

서울 지하철 내 공기 중 먼지의 특성에 관한 연구

김진경[†] · 백남원

서울대학교 보건대학원 환경보건학과

A study on Characteristics of Airborne Dusts in Seoul Subway Stations

Jin Kyoung Kim[†] · Nam Won Paik

Department of Environmental Health, School of Public Health, Seoul National University, Seoul, Korea

(Received April 12, 2004; Accepted June 22, 2004)

ABSTRACT

The purpose of this study was to evaluate airborne concentrations and characteristics of TSP, IPM, TPM and RPM in Seoul subway stations. Sampling was performed at 14 stations from April 11 to 29, 2002. Size-selective dust concentrations and metal concentrations were measured by gravimetric method and ICP-AES, respectively. The geometric mean of TSP, IPM, TPM and RPM concentrations in Seoul subway stations were $176 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $348 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $158 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $104 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. Dust concentrations in pathway were the highest and those in lobby were the lowest. The size distribution of dusts was significantly different by location of collection. When the deposition rate into pulmonary gas exchange region was estimated by size distribution, the deposition rate of dust collected from platform was higher than those of dust collected from lobby and pathway. The lower the basement levels were, the higher the deposition rates of dusts into tracheobronchial region and gas exchange region were. Copper and iron concentrations measured in platform higher were than those in other areas.

Keywords: Total suspended particulate(TSP), Inhalable particulate mass(IPM), Thoracic particulate mass(TPM), Respirable particulate mass(RPM), Head airway region(HAR), Tracheobronchial region(TBR), Gas exchange region(GER), Metals, Subway stations

I. 서 론

생활 시간의 대부분을 가정, 일반 사무실, 자동차 그리고 지하철 등의 실내에서 생활하는 현대인들에게 실내 공기 질은 건강에 영향을 미치는 중요한 요소가 되었으며, 이러한 실내 공기 질의 중요성은 국제적인 환경문제로 대두되고 있다. 특히, 지하철은 현재 중요한 대중 교통 수단으로 지하철을 이용하는 승객이 노인과 어린이를 포함한 일반 대중이기 때문에 지하철 역사의 공기 질은 국민 건강과 밀접한 관계를 가진다고 할 수 있다.

현재 우리나라는 실내 공기 질에 대한 관심을 가지고

2003년 환경부의 지하생활공간공기질관리법을 다중이용시설등의실내공기질관리법으로 개정하여 올해부터 시행하고 있다. 다중이용시설등의실내공기질관리법시행규칙에서는 먼지, 일산화탄소, 이산화탄소, 라돈, 석면 그리고 포름알데히드 등 10가지 물질을 실내공간오염물질로 규정하고 실내 공기질 기준을 쾌적한 공기질을 유지하기 위하여 반드시 지켜야 하는 유지기준과 이와는 별도로 일정기준에 따르도록 권고하는 권고기준으로 이원화하였으며 건물의 종류, 주요관리대상, 그리고 오염물질 특성에 따라 관리법을 차별화하여 관리상의 효율성을 확보하는 등 실내 공기질의 관리를 보다 구체적으로 시행하도록 하고 있다. 이 가운데 먼지는 공기역학적 직경이 $10 \mu\text{m}$ 인 PM10의 농도를 지하철역사, 지하철상가 그리고 대합실등은 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, 의료 시설이나 보육시설 등은 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, 그리고 실내 주차장은 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하를 유지하도록 하고 있다.¹⁾

[†]Corresponding author : Department of Environmental Health, School of Public Health, Seoul National University
Tel: 82-011-9951-2396, Fax: 82-2-989-2396
E-mail : jinkyoun74@hotmail.com

먼지란 직경이 0.01~수백 μm 에 달하는 광범위한 크기를 가지고 있는 입자상 물질로서 입자 직경에 따라 인체 내에서 작용하는 기전이 달라진다. 호흡을 통해 인체에 흡입되는 먼지는 입자 직경이 10 μm 이하이며 이중 5 μm 이상의 먼지는 호흡할 때 코나 기관지를 통해 걸러지지만 2 μm 이하의 먼지는 폐의 깊은 곳까지 들어갈 수 있으며,²⁾ 미세 먼지의 성분은 1차 생성먼지가 대기 중에서 화학반응을 일으켜 생성된 2차 생성물질과 연료의 연소과정이나 자동차 배기가스, 그리고 산업공정에서 생성되는 화학물질들로서 인체나 환경에 더욱 위해하고 천식, 기관지염, 그리고 호흡기관과 같은 호흡기계 질환을 일으킬 수 있다고 알려져 있다.³⁾ 또한, 흉곽성 입자의 노출은 사람들의 사망률이나 병원 입원률을 높일 뿐 아니라 먼지나 입자상 물질로 존재하는 먼지 내 중금속들은 호흡기계와 심혈관계 그리고 심폐 기관에 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다.^{4,5)}

