

서울지역 지하철역의 공기 중 오염인자의 노선별 분포 특성

김민영 · 리승훈 · 신도철 · 한규문 · 최금숙 · 정일현*

서울시 보건환경연구원, *단국대학교 화학공학과

Distribution Characteristics between Line and Line for Indoor Air Pollutant Factors at Subway Stations in Seoul Area

Min Young Kim, Seung Hoon La, Do Chul Shin, Kyu Mun Han
Keum Suk Choi and Il Hyun Chung*

Seoul Metropolitan Government Institute of Health and Environment
*Department of Chemical Engineering, Dankook University

ABSTRACT

A comprehensive air quality monitoring was carried out to investigate the criteria concentration of air pollutant in indoor of subway stations of Seoul City. The samples were collected twice per year (the first and the second half of the year) at each sampling point from February to September in 1997. Sampling point of subway stations was ticket office and platform. The measurement of indoor air pollutants such as sulfur dioxide(SO₂), nitrogen dioxide(NO₂), carbon monoxide(CO), carbon dioxide(CO₂), total suspended particulate(TSP) was performed to determine the indoor air quality. Heavy metals(Pb, Cd, Cu, Cr, As, Hg) were also measured together with those air pollutants. The annual average concentration of CO₂ and TSP in subway stations were relatively high while those of heavy metals were within 10% of environmental recommended standard concentration in all stations. As results of regression analysis between line and line of air factors, the concentrations of CO, CO₂, TSP, Pb, Cd, Cr and Cu were highly correlated, but those of SO₂, NO₂ and Hg were not correlated. As results of regression analysis between ticket office and platform, the concentrations of heavy metals such as Cr and Cu were highly correlated. Results of oneway analysis of variance between the first and the second half of the year air factors also indicated that CO, CO₂, Cd, Cu, Hg were significant($\alpha=0.01$), respectively. The average conotation of total suspended particulate(TSP) in subway line No. 1 was shown high concentration(200 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{day}$) level.

Keywords : Indoor air quality, Environmental recommended standard concentration, Total suspended particulate

I. 서 론

도시 인구의 증가와 함께 생활수준의 향상에 따른 차량의 폭발적인 증가는 교통의 극심한 혼잡을 유발함과 아울러 대기오염을 가속화시켜 국민건강에 커다란 위협을 끼치는 요인으로 작용하고 있다(권우택, 1994). 이런 혼잡한 도심교통의 원활한 소통과 오염도를 감소시키는 대책의 일환으로 수도권 지역에서는 지하철을 적극적으로 개발해 왔으며, 그 결과 수도권 지역의 지하철은 5개 노선이 운행 중에

있고 2개 노선이 부분 개통 운행 중이며 1개 노선은 공사 중에 있다. 총 연장 277.9 km에 1일 이용자가 약 470만명에 이르고 있고, 현재 운행 중인 총 역사 198개 중에서 22개가 지상구간이고, 176개가 지하에 위치하고 있다. 2000년에는 총 263개 역사가 개통 운영될 예정이다.

이러한 지하철 노선의 확충은 지하공간을 인간의 새로운 활동 영역으로 확대시키면서 지하철 공기질이 인간의 건강에 위해한 영향을 직·간접적으로 줄 수 있다(Perry 외, 1994)는 보고와 같이 지하공간

오염이라는 새로운 문제를 야기하고 있다.

지하철에서의 오염물질은 크게 가스상 물질과 입자상 물질로 분류할 수 있다. 이들 농도는 환기에 따른 실외 공기질과 실내 배출원에 의하여 영향을 받는다고 보고되었다(Phillips 외, 1993).

이에 따라 본 연구는 지하철 역사의 실내 공기질 파악을 목적으로 각 노선별 오염물질 농도를 파악하여 각 오염인자간의 상관성을 도출해 내고자 하였다.

II. 실험 방법

1. 노선별 시료채취 위치 및 기간

서울시를 운행하는 지하철 노선별 오염 인자의 분포 특성을 파악하기 위해 Table 1과 같이 1호선 3개역, 2호선 5개역, 3·4·5호선 각 4개역을 측정 대상으로 선정하여 각 역의 매표소와 승강장을 1997년 2월에서 3월까지와 1997년 7월에서 10월까지 상반기와 하반기로 구분하여 오전과 오후로 나누어 매역사당 3일간씩 연속하여 측정 및 시료를 포집, 조사하였다.

2. 분석 대상 및 방법

선정된 각 지점별로 가스상물질, 중금속물질, 총부유먼지(Total Suspended Particulate, TSP)로 구분하여 오염성분을 분석하였으며, 가스상물질은 SO₂, NO₂, CO, CO₂를 포함한 4가지 성분, 중금속물질은 Pb, Cd, Cr, Cu, As, Hg를 포함한 6가지 성분에 대해 분석하였고, 시청역 등 11개 역사에서는 PM-10, 온도, 습도, HCHO 그리고 석면 등의 항목을 추가하였다. 항목별 분석방법 및 기기에 관해 Table 2에 기술하였다(National R. C., 1981).

1) 아황산가스(SO₂)

연료의 연소 과정에서 발생하는 대기오염물질 중 SO₂는 연료 중에 포함되어 있는 황성분이 공기중의 산소와 결합하여 형성되며(박일수 외, 1991) 대기중에서 산화되고, 수분과 결합하여 강산화성의 황산

(H₂SO₄)이 되어 동식물의 건강에 악영향을 끼치며 건축물을 부식시킨다. 특히 호흡기계의 점막에 자극을 주며 기관지염과 폐기종 같은 만성호흡기 질환을 유발하는 것으로 알려져 있다(Stern 외, 1984). 아황산가스의 분석은 gas sampling bag에 시료를 채취하여 U.V. Fluorescence method로 ppm까지 정량하였다. 아황산가스의 환경기준농도는 0.15 ppm/day로 정해져 있다.

