도결합플라즈마방출분광광도계(ICP : Perkin Elmer, Optima 4300DV, USA)로 총 14개 원소(Al, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, V, Zn)에 대해 분석하였다.

2.3. 자료처리

총 30개 역사의 총 60개(실외 30개, 실내 30개) 시료에 대해 ICP로 분석한 총 14개 원소의 농도자료는 각 원소별로 모두 검출한계 이상으로 나타났다. 또한 시료분석방법인 염산-질산추출법에 의한 원소성분의 농도에 대한 신뢰성 검증은 미국 국립표준시험연구소(NIST)의 표준참조물질인 Standard Reference Matter 1648 (Urban Particulate Matter)을 이용하여 실제시료와 동일한 방법으로 회수율 실험(Recovery Test)을 실시하였다. 그 결과, 유해성이 높은 Cd, Cu, Ni, Pb, V, Zn을 포함한 Fe, Mn, Mg의 원소들은 회수율이 62~95%(상대표준편차 : 0.1~1.6%) 수준으로 높았던 반면에 유해성이 낮은 Al, Cr, K, Na의 원소들은 회수율이 15~42%(상대표준편차 : 0.4~2.3%) 수준으로 낮았다. 이와 같은 회수율은 백 등<sup>13)</sup>이 연구한 대구 지역 공중시설의 실내공기 중 입자상물질의 농도평가에서 회수율 평가결과와 비슷한 결과를 보였다.

그러나 본 논문에서는 원소성분의 농도계산에 있어서 이러한 회수율을 특별히 보정하지 않고 통계·처리하였다. 그 이유는 Table 2와 관련된 본 연구의 발생원 평가에서 낮은 회수율을 보인 Al을 기준으로 농축계수를 계산할 때 회수율을 보정한 경우와 보정하지 않은 경우, 양자 모두

동일한 경향을 보였기 때문이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 지하역사 먼지에 함유된 미량원소성분의 발생원 평가

지하역사 먼지에 함유된 미량원소성분의 발생원은 Rahn<sup>14)</sup>에 의해 제안된 농축계수를 이용해 평가하였다. 지각물질의 원소조성과 지하역사 먼지의 원소조성을 비교해 자연적인 발생원의 영향 혹은 인위적인 발생원의 영향을 받는 성분인가를 추정하기 위해 지각물질 중에서도 비교적 균일하고 다량으로 함유되어 있는 Al을 기준원소로 선정하였다. 지각물질의 원소조성은 Taylor와 McLennan<sup>15)</sup>이 제시한 지각성분표를 이용하였다. 이때 지각원소성분의 농도는 Al 80,400 μg/g, Ca 30,000 μg/g, Cd 0.098 μg/g, Cr 35 μg/g, Cu 25 μg/g, Fe 35,000 μg/g, K 28,000 μg/g, Mg 13,300 μg/g, Mn 600 μg/g, Na 28,900 μg/g, Ni 20 μg/g, Pb 20 μg/g, V 60 μg/g 그리고 Zn 71 μg/g이었다. 지하역사 먼지에 대한 농축계수(E.F, Enrichment Factor)는 아래와 같은 식으로부터 계산하였으며, 그 결과는 Table 2와 같다.

$$\text{농축계수(E.F)} = \frac{\text{측정먼지 중 원소성분의 농도/측정먼지 중 Al성분의 농도}}{\text{지각물질 중 원소성분의 농도/지각물질 중 Al성분의 농도}}$$

위 식으로부터 산출된 농축계수가 10 이하인 값을 나타내면 지각물질 조성의 변화 등 자연적인 발생원의 영향을, 그리고 10 이상인 값을 나타내면 인간의 활동 등 인위적인 발생원의 영향을 받는 성분으로 간주하였다.<sup>16)</sup>

Table 2. Enrichment factor of trace elements in subway station dust

Element	This study		Song et al <sup>8,9)</sup>	
	Subway station (Indoor, n=30)	Subway station (Outdoor, n=30)	School (Indoor, n=45)	Street (Outdoor, n=48)
Al	(1.0)	(1.0)	(1.0)	(1.0)
Ca	5.4	5.0	11.6	8.1
Cd	812.7	401.2	650.1	671.5
Cr	20.6	15.4	17.3	35.1
Cu	518.9	161.9	140.3	101.2
Fe	3.6	2.7	3.3	9.7
K	1.8	1.4	1.8	0.5
Mg	2.5	2.5	3.8	4.1
Mn	9.5	5.4	5.5	7.1
Na	0.9	0.9	0.9	0.1
Ni	19.7	13.0	21.5	31.6
Pb	111.6	61.7	138.6	58.7
V	2.9	3.2	3.5	4.4
Zn	335.5	136.7	93.9	78.4

산출된 결과는 모든 역사 및 실내·외를 평균으로 보면 Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, V 성분은 농축계수가 10 이하인 값을 보였으며, 암석의 풍화, 토양의 재비산 등과 관련된 자연적인 발생원의 영향을 받는 것으로 추정되었다. 그리고 Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn 성분은 농축계수가 10 이상인 값을 보이므로 연료유의 연소, 폐기물의 소각 등과 관련된 인위적인 발생원의 영향을 받는 것으로 추정되었다. 이는 AI를 기준원으로 본 연구와 동일한 지각성분표를 이용하여 송 등<sup>8,9</sup>과 최 등<sup>17,18</sup>이 연구한 결과와 동일한 경향을 보였다. 그 결과는 본 연구와 같이 농축계수가 Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, V의 경우에는 10 이하, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn 성분은 농축계수가 10 이상으로 산출되었다. 여기서 특이한 것은 V의 경우로 석유류의 연료연소와 관련이 높은 인위적인 발생원과 관련이 있을 것으로 보았던 예상과는 달리 지하역사 실내·외의 먼지 및 도로먼지, 교실 먼지 등 모두 농축계수가 5 이하인 값을 보여 자연적인 발생원과 관련이 있는 물질로 추정되었지만 이러한 결과는 대구지역만의 경향인지 앞으로 그 원인규명을 위한 지속적인 연구가 필요하다고 생각된다.