실제로 사람이 흡입하는 입자상 물질은 입자의 크기, 공기의 유속, 그리고 바람의 방향과 작업자의 폐 활량 등에 따라 결정되어지며 채취방법도 사람의 건강에 미치는 영향을 고려하여 결정되어야 한다. 미국 정부산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienist, ACGIH)에서는 먼지를 입자 크기에 따른 인체 건강 영향을 고려하여 구분하며, 먼지가 흡입되었을 때 호흡기의 모든 영역에 침착하여 독성을 나타낼 수 있는 먼지를 흡입성 입자상 물질(Inhalable particulate mass, IPM)라 정의하고, 폐기관지와 폐포에 침착되어 독성을 나타낼 수 있는 먼

지를 흉곽성 입자상 물질(Thoracic particulate mass, TPM)로, 그리고 가스교환부위인 폐포에 침착되어 독성을 나타낼 수 있는 먼지를 호흡성 입자상 물질(Respirable particulate mass, RPM)로 세분하여 정의하고, 각 입자상 물질에 대한 침착 효율 곡선을 제시하였다(Fig. 1).^{2,6,7)}

지하철 역사 내 공기 중 존재하는 먼지의 특성에 관한 연구는 과거부터 계속 이루어지고 있으나 대부분의 연구가 PM10과 총 먼지(Total suspended particulate, TSP)에 대한 것으로 인체의 노출 영향을 고려한 sampler를 사용하여 이루어진 조사는 미비한 실정이다. 그러므로 인체의 건강 영향을 고려한 ACGIH의 침착 효율 곡선과 동일한 채취 효율을 갖는 sampler를 이용하여 각 지하철 역사에 존재하는 먼지를 채취, 분석함으로써 입자 크기에 따라 인체 기관에서의 침착 기전이 다르게 작용되는 먼지의 노출 특성을 알아볼 필요가 있을 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 ACGIH의 입자 크기에 따른 채취 방법을 적용하여 지하철 역사의 실내 공간에서 발생하는 먼지의 입자 크기에 따른 특성을 파악하여 실내 공기 질 관리 방안에 대한 기초자료를 제시하고자 한다.

II. 연구 방법

1. 대상

본 연구는 2002년 4월 11일부터 4월 29일까지 서울시 지하철 1호선에서부터 4호선까지의 14개 환승역을 대상으로 하여 먼지를 측정하였다. 현재 서울시 지하철은 8호선까지 확대되었으나, 5호선부터 8호선까지는 최근에 설립되어 노선의 노후화에 차이가 있을 것으로 판단하여 본 연구에서 제외하였다. 먼지의 채취는 시료 채취 대상 역의 대합실과 승강장을 적어도 1곳 이상씩 포함하도록 채취장소를 선정한 다음 실내에 존재하는 먼지의 전반적인 농도를 반영할 수 있도록 실내 중앙에서 실시하였다.

2. 방법

1) 먼지의 채취 및 분석

총 먼지는 미국국립산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)의 공정시험법 0500에 따라 37 mm closed face cassette에 공극이 5.0 μm 인 37 mm PVC 여과지(SKC, USA)를 장착한 후 Personal Air Pump(Gilian, USA)에 연결하여 2.0 l/min의 유량으로 채취하였다. 흡입성 입자상 물질과 흉곽성 입자상 물질, 그리고 호흡성 입자상

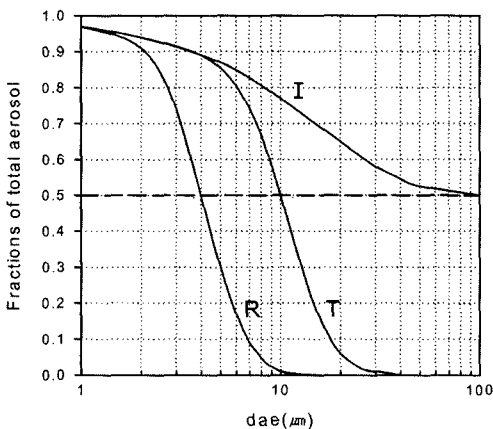


Fig. 1. Conventional particle size-selection curves for the inhalable fraction(I), the thoracic fraction(T) and the respirable fraction(R).^{2,7)}