2) 이산화질소(NO₂)

이산화질소는 NO, NO₂, N₂O 등과 더불어 질소산화물질이며, 대기중의 탄화수소와 함께 태양광선에 의해 광화학스모그를 형성한다. 주 배출원은 자동차 배출가스이며 특히 자극성이 강한 기체로 호흡기 질환을 유발하며 농도가 높을 경우 단시간 접촉으로도 폐에 부종을 일으키는 독성이 강한 오염물질로 분류된다(이기영, 1986).

NO₂는 SO₂와 동일한 방법으로 시료를 포집하여 화학발광법으로 분석하였으며 환경 기준 농도는 8시간당 0.15 ppm이다.

3) 일산화탄소(CO)와 이산화탄소(CO₂)

연료의 불완전연소에 기인하여 주로 생성되며 연소과정에서 연료비에 따라 그 배출농도가 영향을 받는 일산화탄소는 혈액중의 Hemoglobin(Hb)과의 결합력이 질소보다 200배 이상 강하여 흡입할 경우 체내에서 CO-Hb가 형성되어 산소운반능력을 현저히 감소시켜 두통이나 구토 증상을 일으키고 심하면 사망에 이를수 있다. 이러한 이유로 인해 환경 기준이 20 ppm/8 hr으로 매우 낮게 정해져 있는 일산화탄소의 분석은 공정시험법(보건사회부, 1990)(환경부, 1991) 상의 비분산적외선 분석법에 근거하여 표준가스로 영점이 조절된 CO/CO₂ 분석기를 이용하였다.

CO와 달리 연료의 완전연소에 의한 부산물로 생성되는 이산화탄소는 일반 대기중에도 약 340 ppm 수준으로 존재하며 다른 오염물질에 비해 환경에 미치는 악영향이 적은 물질이다. 그러나 열복사선

Table 1. Sampling stations for analysis of air pollutants in 1997

Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5
City Hall*	Sindorim*	Yonshinnae	Sadang*	Sodaemun*
Chegi	Shinch'on	Kyongbokkung	Mia-samgori*	Kunja
Chongno-5ga*	Tongdaemun	Express Terminal*	Seoul Station	Yongdungp'o*
	Seoul National Univ. Chamshil*	Chungmuro*	Ssangmun	Kimpo Int'l Airport*

*Add to PM-10, Temperature, Relative Humidity, HCHO and Asbestos.

Table 2. Analytical methods and measuring instruments of various air pollutants

Pollutants	Methods	Instruments
SO ₂	Pulse UV Fluorescence	KIMOTO 365
NO ₂	Chemiluminescent	KIMOTO 258
CO, CO ₂	Non-Dispersive infrared	Fuji Electric ZRF
TSP	Gravimetric	High Volume Air Sampler
Hg	Cold vapor AAS	Mercury Monitor (AM-1)
Pb	Atomic absorption spectrometry (AAS)	PZAAS (Hitachi Model Z-8100)
Cd	"	"
Cr	"	"
Cu	"	"
As	"	"
PM-10	Gravimetric	PM-10 High Volume Air Sampler
Temperature	Pt-Resistance type	Kanomax 6511
Relative Humidity	Polymer thin-layer Cell	Kanomax 6511
Asbestos	Phase contrast microscope (PCM)	Olympus A052 Provis
HCHO	Chromotropic acid method	Handy Sampler (AMETEC MG-59)

(thermal radiation)을 흡수하여 지구의 에너지 평형을 파괴하여 온실효과(green house effect)를 유발하고 다른 한편으로 수분과 결합하여 생성된 H₂CO₃는 건축재료의 부식을 촉진하기도 하는 문제점을 야기시키기도 한다.

일반적으로 인간의 호흡에 영향을 주는 이산화탄소 농도는 5000 ppm 이상으로 알려져 있으며 환경기준 농도는 1000 ppm/8 hr으로 정해져 있다.

4) 총부유먼지(TSP)

대기중의 오염물질은 가스상이거나 먼지나 재와 같은 입자상으로 존재한다. 일반적으로 대기중에 배출된 대기오염물질은 대기 중에서 확산, 수송되다가 높은 대기층에서의 오염물질 제거 기작인 세척, 저층의 대기층에서 눈, 비, 우박 등이 낙하할 때의 제거 기작인 응결 낙하 등의 작용에 의해 강해진다. 이러한 오염물질의 강하는 습식강하와 건식강하로 구별하기도 한다. 그러나 지하공간에서의 먼지는 주로 건식 강하 먼지의 형태로 존재하며 그 입경이 20 μm 이하의 먼지가 대부분으로 인체에 유입될 경우 호흡기 계통에 위해한 영향을 끼칠 수 있다.

본 연구에서 총부유먼지와 PM-10의 농도는 포집 전, 후의 여지 무게차에 의한 중량법에 의거하여 산출하였다. 중량 측정에는 Electric balance(Mettler AE200)를 이용하여 10⁻¹ g까지 분석하였으며 TSP의 환경기준은 300 μg/m³·day, PM-10은 150 μg/m³·day로 정해져 있다.

5) 중금속(Heavy metals)

수은(Hg)은 유량을 0.5 L/min으로 조절한 후 Mercury monitor를 사용하여 1시간 단위로 시료를 포집하였다. 포집한 시료는 0.01 ng의 감도를 유지하는 냉원자흡광도법(CVAAS)에 근거하여 단위 체적당 수은량을 산출하였다.

Pb, Cd, Cr, Cu, As의 중금속 성분은 High volumn air sampler를 이용하여 시료를 glass fiber filter(20×25 cm)에 1.2~1.7 m³/min의 유량으로 24시간 포집한 후 습식전처리를 거쳐 원자흡광도법으로 측정하였다.