본 연구에서는 인위적인 발생원의 영향 성분(Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn)은 실내먼지가 실외먼지보다 높아 실내의 환경의 오염을 간음해 볼 수 있었다. 이는 환기시스템의 부적절한 운영이라든지 실외와의 밀폐된 공간에서 오염된 물질의 축적에 의해 발생된 현상이라고 사료된다. 또한 이미 연구된<sup>8,9</sup> 대구지역의 도로먼지와 교실먼지의 경우와 비교해 보면 실내먼지의 경우 지하역사 실내먼지가 교실먼지보다 Cd, Cr, Cu, Zn의 원소성분에서 높았다. 이것으로 볼 때 교실보다 지하역사의 실내먼지 오염도가 심각함을 알 수 있었으며 또한 교실은 지상에 노출되어 있고 지하역사는 밀폐된 지하에 있어 교실이 자연적인 환기가 잘 된다고 할 수 있을 것이다. 반면에 지하역사의 경우는 지하

에 밀폐된 채 강제적인 환기시스템에 의존하고 있기 때문에 환기시스템의 운영 부적절이라든지 시스템적인 불량에서 오는 인위적인 물질이 축적된 결과라고 사료된다. 지하역사 실외먼지의 경우는 도로먼지와 비교해 보았을 때 Cu, Zn 성분의 경우에는 지하역사 실외먼지가 도로먼지보다 높게 나타났고, Cd, Cr, Ni의 경우에는 도로먼지가 지하역사 실외먼지보다 농축계수가 높게 나타났다.

### 3.2. 지하역사 먼지에 함유된 미량원소성분의 농도 분포

#### 3.2.1. 미량원소성분의 분석결과 요약

지하역사 전체시료 60개에 대한 미량원소성분의 분석결과는 Table 3에 요약하였다. 지하역사의 먼지에 함유된 미량원소성분의 전체평균농도는 분석된 총 14개 원소 중 자연적인 발생원과 관련된 성분으로 추정되는 Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na 등 7개 원소가 수 mg/g 혹은 수십 mg/g 수준의 높은 농도를 보였다. 그러나 인위적인 발생원과 관련된 성분으로 추정되는 Cd, Cr, Ni, Pb 등과 같은 유해성이 높은 중금속성분은 수 µg/g에서 수백 µg/g 수준의 낮은 농도를 보였으나 Cu와 Zn은 수백 µg/g에서 수천 µg/g의 농도를 보여 비교적 높아 지하철 실내·외먼지 모두 상당히 오염되어 있음을 알 수 있었다. 실내먼지의 경우 자연발생원 성분의 농도가 92.3%(82,736 µg/g) 인위적인 발생원 성분 7.7%(6,862 µg/g)의 기여율을 보였고, 실외먼지의 경우 자연발생원 성분의 농도가 96.4%(78,843 µg/g) 인위적인 발생원 성분의 농도가 3.6% (2,962 µg/g)로 나타나 실외보다 실내의 경우가 인위적인 발생원 성분의 기여도가 높았다.

실내의 경우가 인위적인 발생비율이 높았던 것은 실외와 같은 대기확산을 기대하지 못하고 오염물질이 낙하하여 먼지에 축적되는 경우가 많았던 것으로 사료된다.

**Table 3.** Summary of analytical results(µg/g)

Element	Indoor(n=30)						Outdoor(n=30)					
	Mean	Median	S.D <sup>1)</sup>	C.V <sup>2)</sup>	Min	Max	Mean	Median	S.D <sup>1)</sup>	C.V <sup>2)</sup>	Min	Max
Al	13661	13865	1626	0.12	10280	16360	14861	14690	1572	0.11	10030	18530
Ca	27747	28215	4366	0.16	20660	38010	27771	27360	3961	0.14	20970	35580
Cd	14	11	11	0.83	5	68	7	6	6	0.81	1	36
Cr	122	112	62	0.50	75	433	100	84	54	0.55	63	334
Cu	2204	2250	885	0.40	894	4338	748	739	215	0.29	443	1258
Fe	21383	21015	2324	0.11	17580	28700	17610	17975	1401	0.08	15260	19730
K	8647	8080	2065	0.24	5848	15170	7046	7107	1986	0.28	1752	11850
Mg	5682	5850	667	0.12	4570	7076	6056	6031	431	0.07	5367	6911
Mn	969	953	195	0.20	623	1470	595	583	98	0.17	358	838
Na	4642	4292	1456	0.31	1725	8755	4904	4944	1741	0.35	1213	7952
Ni	67	63	24	0.36	35	164	48	42	23	0.47	29	141
Pb	379	341	146	0.39	183	742	228	214	68	0.30	81	347
V	29	30	9	0.31	14	51	36	36	7	0.19	20	49
Zn	4047	3531	1450	0.36	2472	8030	1795	1781	352	0.20	892	2536