물질의 sampler는 ACGIH의 침착 효율에 적합한 채취 효율을 갖는 sampler를 선정하였다. 흡입성 입자상 물질은 IOM inhalable dust sampler(SK, USA)에 공극이 5.0 μm인 25 mm PVC 여과지(SK, USA)를 장착시킨 후 pump에 연결하여 2.0 l/min 유량으로 채취하였고, 흉곽성 입자상 물질은 GK 2.69 Respirable/Thoracic cyclone(BGI, USA)에 37 mm PVC 여과지를 장착한 후 pump에 연결하여 1.6 l/min로 채취하였다. 마지막으로 호흡성 입자상 물질은 Aluminum cyclone(SK, USA)에 37 mm PVC 여과지를 장착한 다음 pump에 연결하여 2.5 l/min로 채취하였다. Pump의 유량은 유량보정계(Gilian, USA)를 이용하여 각 시료의 채취 효율에 알맞게 조절하고 사용 전, 후에 기구 보정을 실시하였다. 먼지 시료는 사람의 호흡기 위치인 1.5~2 m 높이에서 side-by-side로 8시간 이상 채취하였으며, 각 sample에 의하여 채취된 먼지의 양은 NIOSH 공정시험법인 중량법(Gravimetric Method)을 이용하여 분석하였다.⁸⁾ 여과지는 사용하기 전후에 24시간 이상 데시케이터에 보관하여 습기의 영향을 최소화하였으며 정전기를 제거한 후 0.01 mg의 분해능을 가진 Elctric Auto Balance(Satorious, Germany)를 이용하여 측정하였다. 먼지의 농도는 채취 전후의 여과지 무게를 측정 한 후 채취 후 여과지 무게에서 채취 전 여과지 무게를 빼서 이를 통과시킨 공기의 양으로 나누어 계산하였으며 운반이나 이동 중 시료의 오염 등에 따른 오차를 감안하기 위하여 1회 측정 시 측정여과지 수의 10% 이상의 공시료를 사용하여 보정하였다.

2) 중금속의 분석

먼지에 포함되어 있는 중금속은 인체 호흡기 모든 부분에 영향을 미치는 흡입성 입자상 물질을 채취한 filter를 중량 분석한 후 사용하였다. 여과지는 NIOSH 공정시험법 7300에 의하여 회화시킨 후 ICP-AES(Perkin Elmer Optima 3000DV, USA)를 이용하여 납, 비소, 크롬, 그리고 카드뮴을 포함한 11가지 중금속을 분석하였다. 회화 방법은 시료가 채취된 filter와 3.5%의 염산 용액 10 ml을 비커에 넣고 filter가 완전히 잠기게 하여 watch glass를 덮은 후 24시간 이상 방치하여 중금속이 산 용액에 의하여 추출되는 방법을 사용하였다.⁹⁾ 또한 과거 지하철 역사에서 이루어진 중금속 측정 결과^{5,6,14)}를 바탕으로 3가지 농도 수준의 회수를 검정 시료와 공시료를 준비하여 모든 분석 과정에서 발생할 수 있는 오차를 보정하였다.¹⁰⁾ 회수를 검정시료에 의하여 얻어진 회수율은 각 물질에 따라 약간씩 차이가 있었으나 0.91~1.07로 나타났다.

III. 결과 및 고찰

1. 먼지의 농도 및 성분 특성

1) 서울시 지하철 역사 내의 먼지 농도 분포

서울시 지하철 역사에서 측정된 입자별 크기에 따른 먼지들의 농도 분포를 알아본 결과 Fig. 2에서와 같이 모든 종류의 먼지들이 대수정규분포를 하였다. 각 크기 별 먼지의 농도 범위는 총 먼지 56~427 μg/m³, 흡입성 입자상 물질 68~677 μg/m³, 흉곽성 입자상 물질 16~428 μg/m³, 그리고 호흡성 입자상 물질 23~274 μg/m³이었으며, 각 먼지의 기하 평균 농도(Geometric mean, GM)를 살펴보면 총 먼지가 176 μg/m³이었고, 흡입성 입자상 물질과 흉곽성 입자상 물질, 그리고 호흡성 입자상 물질의 농도는 각각 348 μg/m³, 158 μg/m³, 그리고 104 μg/m³이었다(Table 1).