분석을 위한 여지의 전처리는 각 항목에 대한 공정시험법에 의거하였으며 High volumn air sampler의 유량 조절은 Andersen roots meter로 교정한 Manometer를 이용하였다.

3. 통계 처리

지하철 역사 내의 분석 오염 성분 11개 항목에 관하여 각 노선별로 상관분석을 수행하여 상관계수를 도출하였고, 시간과 공간적인 차이에서 오는 오염인자간의 통계적 유의성을 검정하기 위해 상반기와 하반기, 오전과 오후, 각 지하철 노선별, 매표소와 승강장으로 구분하여 일원분산분석(Oneway analysis of variance)과 Duncan's multiple range test를 수행하였다. 일원분산분석에 있어서 유의성 검정은 α=0.05, α=0.01, α=0.001 수준에서 비교하였다.

한편, 각 오염성분별 평균농도와 표준편차를 이용하여 측정지점에 따른 오염물질 농도 분포 특성을

비교 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 노선별 오염물질의 농도 분포

서울시에 위치하는 지하철 역사 내의 실내 오염 물질 중 측정 분석한 11개 항목의 오염성분별 농도 분포를 관찰한 결과, 가스상 물질인 SO₂, NO₂, CO, CO₂의 경우 주로 도심권역을 통과하는 1호선과 2호선에서 전체적으로 높은 농도로 존재하였으며, 시외곽 지역을 운행하는 3호선과 개통 시기가 늦은 5호선에서 비교적 낮은 농도로 분포하였다.

1호선의 경우 TSP의 평균 농도가 309±72.7 µg/m³·day로 환경 기준치를 초과하였으며 SO₂의 경우는 0.013±0.005 ppm/day로 환경기준치에 크게 미달하였다. 일산화탄소는 기준농도의 10% 수준으로 분포하였고 이산화탄소 농도는 약 600 ppm 수준이었으며 중금속 물질은 기준농도에 크게 못미치는 농

도 분포를 보였다. 2호선의 경우 환경기준 농도를 초과하는 항목은 없었으며 상대적으로 이산화탄소와 구리 농도가 높게 나타났다.

3호선과 4호선의 경우도 이산화탄소의 농도가 기준농도의 50%를 상회하는 농도 수준으로 분포하였고 이외의 항목에 대해서는 기준농도에 못미치는 농도 분포를 보였다. 5호선의 경우 신설 노선의 영향 탓인지 다른 노선에 비해 상대적으로 항목별 분포농도가 낮았으며 이산화질소의 평균농도가 0.054±0.016 ppm/hr로 다소 높게 나타났다.

각 노선에 대한 오염물질의 평균농도를 Table 3에서 Table 7까지 기술해 놓았으며 Fig. 1에서 Fig. 5까지에서는 SO₂, NO₂, CO, CO₂, TSP 농도를 각 노선별로 매표소와 승강장으로 구분하여 도시했다.

Fig. 1에 나타냈듯이 SO₂ 농도는 5호선을 제외하고 매표소 보다 승강장에서 높게 분포하였으며 다른 노선에 비해 3호선에서 상대적으로 매우 낮은 농도를 보였다.

Table 3. Summary statistics for measuring data in Subway Line 1

unit		No.	Minimum	Maximum	Mean±S.D.
SO ₂	ppm	72	0.004	0.026	0.013±0.005
NO ₂	ppm	72	0.011	0.098	0.049±0.019
CO	ppm	72	1.2	3.3	2.1±0.5
CO ₂	ppm	72	476	996	599±109
TSP	µg/m ³	33	163	465	308.9±72.7
Pb	µg/m ³	33	0.031	0.573	0.307±0.150
Cd	µg/m ³	33	0.001	0.017	0.004±0.004
Cr	µg/m ³	33	0.017	0.135	0.073±0.031
Cu	µg/m ³	33	0.422	3.862	1.719±0.805
As	µg/m ³	26	0.001	0.002	0.0016±0.0005
Hg	µg/m ³	20	0.007	0.02	0.014±0.003

S.D: Standard Deviation.

Table 4. Summary statistics for measuring data in Subway Line 2

unit		No.	Minimum	Maximum	Mean±S.D.
SO ₂	ppm	118	0.004	0.028	0.012±0.004
NO ₂	ppm	117	0.016	0.098	0.053±0.019
CO	ppm	118	0.8	4.0	2.1±0.6
CO ₂	ppm	118	385	717	533.7±56.1
TSP	µg/m ³	58	190	410	289.2±46.6
Pb	µg/m ³	58	0.047	0.563	0.209±0.110
Cd	µg/m ³	58	0.001	0.013	0.005±0.002
Cr	µg/m ³	58	0.017	0.116	0.057±0.022
Cu	µg/m ³	58	0.332	5.607	1.503±0.799
As	µg/m ³	50	0.001	0.004	0.0014±0.0008
Hg	µg/m ³	40	0.007	0.023	0.014±0.004

Table 5. Summary statistics for measuring data in Subway Line 3

unit	No.	Minimum	Maximum	Mean ± S.D.
SO ₂ ppm	96	0.004	0.018	0.010 ± 0.003
NO ₂ ppm	96	0.022	0.124	0.054 ± 0.017
CO ppm	96	0.4	3.9	2.0 ± 0.8
CO ₂ ppm	96	408	752	529.9 ± 79.2
TSP µg/m ³	46	124	389	230.4 ± 69.3
Pb µg/m ³	46	0.02	0.315	0.131 ± 0.074
Cd µg/m ³	46	0.001	0.009	0.003 ± 0.002
Cr µg/m ³	46	0.017	0.18	0.06 ± 0.036
Cu µg/m ³	46	0.079	4.617	1.674 ± 1.067
As µg/m ³	30	0.001	0.002	0.0011 ± 0.0003
Hg µg/m ³	33	0.006	0.026	0.012 ± 0.005