<sup>1)</sup> Standard Deviation, <sup>2)</sup> Coefficient of Variation (= Standard Deviation/Mean)

또한 표준편차(S.D)를 평균농도(Mean)로 나눈 값인 변동계수(C.V)는 실내의 경우 Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn(6개 성분)의 경우 0.3 이하로 낮은 값을 보인 반면에 Cd, Cr, Cu, Na, Ni, Pb, V, Zn(8개 성분)은 0.3 이상으로 높은 값을 보였다. 실외의 경우는 Al, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, V, Zn(9개 성분)의 경우가 0.3 이하로 낮은 값을 보인 반면에 Cd, Cr, Na, Ni, Pb(5개 성분)의 경우 0.3 이상으로 높은 값을 보였다. 실내의 경우가 8개 성분이 실외의 경우는 5개 성분이 0.3보다 높게 나타나 실내의 경우가 실외보다는 특정 배출원에 대한 영향을 많이 받는 것으로 사료된다. 전체적으로 볼 때 변동계수가 0.3보다 큰 경우는 인위적인 발생원 성분이 7종(Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, V, Zn)으로 자연적인 발생원 성분 1종(Na)보다 많았다.

이러한 결과는 자연적인 발생원관련 성분들의 경우엔 전체지점에서 특징적인 배출원의 영향이 다소 미흡하여 지점별로 뚜렷한 농도차이가 없었다. 반면에 인위적인 발생

원관련 성분들은 특정지점으로부터 배출되는 오염물질 때문에 이들의 농도차이에 큰 영향을 준 것으로 사료된다. 또한 실내·외의 미량원소성분의 농도비와 농축계수의 농도비가 비슷함을 알 수 있었는데 실내가 실외보다 비교적 높은 값을 나타내었다. 실내가 높은 경우로서는 Cu(3.0배), Zn(2.3배), Cd(1.9배), Mn(1.6배), Ni(1.4배), Cr·Fe·K(각 1.2배) 등과 같은 농도비를 보였고, 실내와 실외가 비슷한 경우의 원소로는 Ca, Na, Al, Mg, V으로 0.8~1.0배의 농도비를 보였다.

3.2.2. 시료채취지점별 농도분포

총 30개 역사의 총 60개(실외 30개, 실내 30개) 시료에 대해 ICP로 분석한 총 14개 원소 중 비교적 유해성이 큰 Cd, Cr, Ni 및 Pb에 대한 시료채취지점별 농도를 Fig. 1에 나타내었다. 각 시료채취지점의 특징은 전체적으로 볼 때 지하 2~4층으로 되어 있으며 깊이는 13.7~24.7 m, 1일

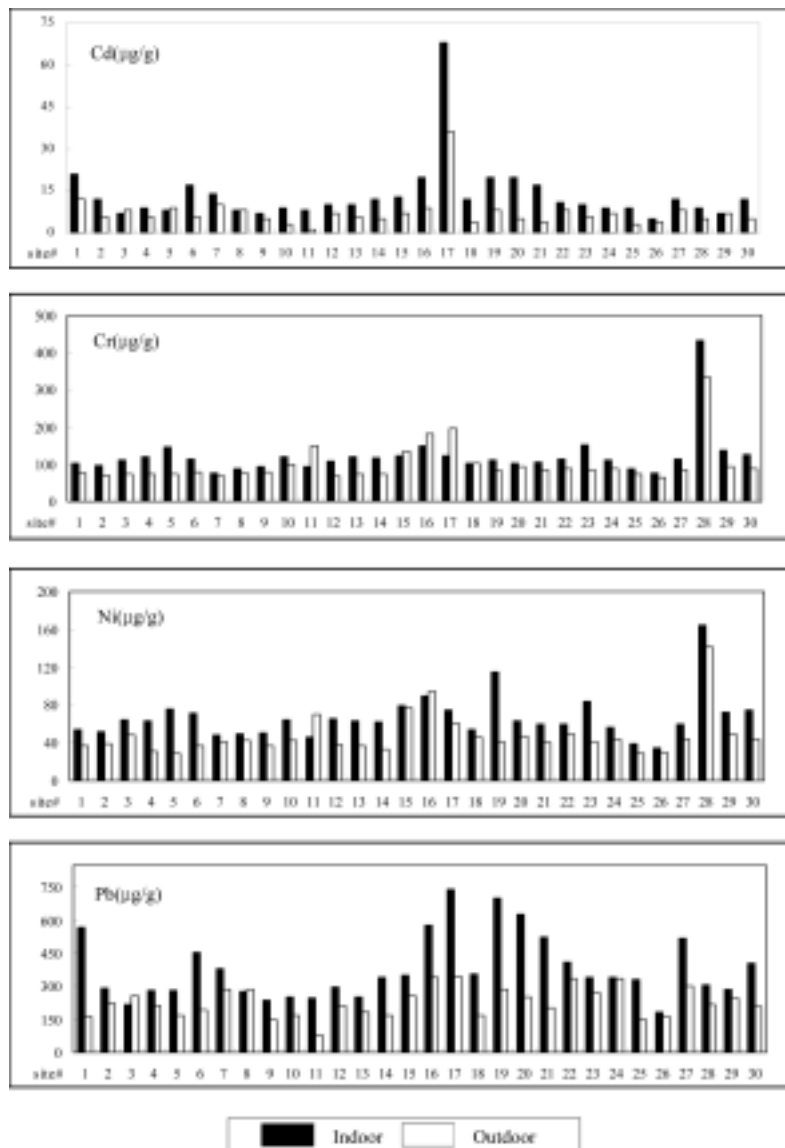


Fig. 1. Concentrations of heavy metals(Cd, Cr, Ni, Pb) on sampling sites.