2) TSP와 IPM Sampler의 채취효율 비교

총 먼지에 대한 개인 노출을 측정하기 위해서 37 mm 플라스틱 카세트가 주로 사용되어지고 있으나 이 sampler의 채취 효율은 인체에 흡입되는 먼지의 양을 과소 평가하는 것으로 밝혀지고 있어 개인의 흡입성 입자상 물질에 대한 노출을 측정하기 위하여 the Institute of Occupational Medicine(IOM)의 sampler의 사용을 권장하고 있다.¹¹⁻¹³⁾ 이 두 가지 sampler들에 의하여 채취된 먼지의 양을 비교하여 본 결과 Fig. 3에서

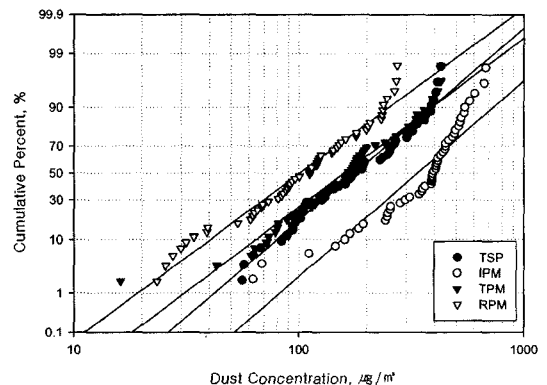


Fig. 2. Distribution of dust concentrations in subway stations.

Table 1. Dust concentrations in Seoul subway stations by type

	TSP	IPM	TPM	RPM
N	52	51	54	53
GM(μg/m ³)	176	348	158	104
GSD	1.7	1.6	1.9	1.9
Range(μg/m ³)	56~427	63~677	16~428	23~274

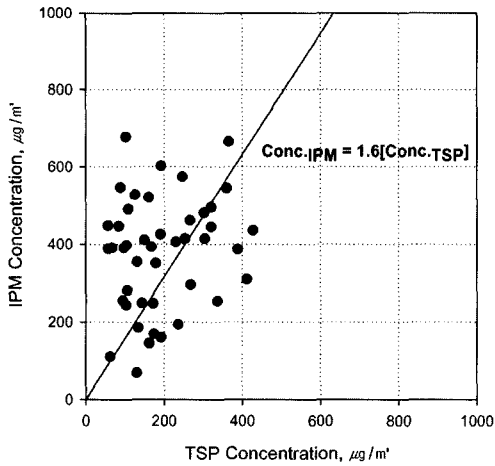


Fig. 3. Correlation between TSP and IPM.

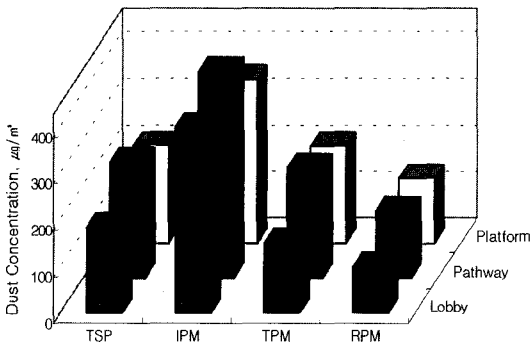


Fig. 4. Dust concentrations by sampling site.

와 같이 IOM sampler에 의하여 채취된 흡입성 입자상 물질의 농도가 37 mm 플라스틱 카세트에 의하여 채취된 총 먼지의 농도보다 0.75~6.7배 높게 나타났으며, 평균적으로 1.6배 정도 높았다. 이 두 Sampler의 채취 효율에 관한 비교 논문에서는 흡입성 입자상 물질을 채취하는 IOM sampler가 총 먼지 sampler보다 0.67~6.7배까지 채취 효율을 가지고 있는 것으로 알려져 있어¹²⁾ 본 연구에서의 결과가 과거 연구 자료와 비슷한 결과를 나타내었다.

3) 측정 장소에 따른 먼지의 특성

Fig. 4는 각 채취장소에서 측정된 먼지의 농도를 나타낸 것으로 환승로에서 모든 종류의 먼지 농도가 가장 높게 나타났다. 환승로는 끊임없는 사람들의 왕래와 환승로 주변 상가에서의 활동으로 인하여 먼지의 발생 가능성과 침착되어 있는 먼지의 비산 가능성, 그리고 노출 위험이 높아진 것으로 판단된다.