Table 6. Summary statistics for measuring data in Subway Line 4

unit	No.	Minimum	Maximum	Mean ± S.D.
SO ₂ ppm	96	0.005	0.025	0.013 ± 0.004
NO ₂ ppm	96	0.03	0.126	0.069 ± 0.018
CO ppm	96	0.4	4.9	2.2 ± 0.9
CO ₂ ppm	96	399	876	523.4 ± 94.9
TSP µg/m ³	48	137	350	236.7 ± 62.3
Pb µg/m ³	48	0.076	0.597	0.184 ± 0.099
Cd µg/m ³	48	0.001	0.02	0.005 ± 0.004
Cr µg/m ³	48	0.011	0.086	0.045 ± 0.018
Cu µg/m ³	48	0.553	2.902	1.258 ± 0.486
As µg/m ³	42	0.001	0.002	0.0014 ± 0.0005
Hg µg/m ³	34	0.008	0.021	0.014 ± 0.004

Table 7. Summary statistics for measuring data in Subway Line 5

unit	No.	Minimum	Maximum	Mean ± S.D.
SO ₂ ppm	94	0.005	0.024	0.011 ± 0.004
NO ₂ ppm	94	0.012	0.095	0.054 ± 0.016
CO ppm	96	0.5	3.4	1.8 ± 0.61
CO ₂ ppm	96	350	610	445.6 ± 52.9
TSP µg/m ³	47	66	320	188.2 ± 63.1
Pb µg/m ³	47	0.053	0.449	0.208 ± 0.082
Cd µg/m ³	44	0.001	0.018	0.006 ± 0.004
Cr µg/m ³	47	0.013	0.101	0.034 ± 0.021
Cu µg/m ³	47	0.038	2.581	0.695 ± 0.507
As µg/m ³	39	0.001	0.005	0.002 ± 0.001
Hg µg/m ³	33	0.005	0.021	0.014 ± 0.004

NO₂는 승강장에 비해 매표소에서 농도가 높게 나타났으며 4호선에서만 역 현상을 나타냈다. 그러나 이황산가스와 이산화질소의 매표소와 승강장의 농도 차이는 매우 적으므로 이 두 물질은 역사내의 공간적인 차이에 대한 농도 차이는 거의 없다고 사료된다.

CO의 경우 다른 노선에 비해 4호선의 승강장에서

매우 높게 나타났으며 상대적으로 5호선의 농도는 낮게 분포하였다. 또한 승강장과 매표소의 농도 차이도 4호선에서 가장 높게 나타났으며 5호선에서는 그 차이가 거의 없었다.

CO₂는 특히 다른 물질에 비해 매표소와 승강장의 농도 차이가 거의 없었으며 1호선이 비교적 높은 농도를 보였고 전반적으로 500~600 ppm 농도 범위로

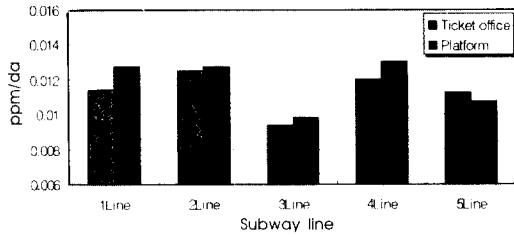


Fig. 1. Average concentration of SO₂ at Ticket office and Platform.

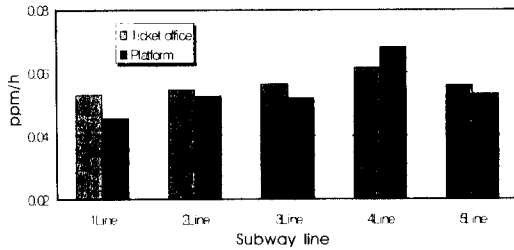


Fig. 2. Average concentration of NO₂ at Ticket office and Platform.

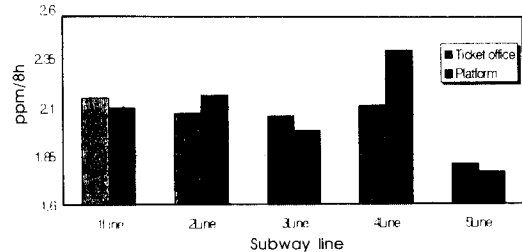


Fig. 3. Average concentration of CO at Ticket office and Platform.

분포하였다.

TSP는 1호선에서 농도 차이가 가장 컸으며 이외의 노선에서는 매표소와 승강장의 차이가 두드러지지 않았다. 또한 전 노선에 걸쳐 200 µg/m³·day 이상의 농도로 분포하여 거의 환경기준치에 도달하였으며 1호선 승강장과 2호선 매표소의 경우 기준치를 초과하거나 거의 기준치의 농도로 분포하였다.

다른 오염성분에 비해 지하철 역사내에서 TSP 농도가 매우 높게 나타나 지하철 역사의 전동차 운행으로 인한 먼지 비산 방지와 실내 공기의 효율적인 환기가 필요하다고 사료된다. 1호선을 제외한 2~5호선의 경우, 터널 내 환기 방식은 열차풍으로 인한 자연 환기와 함께 역과 역 사이에 통상 3개소의 기

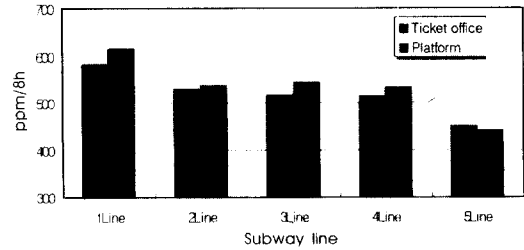


Fig. 4. Average concentration of CO₂ at Ticket office and Platform.