이용객수는 2,618~38,929명이 이용하고, 출입구수는 3~8개의 출입구가 있다. 특이한 위치의 지점으로 #16지점은 국철역과 재래시장이 인접해 있으며, #17지점은 대형재래시장과 인접해 있고, #28지점은 교차로와 공단과 인접해 있다.

Fig. 1에서 보듯이 Cd의 경우 대체적으로 실내가 실외보다 높게 나타났으며, #17지점이 특히 높은 농도를 보이고 있는데 이 지점의 특징은 큰 재래시장 안에 위치한 지점으로 차량의 통행량이 많아 차량에 의한 배기가스와 주변상가의 동절기 난방연료의 연소 및 노점상 등의 난방을 위한 쓰레기 등의 불법소각에 의한 외부공기가 실내로 유입되면서 농축된 결과로 사료된다. Cr의 경우는 #11지점, #16지점, #17지점을 제외한 모든 지점에서 실내가 모두 높게 나타났으며, 특히 #28지점이 실내·외 모두 가장 높게 나타났다. 이 지점의 특징으로는 큰 교차로에 위치하고 있으며 인근에 작은 공단이 위치하고 있어 자동차의 배기가스 및 인근 공단에서 방출하는 배출가스의 영향을 받은 것으로 사료된다. Ni의 경우도 대체적으로 실내가 실외보다 높게 나타났으며, 특히 #28지점의 농도가 실내·외 모두 가장 높게 나타났고, #19지점의 실내농도가 실외농도에 비해 크게 높았다. 또한 Pb의 경우도 Cd, Cr, Ni의 경향과 동일하게 실내가 실외보다 모두 높게 나타났으며 또한 가장 높은 농도를 보였고, 실내농도가 실외보다 큰 폭으로 높은 지점이 많았다. 특히 #1지점, #16지점, #17지점, #19지점, #20지점, #21지점, #27지점 등이 다른 지점에 비해 대체적으로 높은 농도를 보였다. 이러한 지점들의 특징은 대체적으로 교통량이 많은 도심지역의 큰 도로변으로 자동차의 영향을 많이 받은 것으로 사료된다.

3.2.3. 대구지역의 다른 장소와의 미량원소성분 농도비교  
미량원소성분의 농도결정은 시료처리방법, 분석용 시료의 입자크기, 시료추출과정 그리고 시료채취지점별 배출원의 특성과 강도 등 복잡한 요인에 의해 그 결과가 서로 다르게 나타날 수도 있다. 따라서 이러한 요인 때문에 Table 4의 다른 연구결과<sup>8,9)</sup>와 비록 직접적인 비교가 어렵지만 간접적으로 비교해 볼 가치가 있다. 지하역사 먼지 중 실내먼지의 경우는 학교교실먼지 그리고 실외먼지는 도로먼지와 비교해 보았다.

지하역사 실내먼지의 경우 대체적으로 교실먼지 중의 미량원소성분보다 1.1~6.0배(Mg 1.1, Pb·V 1.3, Ni 1.5, Al·K 1.6, Na 1.7, Fe 1.8, Cr 1.9, Cd 2.0, Mn 2.8, Zn 5.8, Cu 6.0) 정도로 높았다. 그러나 Ca의 경우는 오히려 0.8로 낮았다. 그 이유로는 교실이라는 특정한 공간에서 탄산칼슘(CaCO<sub>3</sub>)이 주성분인 분필의 사용, 벽면 시멘트/콘크리트의 마모 등 인위적인 배출원의 기여가 컸다고 사료된다. 또한 Cd, Cu, Mn, Zn이 2배 이상 높았으며, 특히 Cu와 Zn이 각각 6.0배와 5.8배로 가장 높았다. Cu와 Zn은 도시 환경에서 금속산업활동과 관련되어 배출되는 것으로 전동차의 운행에 따른 레일과의 마찰, 브레이크 사용에 의한

**Table 4.** Mean concentration of trace elements(μg/g) in dust in other places, Daegu city

Element	This study		Song et al <sup>8,9)</sup>	
	Subway station (Indoor, n=30)	Subway station (Outdoor, n=30)	School (Indoor, n=45)	Street (Outdoor, n=48)
Al	13661	14861	8388	10435
Ca	27747	27771	36404	31518
Cd	14	7	7	9
Cr	122	100	63	159
Cu	2204	748	366	329
Fe	21383	17610	11882	43922
K	8647	7046	5352	1759
Mg	5682	6056	5311	7070
Mn	969	595	345	550
Na	4642	4904	2740	364
Ni	67	48	45	82
Pb	379	228	289	152
V	29	36	22	34
Zn	4047	1795	695	725

브레이크의 마모, 전력선과의 마모 등과 내·외부의 복합적인 오염원에 의한 것으로 사료된다.<sup>19~23)</sup>

지하역사 실외먼지는 도로먼지와 비교해 볼 때 각 미량원소성분마다 차이가 있지만 지하역사 실외먼지의 농도가 높은 원소는 Al, Cu, K, Na, Pb, Zn으로 1.4~13.5배까지 높았고, 지하역사 실외먼지와 도로먼지의 농도가 비슷한 것은 Ca, Cd, Mg, Mn, V로 나타났다. 이에 반해 도로먼지가 지하역사 실외먼지보다 높은 농도를 보인 것은 Cr, Fe, Ni의 원소로 1.6~2.5배 정도 높았다.