본 연구에서 사용된 sampler들의 특성은 먼지가 인체

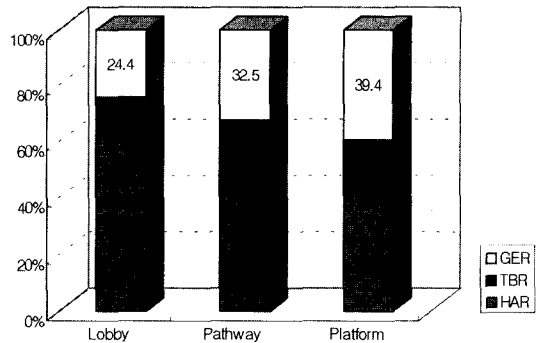


Fig. 5. Regional deposition ratios of dusts by sampling site (HAR=Head airway region ; TBR=Tracheobronchial region ; GER=Gas exchange region).

에 침착하는 특성과 유사하므로 각 sampler에 의하여 채취된 먼지의 양을 사용하여 인체 호흡기의 각 영역에 침착되는 먼지 수준을 예측할 수 있다. 즉, 흡입성 입자상 물질의 농도는 전체 호흡기에 침착된 먼지의 양을 나타내며, 흡입성 입자상 물질의 농도에서 흉곽성 입자상 물질의 농도를 제외한 것은 상기도 영역에 침착된 먼지의 양이라 할 수 있다. 그리고, 흉곽성 입자상 물질의 농도에서 호흡성 입자상 물질의 농도를 제외한 것은 폐기관지 영역에 침착된 먼지의 양이며, 호흡성 입자상 물질의 양은 가스 교환 부위인 폐포에 침착되어지는 먼지의 양이라 할 수 있다. 본 연구에서는 대합실, 승강장, 그리고 환승로에 존재하는 먼지가 인체 호흡기의 각 영역에 침착되어지는 정도를 평가해보았다. 그 결과, 대합실에 존재하는 먼지는 60%가 상기도 영역에 침착 되어지며, 승강장과 환승로에 존재하는 먼지는 대합실에 존재하는 먼지보다 폐포 영역에 침착 되어지는 비율이 높았다. 특히, 승강장에 존재하는 먼지 중 40%가 폐포에 침착할 수 있는 것으로 나타나 인체의 폐 깊은 곳까지 작용할 수 있는 먼지의 비율이 대합실이나 환승로에 존재하는 먼지보다 높음을 나타내었다(Fig. 5). 미세먼지의 인체 영향에 대한 조사는 현재 미비한 상태이나 총먼지 중 미세먼지가 차지하는 비율이 높을수록 인체에 천식, 호흡기계 질환, 그리고 심혈관계와 심폐기관의 질환을 악화시키거나 높이는 것으로 나타났으며, 특히 노인들의 사망률을 높이는 것으로도 나타났다.^{4,5,14)} 승강장이나 환승로에는 신문과 복권등을 판매하는 상인들과 주변 상가의 상인들이 하루 종일 상주하는 경우가 많아 지하철 역사의 공기질을 제어하는 것은 매우 중요한 일이라 판단되어진다. 그러므로, 승강장이나 환승로에 존재하는 미세먼지를 제어하기 위한 노력이 더욱 필요하다.

4) 지하 층수에 따른 먼지의 특성

미세 먼지는 2차 생성물질과 연소과정이나 배기가스 등에서 배출되는 화학물질로 구성되어 있기 때문에 외기의 영향을 받을 것으로 생각되어지는 지하 1층에서의 미세먼지 농도가 다른 층보다 높을 것으로 기대되었다. 그러나, 본 연구에서는 Fig. 6에 나타난 것처럼 총 먼지와 흡입성 입자상 물질의 농도는 층수에 따라 차이가 없었으나($p>0.1$), 입자크기가 작은 미세 먼지는 층수가 내려갈수록 유의하게 높았다($p<0.05$).

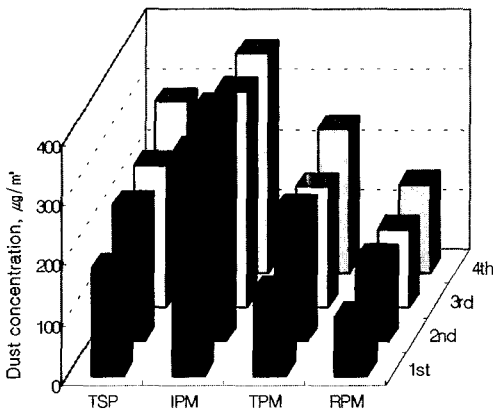


Fig. 6. Dust concentrations by basement level.