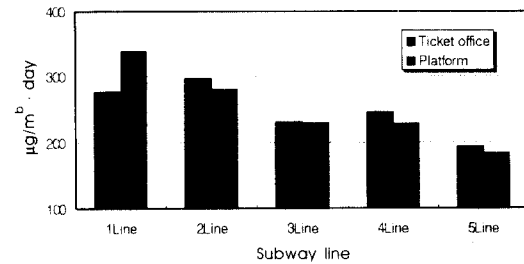


Fig. 5. Average concentration of TSP at Ticket office and Platform.

계식 환기 시설이 갖추어져 자연 환기량 수준의 인공 급배기를 실시하고 있고 또한 전반적으로 1호선과 2호선의 오염물질 농도가 높게 나타난 것은 1호선과 2호선이 도심에 편중되어 있고 이로 인한 역사 외부의 오염된 공기가 실내로 유입되어 고농도로 축적된데서 비롯됐다고 사료된다.

중금속 물질의 경우 지하상가에서는 비소 성분이 거의 검출되지 않았던 것에 비해 지하철 역사에서는 미량으로 분포하고 있음을 관찰할 수 있었으며 Pb는 0.203±0.115 µg/m³·day, Cd는 0.005±0.003 µg/m³·day, Cr은 0.053±0.029 µg/m³·day, Cu는 1.353±0.839 µg/m³·day, As는 0.0015±0.0008 µg/m³·day, Hg는 0.014±0.004 µg/m³·day의 농도 분포를 나타냈다.

2. PM-10 농도의 분포

11개 지하철 역사에 대한 PM-10 및 TSP의 농도는 Table 8과 같았다. PM-10의 경우 매표소의 농도는 전반기 155.6±43.4 µg/m³, 하반기 108.1±36.1 µg/m³으로 상하반기의 농도 차가 매우 큰 반면 승강장에서는 전반기 146.6±43.3 µg/m³, 149.3±52.2 µg/m³로 계절적으로 큰 차이를 보이지 않았다. 대상 역사에서의 최저치는 50 µg/m³이었으며 최대치는

Table 8. PM-10 and TSP Concentrations in Subway stations (11stations) (unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

		the first half of the year		the latter half of the year	
		ticket office	platform	ticket office	platform
PM-10	Mean \pm S.D.	155.6 \pm 43.40	146.6 \pm 43.30	108.1 \pm 36.05	149.3 \pm 52.17
	min	82	80	52	50
	max	243	233	158	237
TSP	Mean \pm S.D.	237.1 \pm 53.07	245.0 \pm 60.24	158.5 \pm 59.95	191.9 \pm 70.16
	min	149	154	79	66
	max	349	359	248	297

243 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{day}$ 으로 현재의 실내공기질 기준인 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{day}$ 에 육박하는 수준을 나타내었다.

TSP 중 PM-10의 분율은 Table 9와 같았다. 11개 소의 역사를 비교한 바 매표소는 상반기 63.5 \pm 9.5%, 하반기 66.8 \pm 7.3%로 계절적으로 차이를 보이지 않았으나 승강장의 경우는 상하반기 각각 59.8 \pm 10.1%와 78.1 \pm 3.7%로 큰 차이를 보이는 경향을 나타내었다.

전체적으로 최저 40.2%, 최고 82.3%로 TSP중의 PM-10분율은 매우 큰 변동폭을 나타내고 있음을 알았다.

3. 온열인자, HCHO 및 석면 농도

11개 역사에 대한 온도, 습도 등의 온열인자와 HCHO와 석면농도 측정결과는 Table 10과 같다. 매표소보다 승강장이 다소 높은 온도를 나타내고 있고 2~3월의 상반기에 비하여 7~10월 하반기의 온도는 2배 이상 높게 나타나 계절적인 차이가 매우 크다. 28°C 이상의 고온은 환경위생학적으로도 문제가 있어 통상 실내공기시험 판정기준표¹⁰⁾에 의하여도 계절기에 28°C가 초과할 때에는 실내 환경의 판정에 좋지 않은 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

온열인자 중 온도에 대하여는 상한기준을 두어 28°C 이하를 유지토록 권고하고, 습도는 30~80%가 유지되도록 권고치를 조정하는 방안을 검토해봐야 할 것으로 사료된다.

상대습도도 상반기에 비하여 하반기가 높았으며 계절적인 유의차가 확인된 반면 ($p < 0.01$), 매표소와 승강장과 공간차는 유의성이 확인되지 않았다.

HCHO는 상반기 0.015 \pm 0.012 ppm, 하반기 0.019 \pm 0.010 ppm으로 나타나 승강장과 매표소간에 평균 농도에서 동일하였다. 최저치는 0.005 ppm, 최고치는 전반기의 매표소에서 0.043 ppm을 나타내었다.

석면의 경우 상반기 0.0025 \pm 0.0007 fiber수/cc, 하반기 0.0024 \pm 0.0007 fiber수/cc으로 나타나 전반기와 하반기의 평균 농도가 거의 동일하였다. 최저치는 0.0013 fiber수/cc, 최고치는 전반기의 승강장에서 0.0034 fiber수/cc을 나타내었다.