3.3. 지하역사 먼지에 함유된 중금속성분의 오염도 평가

지하역사 먼지에 함유된 유해 중금속성분의 오염정도를 평가하기 위해 우리나라 환경부<sup>24)</sup>가 제시한 토양오염우려기준(‘철도용지’에 해당)을 적용하였다. 이때 중금속의 토양오염우려기준은 각각 Cd 12 μg/g, Cu 200 μg/g, Ni 160 μg/g, Pb 400 μg/g 그리고 Zn 800 μg/g이었다. 지하역사 먼지에 대한 중금속의 오염지수(P.I, Pollution Index)는 아래와 같은 식으로부터 계산하였으며, 그 결과는 Table 5와 같다.

오염지수(P.I) =

$$\frac{Cd\text{함량}(\mu\text{g/g})}{12(\mu\text{g/g})} + \frac{Cu\text{함량}(\mu\text{g/g})}{200(\mu\text{g/g})} + \frac{Ni\text{함량}(\mu\text{g/g})}{160(\mu\text{g/g})} + \frac{Pb\text{함량}(\mu\text{g/g})}{400(\mu\text{g/g})} + \frac{Zn\text{함량}(\mu\text{g/g})}{800(\mu\text{g/g})}$$

위 식으로부터 산출된 오염지수가 1.0 이하인 값을 나타내면 중금속으로부터 오염되지 않은 지역으로, 그리고 1.0 이상인 값을 나타내면 중금속으로부터 오염된 지역으로 간주하였다.

**Table 5.** Pollution index of heavy metals (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) in subway station dust

Sampling place	P.I > 1.0		P.I < 1.0		P. <sup>1)</sup> Mean±S.D. <sup>2)</sup>
	Number	%	Number	%	
This study Subway station (Indoor, n=30)	30	100	0	0	3.71±0.84
	29	97	1	3	1.49±0.30
Song et al. <sup>8,9)</sup> School (Indoor, n=45)	45	100	0	0	3.62±1.64
	11	23	37	77	0.83±0.55

<sup>1)</sup> Pollution Index, <sup>2)</sup> Standard Deviation

지하철역사별 실내먼지의 경우 30개 지점 중 30곳(100%) 모두가 오염지수가 1.0을 초과하였고, 실외먼지의 경우는 30개 지점 중 29곳(97%)이 오염지수 1.0을 초과하였다. 오염지수의 평균은 실내먼지가 3.71로 실외먼지의 1.49에 비

해 약 2.5배 정도 높게 나타났다. 또한 지역용도는 다르지만 오염지수를 송 등<sup>8,9)</sup>이 연구한 대구지역의 도로먼지와 교실먼지 중 미량원소성분의 결과를 비교 분석해 보면 평균오염지수는 지하역사 실내(3.71) > 교실(3.62) > 지하역사 실외(1.49) > 도로(0.83)의 순으로 높게 나타났다. 즉 실내와 실외에서 모두 지하역사가 비교대상 장소인 교실과 도로에 비해 중금속으로부터 오염도가 더 높음을 알 수 있었다.

### 3.4. 지하역사 먼지에 함유된 미량원소성분의 상관성 분석

#### 3.4.1. 미량원소성분간의 상관관계

지하역사 먼지에 함유된 미량원소성분들과의 상관성을 분석한 결과는 Table 6과 같다. 지하역사 실내먼지의 경우에는 자연적인 발생원 성분과 인위적인 발생원 성분간인 Al과 V간(0.48), 그리고 Ca과 Cr간(0.43), K과 Cd, Pb, V, Zn간(0.82, 0.89, 0.48, 0.67), Mn과 Cr, Cu, Ni간(각각 0.45, 0.70, 0.67), Mg과 Pb, V, Zn간(0.41, 0.70, 0.44), Na과 Cd,