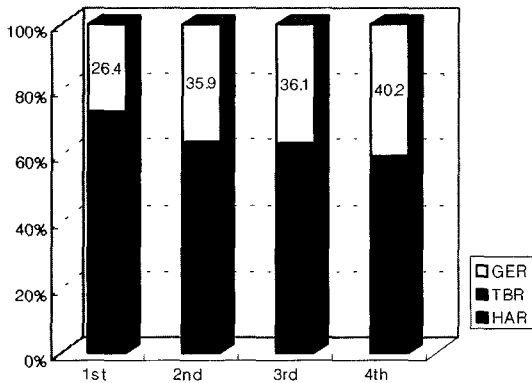


Fig. 7. Regional deposition ratios of dusts by basement level (HAR=Head airway region ; TBR=Tracheobronchial region ; GER=Gas exchange region).

Fig. 7은 각 층에 존재하는 먼지가 인체 호흡기의 각 영역에 침착되는 비율을 알아본 것이다. 본 결과에 의하면 지하 층수가 아래로 내려갈수록 상기도에 침착되는 먼지의 비율은 낮아지는 반면, 폐기관지와 가스 교환 부위인 폐포 영역에 침착되는 먼지의 비율은 유의하게 높아졌다($p<0.05$). 과거 연구 결과를 고찰해 본 결과, 외기에서의 미세 먼지(공기 역학적 직경 $<3.3\ \mu\text{m}$)의 비율이 지하철 내부의 미세 먼지 비율보다 높게 나타난 경우¹⁵⁾와 반대로 PM10의 농도가 외기보다 오히려 지하철 역사 내에서 높게 측정된 경우가 있었다.^{16,17)} 이러한 자료와 본 연구의 결과는 지하철 내부에 미세 먼지의 발생원이 존재할 가능성을 제시하고 있으며, 지하철 역사내에서 미세먼지의 발생원을 규명하는 보다 세심한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

2. 먼지의 성분 특성

1) 먼지 내 중금속의 분포 및 농도 특성

먼지의 성분을 알아보기 위하여 11종의 중금속을 분석하였다. 베릴륨과 니켈은 모든 시료에서 불검출되었고, 비소는 대부분의 시료에서 불검출되었다. 나머지 8가지 물질은 Fig. 8과 같이 대수 정규 분포하였다. Table 2는 각 중금속의 농도를 나타낸 것이다. 중금속은 현재 환경부의 다중이용시설등의 실내공기질관리법에 유지기준이나 권고기준을 가지고 있지 않다. 이렇게

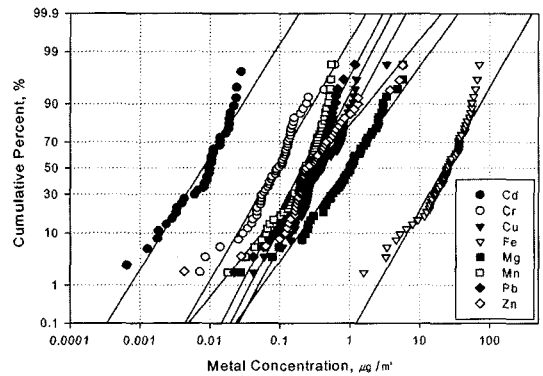


Fig. 8. Distribution of metal concentrations in subway stations.

Table 2. Metal concentrations in seoul subway stations

	Cd	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Pb	Zn
N	36	50	51	51	51	51	51	49
GM($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.008	0.09	0.40	22.1	0.90	0.21	0.28	3.31
GSD	2.5	2.4	2.3	2.3	2.9	2.2	2.2	3.3
Range($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.001~0.03	0.007~0.61	0.04~3.4	1.7~71.0	0.03~5.7	0.02~0.55	0.02~1.2	0.004~5.7

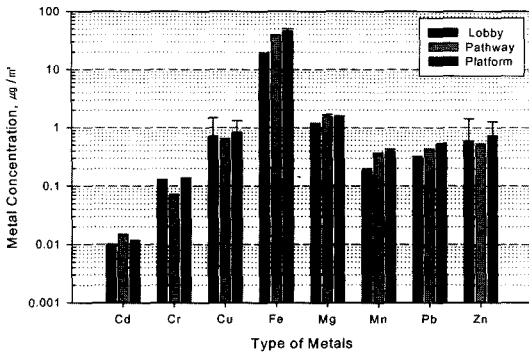


Fig. 9. Metal concentrations by sampling site.