4. 노선별 오염물질 분포 특성 및 통계적 유의성

각 노선별 오염물질 농도 분포와 함께 노선별, 시간적 차이별, 공간적 차이별 오염항목간의 분산분석을 수행한 결과, 노선별로는 CO, CO₂, TSP, Pb, Cd, Cr, Cu, As가 통계적으로 $\alpha = 0.01$ 수준에서 매우 높

Table 9. Rate of PM-10 to TSP in Subway stations (11stations)

		the first half of the year				the latter half of the year			
		ticket office		platform		ticket office		platform	
PM-10/TSP		60.4	59.6	57.9	61.2	58.3	67.1	80.5	80.1
		55.0	75.5	61.0	59.4	65.8	63.0	75.8	70.7
		70.8	66.4	56.9	82.3	56.7	63.7	74.3	77.6
		69.6	44.8	50.8	40.2	73.5	79.9	80.6	81.6
		67.3	80.5	71.2	56.0	65.3	-	81.0	82.0
		68.6		60.6		74.2		75.5	
Mean \pm S.D.		65.3 \pm 9.45		59.8 \pm 10.14		66.8 \pm 7.25		78.1 \pm 3.65	
min		44.8		40.2		56.7		70.7	
max		80.5		82.3		79.9		80.6	

Table 10. Measuring Results of Thermal Factor, HCHO and Asbestos (11stations)

		the first half of the year		the latter half of the year	
		ticket office	platform	ticket office	platform
Temperature (°C)	Mean ± S.D.	12.7 ± 2.80	13.6 ± 1.90	28.8 ± 2.30	29.5 ± 1.99
	min	7.7	11.0	25.0	26.1
	max	17.4	17.2	33.0	33.0
Relative Humidity (%)	Mean ± S.D.	35.0 ± 14.95	37.0 ± 14.79	61.0 ± 5.79	60.4 ± 5.48
	min	12	20	53	54
	max	60	63	69	70
HCHO (ppm)	Mean ± S.D.	0.015 ± 0.012	0.015 ± 0.010	0.019 ± 0.010	0.019 ± 0.008
	min	0.006	0.005	0.009	0.008
	max	0.043	0.030	0.034	0.032
Asbestos (No. of fiber/cc)	Mean ± S.D.	-	0.0025 ± 0.0007	-	0.0024 ± 0.0007
	min	-	0.0013	-	0.0013
	max	-	0.0034	-	0.0032

은 유의성을 나타냈고, 오전과 오후, 상반기와 하반기의 시간적 차이에 따라서는 CO, CO₂, Cd, Cr, Hg 이 통계적 유의성을 나타냈다. 또한 매표소와 승강장의 공간적 차이에 따른 유의성 분석에서는 중금속 성분 중 Cr과 Cu만이 비교적 높은 유의성을 나타냈는 바 이는 역사에서의 오염원이 Rail과 Trolley wire 및 Pentagraph이므로 이 영향을 직접받게 되는 Cu와 Cr농도에 차이가 있는 것으로 사료된다. 분산분석 결과 나타난 유의도 값을 Table 14에 기술하였다.

전반적으로 가스상물질에 비하여 중금속 성분이 높은 통계적 유의성을 보였으며 지하철 역사내의

SO₂ 연 평균농도는 환경기준 농도의 20% 농도 수준인 0.03 ± 0.004 ppm/day 수준으로 분포하였고, NO₂ 연 평균농도는 환경기준 농도의 30~40% 농도 수준으로 분포하였다. 탄산가스의 경우 실내 환경기준에 비하여 역사 내의 잔류농도가 비교적 낮게 분포하였으나 총부유먼지(TSP)는 대다수 역사에서 기준치 300 µg/m³ · day를 육박하는 양상을 보였으며 연 평균농도도 249 ± 74.5 µg/m³ · day에 달하는 높은 농도로 분포하였다. 역사내에서 총부유먼지의 농도가 매우 높은 원인은 전동차의 운행과 사람의 통행으로 인한 먼지의 비산에 기인한 것으로 사료된다.¹¹⁾

중금속 물질의 경우 납과 구리가 다른 중금속 물질에 비해 상대적으로 높게 분포하였으나 기준치에는 못 미치는 낮은 농도로 존재하였다.

각 노선별 상관분석을 통한 상관계수를 Table 11에서 Table 16까지 기술하였다. Table 11에 표시하였듯이 지하철 역사 내의 항목별 상관성을 살펴보면 P < 0.001 수준에서 TSP는 Hg을 제외한 중금속 성분과 매우 높은 유의성을 나타냈으며, 중금속 성분간에는 납(Pb)이 다른 중금속 성분과 높은 유의성을 보였다. 이외에 SO₂는 중금속 카드뮴과 납성분에 대해 통계적으로 유의함을 관찰할 수 있었다.

1호선의 경우 SO₂와 Cd, Pb와 Cd, Cr, Cu 성분이 통계적으로 매우 유의하게 나타났으며 Cu와 TSP는 상관계수가 0.7108으로 매우 높은 정상관관계를 보였다. 2호선에서는 일산화탄소가 납과 이산화질소에 대해 통계적으로 유의한 정상관관계를 보였으며, 3호

Table 11. p-Value for total measuring data in the Subway

	Lane	Pm/Am	S/F	T/P
SO ₂	0.2297	0.3189	0.2838	0.3268
NO ₂	0.5389	0.1656	0.1623	0.1584
CO	0.0002*	0.0014*	0.0920	0.4658
CO ₂	0.0001*	0.3584	0.0001*	0.0932
TSP	0.0001*	-	0.9478	0.8654
Pb	0.0001*	-	0.0810	0.3666
Cd	0.0003*	-	0.0001*	0.3110
Cr	0.0001*	-	0.0001*	0.0089*
Cu	0.0001*	-	0.1862	0.0002*
As	0.0001*	-	0.4456	0.5282
Hg	0.1267	-	0.0001*	0.9846

*P < 0.01.

S: the first half of the year, F: the latter half of the year, T: Ticket office, P: Platform.