**Table 6.** Correlation coefficient among trace elements in subway station dust (n=30)

Indoor	Al	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	V	Zn
Al	(1.0)													
Ca	<b>0.51</b>	(1.0)												
Cd	-0.15	-0.41	(1.0)											
Cr	0.03	<b>0.43</b>	-0.03	(1.0)										
Cu	-0.43	0.09	-0.36	0.23	(1.0)									
Fe	-0.17	0.24	-0.14	0.12	0.32	(1.0)								
K	-0.22	-0.62	<b>0.82</b>	-0.08	-0.31	-0.18	(1.0)							
Mg	<b>0.50</b>	<b>0.46</b>	0.17	0.15	-0.49	0.32	0.13	(1.0)						
Mn	-0.44	0.01	-0.04	<b>0.45</b>	<b>0.70</b>	0.26	0.15	-0.13	(1.0)					
Na	-0.06	-0.53	<b>0.62</b>	0.01	-0.18	-0.06	<b>0.81</b>	-0.00	0.08	(1.0)				
Ni	-0.20	0.14	0.14	<b>0.87</b>	0.30	0.17	0.24	0.09	<b>0.67</b>	0.24	(1.0)			
Pb	-0.24	-0.46	<b>0.75</b>	-0.04	-0.35	0.02	<b>0.89</b>	<b>0.41</b>	0.17	<b>0.61</b>	0.26	(1.0)		
V	<b>0.48</b>	-0.03	<b>0.37</b>	-0.02	-0.79	-0.21	<b>0.48</b>	<b>0.70</b>	-0.30	<b>0.37</b>	0.02	<b>0.60</b>	(1.0)	
Zn	-0.22	-0.38	<b>0.60</b>	-0.16	-0.40	0.27	<b>0.67</b>	<b>0.44</b>	-0.09	<b>0.50</b>	0.13	<b>0.82</b>	<b>0.52</b>	(1.0)
Outdoor	Al	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	V	Zn
Al	(1.0)													
Ca	0.13	(1.0)												
Cd	<b>0.53</b>	-0.13	(1.0)											
Cr	0.17	0.22	0.25	(1.0)										
Cu	0.16	0.16	-0.00	-0.29	(1.0)									
Fe	<b>0.41</b>	<b>0.51</b>	0.17	0.28	0.25	(1.0)								
K	<b>0.68</b>	0.20	<b>0.39</b>	-0.08	0.30	0.16	(1.0)							
Mg	<b>0.39</b>	<b>0.61</b>	-0.05	0.31	-0.12	<b>0.79</b>	0.15	(1.0)						
Mn	<b>0.67</b>	<b>0.54</b>	<b>0.53</b>	<b>0.40</b>	0.15	<b>0.82</b>	<b>0.43</b>	<b>0.74</b>	(1.0)					
Na	<b>0.56</b>	-0.08	0.27	-0.08	0.31	-0.19	<b>0.82</b>	-0.20	0.09	(1.0)				
Ni	0.12	0.30	0.08	<b>0.95</b>	-0.26	0.22	-0.02	0.30	0.32	0.04	(1.0)			
Pb	<b>0.64</b>	<b>0.37</b>	<b>0.52</b>	0.15	0.14	<b>0.41</b>	<b>0.82</b>	<b>0.37</b>	<b>0.67</b>	<b>0.59</b>	0.22	(1.0)		
V	<b>0.61</b>	<b>0.44</b>	0.16	0.12	0.03	<b>0.58</b>	<b>0.67</b>	<b>0.70</b>	<b>0.69</b>	<b>0.40</b>	0.21	<b>0.81</b>	(1.0)	
Zn	0.21	<b>0.56</b>	0.34	-0.05	0.28	0.19	<b>0.48</b>	0.18	<b>0.49</b>	0.24	-0.01	<b>0.62</b>	0.33	(1.0)

Correlation coefficients exceeding 0.36 are significant at a level of 0.05.

Pb, V, Zn간(0.62, 0.61, 0.37, 0.50)에 유의한 상관성( $P<0.05$ )을 보였다. 자연적인 발생원 성분간에는 Al과 Ca, Mg간(0.51, 0.50), Ca과 Mg간(0.46), K과 Na간(0.81)에 유의한 상관성( $P<0.05$ )을 보였다. 또한 인위적인 발생원 성분간의 경우에는 Cd과 Pb, V, Zn간(0.75, 0.37, 0.60), Cr과 Ni간(0.87), Pb과 V, Zn간(0.60, 0.82), V과 Zn간(0.52)에도 유의한 상관성( $P<0.05$ )을 보였다. 따라서 지하역사 실내먼지는 전반적으로 자연적인 발생원관련 성분간(4개)보다는 인위적인 발생원관련 성분간(7개)에 더 양호한 상관성을 보임을 알 수 있었다.

그리고 지하역사 실외먼지의 경우에는 자연적인 발생원 성분과 인위적인 발생원 성분간인 Al과 Cd, Pb, V간(0.53, 0.64, 0.61), 그리고 Ca과 Pb, V, Zn간(0.37, 0.44, 0.56), K과 Cd, Pb, V, Zn간(0.39, 0.82, 0.67, 0.48), Mn과 Cd, Cr, Pb, V, Zn간(0.53, 0.40, 0.67, 0.69, 0.49), Fe과 Pb, V간(0.41, 0.58), Mg과 Pb, V간(0.37, 0.70), Na과 Pb, V간(0.59, 0.40)에 유의한 상관성( $P<0.05$ )을 보였다. 자연적인 발생원 성분간인 Al과 Fe, K, Mg, Mn, Na간(0.41, 0.68, 0.39, 0.67, 0.56), Ca과 Fe, Mg, Mn간(0.51, 0.61, 0.54), Fe과 Mg, Mn(0.79, 0.82), K과 Mn, Na간(0.43, 0.82), Mg과 Na간(0.74)에 유의한 상관성( $P<0.05$ )을 보였다. 또한 인위적인 발생원 성분간인 Cd과 Pb간(0.52), Cr과 Ni간(0.95), Pb과 V, Zn간(0.81, 0.62)에도 유의한 상관성( $P<0.05$ )을 보였다. 그러나 지하역사 실외먼지는 실내먼지와는 달리 전반적으로 인위적인 발생원관련 성분간(4개) 보다는 자연적인 발생원관련 성분간(13개)에 더 양호한 상관성을 보임을 알 수 있었다. 이러한 결과로 볼 때 실외먼지의 경우는 자연적인 발생원의 영향을, 그리고 실내먼지는 인위적인 발생원의 영향을 더 많이 받고 있다고 생각할 수 있다.