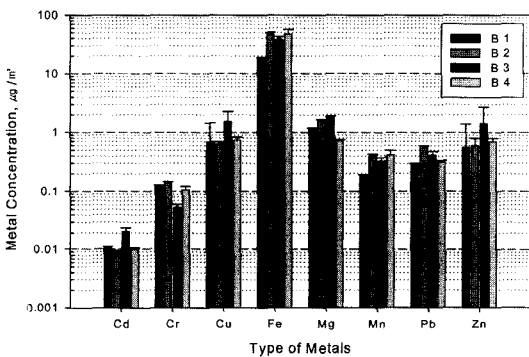


Fig. 10. Metal concentrations by basement level.

기준이 정하여 있지 않은 물질에 대해서는 ACGIH의 최대허용한계치(Threshold Limit Value, TLV)의 1/10을 임시 지침으로 채택하는 것이 일반적인 경향이므로 본 연구에서는 나머지 중금속의 기준을 TLV의 1/10으로 정하여 대기 중 중금속 농도를 비교하여 보았으며 그 결과, 모든 중금속의 농도수준이 기준을 초과하지 않았다.

2) 측정 장소에 따른 중금속의 농도

대합실, 환승로, 그리고 승강장에서의 중금속 농도는 살펴보면, 승강장에서 구리와 철, 그리고 아연의 농도가 다른곳에 비해 높게 나타났다(Fig. 9). 우리나라 지하철 전동차와 관련되어 발생하는 중금속을 살펴보면, 철로와 바퀴 및 전선등을 발생원으로 하는 철과 구리가 각각 95%와 3%를 차지하며, 그 밖의 망간과 칼슘, 알루미늄등이 나머지를 차지하고 있는 것으로 조사되어¹⁸⁾ 이러한 성분들이 승강장에서의 중금속 농도에 영향을 준 것으로 판단된다.

3) 지하 층수에 따른 중금속의 농도

지하철 역사의 층수가 아래로 내려갈수록 중금속의 농도는 높은 경향을 나타냈다. 특히, 1층의 경우는 과거

자료들에서 지하철 역사보다 외기에서 높게 나타나거나 대합실에서의 농도가 승강장에서보다 높게 나타나 유연 휘발유를 사용했던 차량들에 의하여 오염된 외기의 영향을 받았던 것으로 조사되어졌다.^{15,19)} 그러나, 본 연구에서는 남이 각 지하층에서의 농도나 대합실과 승강장에서의 비교 분석 결과에서 서로 차이가 없는 것으로 나타났다($p>0.1$). 이것은 현재에는 과거와 달리 무연 휘발유가 사용되고 있어 남이 더 이상 외기의 오염 지표가 될 수 없음을 나타낸다고 할 수 있다.

IV. 요약 및 결론

우리나라의 중요한 대중 교통 수단으로 자리잡은 지하철은 하루에도 수백만 명의 사람이 이용하여 지하철 역사의 공기질은 국민 건강과 밀접한 관계를 가지고 있다. 본 연구에서는 이러한 지하철 역사에 존재하는 먼지의 노출 특성과 먼지의 구성 성분인 중금속의 농도를 파악하여 국민 건강과 관련된 지하철 역사의 공기질에 관한 기초 자료를 제공하고자 가장 초기에 설립된 지하철 1호선부터 4호선까지 14개의 환승역을 대상으로 각 층에서의 먼지와 중금속의 농도를 분석·평가하였다. 그 결론은 다음과 같다.

1. 입자 크기별 먼지는 모두 대수정규분포를 하였으며, 각 먼지의 기하평균은 TSP가 176 µg/m³, IPM이 348 µg/m³, TPM이 158 µg/m³, 그리고 RPM이 104 µg/m³이었다.
2. 채취 장소에 따른 먼지 농도는 환승로 > 승강장 > 대합실 순이었으며 미세 먼지인 TPM과 RPM의 농도는 지하 1층에서의 농도가 지하 2, 3, 4층에서의 농도에 비하여 유의하게 낮았다($p<0.05$).
3. 채취 장소에 존재하는 먼지에 대한 인체 침착 가능성을 비교해 보면, 대합실과 환승로에 존재하는 먼지보다 승강장에 존재하는 먼지가 가스 교환부위인 폐포에 침착될 가능성이 더 높게 나타났다.
4. 지하 층수가 아래로 내려갈수록 상기도에 침착되는 먼지의 비율은 낮아지는 반면, 폐기관지와 폐포에 침착되는 먼지의 비율은 높아졌다.
5. 먼지내 존재하는 중금속은 모두 대수 정규분포를 하였으며, 승강장에서는 전동차와 철도, 그리고 전선을 발생원으로 하는 철과 구리의 농도가 대합실과 환승로에 비해 높게 나타났다.