Table 12. Correlation coefficients between pollutant factors (sum of Line 1~5)

	SO ₂	NO ₂	CO	CO ₂	TSP	Pb	Cd	Cr	Cu	As	Hg
SO ₂	1	-0.0034	0.0097	-0.0055	-0.0097	0.1634	0.2437	0.0960	0.0625	-0.0529	0.0952
NO ₂		1	-0.0181	-0.0048	-0.0553	0.0119	0.0471	-0.0945	-0.0357	-0.0529	0.0094
CO			1	0.0055	0.1457	0.1831	-0.0154	0.0380	-0.0195	-0.1020	0.0976
CO ₂				1	0.1309	-0.1011	-0.0154	0.0254	0.1621	-0.1684	-0.0647
TSP			*	*	1	0.5353	0.2310	0.5833	0.4667	0.0740	0.1197
Pb	*		**		***	1	0.4353	0.4227	0.2698	0.2827	0.1651
Cd	***			*	***	***	1	-0.0167	0.1206	0.2884	-0.0194
Cr					***	***		1	0.6451	-0.0251	0.1149
Cu				**	***	***		***	1	-0.1281	-0.0910
As				*		***	***			1	0.1635
Hg						*					1

Table 13. Correlation coefficients between pollutant factors in Subway Line 1

	SO ₂	NO ₂	CO	CO ₂	TSP	Pb	Cd	Cr	Cu	As	Hg
SO ₂	1	-0.0602	0.0180	-0.0994	-0.1766	0.2168	0.5515	0.1236	0.0939	-0.2336	-0.0346
NO ₂		1	-0.0807	-0.3696	0.3956	0.2249	0.4022	-0.0489	0.0847	0.2911	0.1231
CO		*	1	0.0949	-0.1489	-0.1197	-0.1952	-0.1267	0.0152	-0.0145	-0.0211
CO ₂		**		1	-0.2370	-0.3684	-0.4841	-0.3692	-0.2960	-0.1759	-0.5192
TSP		*			1	0.5373	0.3673	0.5003	0.4507	0.4139	0.3552
Pb				*	**	1	0.6372	0.6563	0.7108	0.4428	0.3209
Cd	***	*		**	*	***	1	0.3503	0.4562	0.1406	0.2702
Cr				*	**	***	*	1	0.8162	0.3563	0.3649
Cu					**	***	**	***	1	0.2710	0.2127
As					*	*				1	-0.1475
Hg				*							1

Table 14. Correlation coefficients between pollutant factors in Subway Line 2

	SO ₂	NO ₂	CO	CO ₂	TSP	Pb	Cd	Cr	Cu	As	Hg
SO ₂	1	-0.1591	-0.0986	0.2457	-0.1576	-0.2999	-0.0557	0.0131	0.1722	-0.0381	0.0738
NO ₂		1	0.4243	-0.2811	0.1148	0.2025	0.0673	-0.2306	-0.2022	-0.2319	-0.1836
CO		***	1	-0.0753	0.0549	0.5110	0.1833	-0.0991	0.0324	-0.0275	0.1976
CO ₂	**	**		1	-0.2569	-0.1779	-0.2103	-0.0544	-0.0126	0.2495	-0.0702
TSP					1	0.4398	0.4953	0.3991	0.2686	0.1005	0.2758
Pb	*		***		***	1	0.5763	0.2295	0.1770	0.1321	0.2249
Cd					***	***	1	0.3253	0.4204	0.0779	0.0535
Cr					**	*	1	0.6321	0.1876	0.1876	0.2621
Cu					*		***	***	1	0.0621	-0.0458
As										1	0.1200
Hg											1

*P < 0.05, **P < 0.01, ***P < 0.001.

선에서는 NO₂와 CO, CO₂가 유의한 상관관계를 보였고 TSP는 Pb와 Cr에 대해 매우 유의적인 정상관관계를 나타냈다. 4호선에서는 SO₂와 CO₂가 유의한 정상관관계를 보였으며 5호선에서는 SO₂와 TSP, SO₂와 Cd가 r=0.35 수준의 정상관관계를 나타냈다.

이와같이 각 노선별 상관관계를 비교해 본 결과, 가

스상 물질 상호간의 유의성은 비교적 낮은 편이었으나 중금속 성분 상호간은 통계적으로 매우 유의한 상관관계를 가지고 있음을 파악할 수 있었다. 또한 전 반적으로 TSP는 전 노선에 걸쳐 다른 중금속 성분과 매우 유의한 상관관계에 있음을 관찰할 수 있었다.

Table 15. Correlation coefficients between pollutant factors in Subway Line 3

	SO ₂	NO ₂	CO	CO ₂	TSP	Pb	Cd	Cr	Cu	As	Hg
SO ₂	1	-0.1205	-0.0920	0.2297	-0.3792	-0.3493	0.2671	-0.4430	-0.0697	-0.2109	0.1055
NO ₂		1	0.3411	-0.3729	0.2868	0.2831	-0.2381	0.2090	-0.0211	-0.0862	-0.1422
CO		***	1	-0.2341	0.0653	-0.0173	-0.1825	0.0134	-0.3761	0.1799	-0.2062
CO ₂	*	***	*	1	-0.3891	-0.2420	-0.1732	-0.2037	-0.0980	0	-0.0537
TSP	**			**	1	0.6871	0.2211	0.6739	0.4765	0.4941	0.0644
Pb	*				***	1	0.1811	0.6807	0.4727	0.5174	-0.0159
Cd							1	0.1161	0.5338	0.0252	-0.0878
Cr					***	***		1	0.5408	0.4430	0.0592
Cu			*		***	***	***	***	1	0.1745	-0.0284
As					**	**		*		1	0.1804
Hg											1

Table 16. Correlation coefficients between pollutant factors in Subway Line 4

	SO ₂	NO ₂	CO	CO ₂	TSP	Pb	Cd	Cr	Cu	As	Hg
SO ₂	1	-0.0156	0.2129	0.4494	0.0950	-0.0862	0.2310	-0.2806	0.1874	0.1287	0.2322
NO ₂		1	-0.0847	0.0158	0.0175	-0.0504	0.0292	-0.1559	-0.0022	0.2749	0.0248
CO			1	-0.1127	0.2512	0.3718	0.0700	0.2388	0.1870	0.1722	0.5546
CO ₂	***			1	0.1368	-0.1270	0.1974	-0.3023	0.1886	-0.0487	0.1974
TSP					1	0.6082	0.3844	0.4014	0.3599	0.3897	-0.0023
Pb			**		***	1	0.3572	0.3210	0.0567	0.5839	0.1777
Cd					**	*	1	-0.1101	0.0679	0.3639	-0.2068
Cr					**	*		1	0.1949	0.0333	-0.0587
Cu					*				1	-0.1660	-0.0343
As					*	***	*			1	0.2356
Hg			***								1