한편 실내와 실외먼지에서 공통적으로 유의한 상관성( $P<0.05$ )을 보인 성분으로는 자연적-인위적발생원 성분간(총10개 : Al-V, K-Cd, Mn-Cr, K-Pb · V · Zn, Mg-Pb · V, Na-Pb · V), 인위적-인위적발생원 성분간(총4개 : Cd-Pb, Cr-Ni, Pb-V · Zn), 자연적-자연적발생원 성분간(총3개 : Al-Mg, Ca-Mg, K-Na)의 순으로 많게 나타났다. 그리고 개별적으로 구분해 볼 때는 실외먼지(총38개 : 자연-자연 13, 인위-인위 4, 자연-자연 21)가 실내먼지(총27개 : 자연-자연 4, 인위-인위 7, 자연-자연 16)에 비해 미량원소성분간의 유의한 상관성( $P<0.05$ )이 많았다. 이러한 까닭은 실외의 오염원에 비해 실내의 오염원이 복잡하고 다양한데서 오는 결과로 사료된다.

3.4.2. 실외먼지, 역사깊이, 이용객수와 실내먼지 성분간의 상관관계

역사의 지하깊이, 이용객수, 실외먼지의 성분이 실내먼지의 성분에 미치는 영향을 평가하기 위하여 이들의 자료(Table 1)를 바탕으로 상관성 분석한 결과는 Table 7과 같다.

지하깊이와 이용객수가 실내먼지에 미치는 영향을 살펴보면 실내먼지는 이용객수보다는 지하깊이와 일부 상관

**Table 7.** Correlation coefficient between indoor trace elements and other factors (n=30)

Factor	Al	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	K
Depth	-0.21	-0.40	<b>0.44</b>	-0.06	-0.17	0.09	<b>0.51</b>
Passenger	-0.28	-0.40	0.16	-0.09	-0.02	0.07	<b>0.39</b>
Outdoor trace element	-0.05	<b>0.49</b>	<b>0.90</b>	<b>0.83</b>	0.24	0.11	<b>0.48</b>
Factor	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	V	Zn
Depth	0.16	0.11	<b>0.38</b>	0.07	<b>0.52</b>	0.30	<b>0.55</b>
Passenger	-0.17	0.19	<b>0.44</b>	0.18	0.28	0.04	0.30
Outdoor trace element	<b>0.61</b>	0.23	<b>0.61</b>	<b>0.73</b>	<b>0.49</b>	<b>0.43</b>	0.12

Correlation coefficients exceeding 0.36 are significant at a level of 0.05.

성이 높았으며, 특히 Cd(0.44), K(0.51), Na(0.38), Pb(0.52), Zn(0.55)이 높았다. 즉, 실내먼지는 이용객수에 비해 지하깊이에 따라 어느 정도의 영향을 받고 있다고는 볼 수 있었다. 즉 지하역사의 깊이가 깊을수록 환기의 문제로 인해 오염물질이 축적된 결과로 사료된다. 한편 실외먼지의 성분이 실내먼지의 성분에 미치는 영향을 분석한 결과로는 지하깊이나 이용객수에 비해 상호간의 양호한 상관성을 보인 성분들이 더 많은 것으로 나타났다. 특히 Ca(0.49), Cd(0.90), Cr(0.83), K(0.48), Mg(0.61), Na(0.61), Ni(0.73), Pb(0.49), V(0.43)으로 상관성이 높게 나타났다. 즉, 실내먼지는 실외먼지의 영향을 가장 많이 받고 있음을 알 수가 있었다. 이러한 사실은 지하역사의 경우, 이미 언급한 바와 같이 여과장치를 거치지 않고도 출입보행계단을 통해 직접적으로 실외공기의 영향을 지하에 유입되는 반개방형태의 구조물로 되어 있다는 것과 연관시킬 수 있다. 또한 이러한 결과는 Phillips 등<sup>25)</sup>이 연구한 결과와도 일치하는 결과를 보였다.

4. 결론

2008년 1월에 대구지하철 1호선 총 30개 역사에 대해 각 역사별로 공기여과장치(Air Filter System)에서 포집된 먼지(외부유입 여과먼지 - 실외먼지, 실내자체 여과먼지 - 실내먼지)를 채취하여 100 μm 이하로 체거름하고 산추출한 후 ICP로 14개 원소를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 농축계수를 이용한 미량원소성분의 발생원을 평가한 결과, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, V 성분은 암석풍화, 토양 재비산 등과 관련된 자연적인 발생원의 영향을 받았고, 반면에 Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn 성분은 연료연소, 폐기물소각 등과 관련된 인위적인 발생원의 영향을 받았다.
- 2) 분석된 미량원소성분의 농도는 자연적인 발생원에서 유래되는 성분이 높았고(수~수십 mg/g), 반면에 인위적인 발생원에서 유래되는 성분이 낮았다(수~수백 μg/g). 또한 인위적인 발생원 성분의 기여도는 실내먼지(7.7%)가 실외먼지(3.6%)에 비해 높았다.



3) 오염지수를 이용한 중금속성분(Cd, Cu, Ni, Pb, Zn)의 오염도를 평가한 결과, 실내먼지는 실외먼지에 비해 약 2.5 배 정도 중금속으로부터 오염된 것으로 추정되었다.

4) 미량원소성분간의 상관성을 분석한 결과, 실내와 실외먼지에서 공통적으로 자연적-인위적발생원 성분간(항목간 10개), 인위적-인위적발생원 성분간(항목간 4개), 자연적-자연적발생원 성분간(항목간 3개)의 순으로 유의하게 양호하였다. 그리고 실외먼지(항목간 38개)는 실내먼지(항목간 27개)에 비해 미량원소성분간의 유의 상관성이 많았다.