지하철은 건강한 성인 뿐만 아니라 면역 체계가 연약한 어린이와 노인들도 자주 왕래하며 현재에는 지하철 역사에 상가가 급속히 증가하여 역사의 지하 공간에서 활동하는 사람들의 건강 문제와 더불어 지하철 역사의

실내 공기질은 상당히 중요한 보건학적 관심의 대상이 될 수 있을 것으로 기대되어진다. 본 연구 결과, 우리나라 지하철 역사의 실내 먼지의 농도는 인체의 호흡기에 침착하여 천식, 기관지염, 그리고 호흡곤란과 같은 호흡기계 질환을 일으킬 수 있는 수준이라고 판단되어진다. 특히, 지하 층 수로 내려갈수록 미세먼지의 농도가 높아지고 있으므로 지하철 역사 내 공기질은 보다 정확한 환기 성능 평가를 통하여 환기 수준을 높임과 더불어 지하 역사에 존재하는 미세 먼지의 발생원을 규명함으로써 보다 깨끗하게 제어되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2001-00227) 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 환경부 : 다중이용시설등의실내공기질관리법시행규칙. 환경부령 제 156호, 2004.
2. Lippmann, M. : Rationale for particle size-selective aerosol sampling. In: Vincent, J. H.(eds) Particle size-selective sampling of particulate air contaminants. ACGIH, 3-27, 1999.
3. U.S. Environmental Protection Agency(EPA) : PM 2.5 Ambient Air Quality Monitoring Program. Region 4, SESD, Athens, Georgia, EPA, 2002.
4. Chapman, R. S., Watkinson, W. P., Dreher, K. L. and Costa, D. L. : Ambient particulate matter and respiratory and cardiovascular illness in adults: particle-borne transition metals and the heart-lung axis. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, **4**, 331-338, 1997.
5. Voutsas, D. and Samara, C. : Labile and bioaccessible fractions of heavy metals in the airborne particulate matter from urban and industrial area. *Atmospheric Environment*, **36**, 3583-3590, 2002.
6. 백남원 : 산업위생학개론. 신광출판사, 서울, 115-126, 2000.
7. American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) : Appendix D - Particle size-selective sampling criteria for airborne particulate matter, in annual reports of the committees on threshold limit value and biological exposure indices. ACGIH, 73-76, 2002.
8. U.S. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) : NIOSH manual of analytical Methods 4th ed. Method No. 0500 and 7300. Ohio, NIOSH, 1998.
9. 손두영, 김현욱 : 용접흡내 중금속분석시 전처리 방법별 효율비교. 한국산업위생학회지, **9**, 135-144, 1999.
10. 백남원, 박동욱, 윤충식, 신용철 : 작업환경 측정 및 평가. 신광출판사, 서울, 162-198, 2002.
11. Vincent, J. H. : Progress toward implementation of new aerosol industrial hygiene standards, with special reference to the aluminium industry. *The Science of the Total Environment*, **163**, 3-9, 1995.
12. Werner, M. A., Spear, T. M. and Vincent, J. H. : Investigation into the Impact of Introducing Workplace Aerosol Standards Based on the Inhalable Fraction. *The Analyst*, **121**, 1207-1214, 1996.
13. Emange, M., Görner, P., Elcabache, J. M. and Wrobel, R. : Field Comparison of 37 mm Closed-Face Cassettes and IOM Samplers. *AOEH*, **17**(3), 200-208, 2002.
14. Englert, N. : Fine particles and human health-a review of epidemiological studies. *Toxicology Letters*, **149**, 235-242, 2004.
15. 김동술, 김신도, 김윤신, 신용배, 이태정 : 서울시 지하철역내 분진 오염원의 정량적 기여도의 결정. 대한환경공학회지, **16**(3), 309-319, 1994.
16. 서울시정개발연구원 : 서울시 지하철 환경개선 방안 연구. 서울특별시 지하철공사, 122-192, 1998.
17. 이태정, 김동술, 김신도, 김윤신, 신용배 : 서울시 지하철역의 분진의 농도분포 및 화학적 조성에 관한 연구. 대한환경공학회 춘계학술연구발표회 논문초록집, 53-55, 1993.
18. 김원규 : 지하철분진 무기원소 분석을 통한 분진 발생원 양적 기여도 추정. 서울대학교 환경대학원 도시계획학석사학위논문, 1998.