5) 또한 지하깊이, 이용객수, 실외먼지 등이 실내먼지의 성분에 미치는 영향을 분석한 결과, 실내먼지는 이용객수의 영향보다는 지하깊이에 어느 정도의 영향을 받고 있었으나 실외먼지의 영향을 가장 많이 받고 있는 것으로 추정되었다.

## 참고 문헌

- 황희진, 오미정, 강선이, 김혜경, 노철언, "Low-Z particle EPMA 단일입자분석법을 이용한 지하철 승강장에서 미세입자 특성분석," 한국대기환경학회지, **21**(6), 639~647(2005).
- 김윤신, 노영만, 이철민, 송민경, 김종철, 전형진, "서울시 일부 지하철역사의 PM10의 농도 및 중금속의 분포특성에 관한 연구," 한국대기환경학회 춘계학술대회 논문집(2006).
- Perry, R. and Gee, I. L., "Vehicle emissions and effects on air quality : indoors and outdoors," *Indoor Environ.*, **3**, 224~236(1994).
- 송희봉, 신동철, 황승만, 박연준, 홍성희, 문영훈, 백성욱, "대구지역 지하철역사의 실내공기 질 특성평가," 대한환경공학회지, **21**(9), 1673~1688(1999).
- 김민영, 이민환, 조석주, 김신도, "지하철역사내 미세먼지의 변동특성과 동태에 관한 연구," 한국대기환경학회 춘계학술대회 논문집(2004).
- 송희봉, 조찬래, 윤현숙, 박연준, 노기철, 최원기, 장성환, "실내공기오염 현황과 개선방안," 대구광역시보건환경연구원 환경관리기술지원사업 보고서, 127~145(2001).
- 경북일보 홈페이지, [http://www.kyongbuk.co.kr/main/news/news\\_content.php?id=158136&news\\_area=110&news\\_divide=11002&news\\_local=20](http://www.kyongbuk.co.kr/main/news/news_content.php?id=158136&news_area=110&news_divide=11002&news_local=20)(2007).
- 송희봉, 이은영, 도화석, 정철수, 신동찬, 이명숙, 백윤경, 전성숙, 신원식, "대구지역 도로 먼지에 함유된 미량원소 성분과 오염원 평가," 대한환경공학회지, **29**(7), 793~800(2007).
- 송희봉, 도화석, 이명숙, 신동찬, 윤호석, 박진희, 정철수, 강제형, "대구지역 학교먼지에 함유된 미량원소성분 분석과 오염원 평가," 대한환경공학회지, **29**(12), 1390~1399(2007).
- 대구광역시지하철공사 홈페이지, [http://www.daegusubway.co.kr/source/menu2/p\\_menu2\\_2\\_3.html](http://www.daegusubway.co.kr/source/menu2/p_menu2_2_3.html), 운영현황(2008).
- 기상청 홈페이지, <http://www.kma.go.kr/intro.html>, 기후자료(2008).
- Ordóñez, A., Loredó, J., De Miguel, E., and Charlesworth, S., "Distribution of heavy metals in street dust and soils of an industrial city in Northern Spain," *Arch. of Environ. Contam. and Toxicol.*, **44**, 160~170(2003).
- 백성욱, 송희봉, 신동찬, 홍성희, 장혁상, "대구지역 공중위생법 규제대상시설의 실내공기 중 입자상오염물질의 계절별 및 지점별 농도분포 특성," 한국대기보전학회지, **14**(3), 163~175(1998).
- Rahn, K. A., "Sources of trace elements in aerosols-an approach to clean air," Ph. D. Thesis, University of Michigan, Ann Arbor, 325(1971).
- Taylor, S. R. and McLennan, S. M., "The Continental Crust : Its Composition and Evolution," Blackwell Sci., Cambridge, Mass, 46~47(1985).
- Watson, J. G., "Transections receptor models in air resources management," An international specialty conference, San Francisco, California, 491(1988).
- 최진수, 황승만, 백성욱, "대구지역 대기 중 부유먼지에 함유된 화학성분의 입도별 분포 특성," 대한환경공학회지, **17**(12), 1245~1259(1995).
- 최성우, 송형도, "대구지역 부유분진 중 미량금속성분의 발생원 특성연구," 한국대기환경학회지, **16**(5), 469~476(2000).
- Christer, J. and Per-Ake, J., "Particulate matter in the underground of Stockholm," *Atmos, Environ.*, **37**, 3~9(2003).
- Novotny, V. and Chester, G., Handbook of nonpoint pollution source and managements. Van Nostrand Reinhold, New York(1981).
- 나덕재, 이병규, "산업도시 대기 중 PM10의 농도 및 금속원소 성분의 특성 연구," 한국대기환경학회지, **16**(1), 22~35(2000).
- 최형욱, 황인조, 김신도, 김동술, "분진의 개수농도 및 질량농도에 입각한 서울시 지하철 역사내 오염원의 기여도 결정," 한국대기환경학회지, **20**(1), 17~31(2004).
- 서울특별시 지하철공사, 서울시 지하철 환경개선 방안 연구(1998).
- 환경부, 토양환경보전법(2008).
- Phillips, J. L., Field, R., Goldstone, M., Reynolds, G. L., Lester, J. N., and Perry, R., "Relationships between indoor and outdoor air quality in four naturally ventilated office in the United Kingdom," *Atmos, Environ.*, **27A**, 1743~1753(1993).