Table 17. Correlation coefficients between pollutant factors in Subway Line 5

	SO ₂	NO ₂	CO	CO ₂	TSP	Pb	Cd	Cr	Cu	As	Hg
SO ₂	1	-0.0676	0.0035	0.1194	0.3498	-0.0556	0.3482	-0.1225	0.2512	0.1527	-0.0661
NO ₂		1	0.0521	0.1107	-0.0351	0.1100	0.0264	-0.0851	0.0484	-0.1770	0.0119
CO			1	-0.0221	0.1809	0.2612	0.0441	-0.1134	-0.1635	-0.1525	-0.0388
CO ₂				1	0.0163	-0.0726	0.0650	-0.0085	0.1912	-0.2094	-0.1631
TSP	*				1	0.5444	0.3511	0.4185	0.3355	0.2932	0.1451
Pb					***	1	0.3699	0.4091	0.2076	0.2284	-0.0815
Cd	*				*	*	1	-0.2207	0.0644	0.3195	-0.0745
Cr					***	**		1	0.5535	-0.1275	0.3472
Cu					*		***		1	-0.0527	-0.2136
As										1	-0.0378
Hg								*			1

*P < 0.05, **P < 0.01, ***P < 0.001.

IV. 결 론

서울시에 위치하고 있는 지하철 역사의 실내 공기 질 분포 특성 및 오염인자간의 상관성을 분석하기 위하여 지하철 노선별로 총 20개 역사에서 SO₂, NO₂, CO, CO₂, Pb, Cd, Cr, Cu, As, Hg, HCHO를

포함한 가스상 물질 5가지, 중금속 물질 6가지와 PM-10과 총부유먼지(TSP) 그리고 석면과 온열인자 등을 측정 조사하였다.

각 측정 지점별로 오전과 오후, 매표소와 승강장으로 구분하여 년 2회 오염 성분을 측정한 결과 다음과 같은 결론을 도출해냈다.

1. TSP의 경우 1호선에서의 연 평균농도가 환경 기준치($300 \mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{day}$)를 초과하였고 전 노선에서 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{day}$ 이상의 고농도로 존재하였다. 또한 3,4,5호선에 비해 외부 공기의 오염도가 높은 도심을 통과하는 1,2호선의 역사내 가스상 오염물질 농도가 높게 나타났다.

2. 측정대상역 총 11개소의 조사 결과 총부유먼지 중의 미세먼지(PM-10)의 TSP에 대한 농도분율은 매표소에서 전반기 $65.3 \pm 9.45\%$, 하반기 $66.8 \pm 7.25\%$ 를 나타내었고, 승강장에서는 전반기 $59.8 \pm 10.14\%$, 하반기에는 $78.1 \pm 3.65\%$ 를 나타내었다.

3. TSP에 대한 PM-10의 분율은 최저 40.2%, 최고 82.3%로 매우 큰 변동폭을 나타내었다.

4. HCHO농도는 전반기 $0.015 \pm 0.012 \text{ ppm}$, $0.019 \pm 0.010 \text{ ppm}$ 으로 매표소나 승강장이 동일하였다.

5. 승강장의 석면 농도는 전반기 $0.003 \pm 0.001 \text{ fiber/cc}$, 하반기 $0.002 \pm 0.001 \text{ fiber/cc}$ 로 기준치인 0.01 fiber/cc 에 크게 미달하였다.

6. 지하철 노선별 분산분석에 의해 SO_2 , NO_2 , Hg를 제외한 전 오염인자간에 $\alpha=0.01$ 수준에서 통계적으로 매우 유의한 상관관계가 있음을 파악할 수 있었다.

7. 시간적인 차이에 의해서는 CO, CO_2 , Cd, Cu, Hg 성분이 통계적 유의성을 보였으며 매표소와 승강장의 공간적인 차이에 의해서는 Cr과 Cu만이 비교적 높은 유의성을 나타냈다. 또한 오전과 오후의 상관성에 비해 상반기와 하반기의 오염물질 농도가 상대적으로 높은 상관성을 나타내었다.

8. 전 노선에 걸쳐 중금속 성분 상호간의 상관도

가 가스상물질에 비해 더 높았으며 역사 내의 농도 분포에 있어서는 중금속 성분 보다 가스상물질의 농도가 더 높게 분포하였다.

참고문헌

- 1) 권우택: 지하상가 실내외 및 지하철 온도와 습도에 따른 Formaldehyde 거동(II), 대한 위생학회지, **9**(1), 67-75, 1994.
- 2) R. Perry and I. L. Gee: Vehicle emissions and effects on air quality: indoors and outdoors, *Indoor Environ.*, **3**, 224-236, 1994.
- 3) J. L. Phillips, R. Field, M. Goldstone, G. L. Reynolds, J. N. Lester and R. Perry: Relationships between indoor and outdoor air quality in four naturally ventilated office in the United Kingdom, *Atmos. Environ.*, **27A**, 1743-1753, 1993.
- 4) National Research Council: Indoor pollutants, National Academy Press, Washington D.C., 1981.
- 5) 박일수, 이덕길, 강인구: 서울지역 겨울철 SO_2 농도를 지배하는 기상인자, 한국대기보전 학회지, **7**(2), 96-104, 1991.
- 6) A. C. Stern, R. W. Boubel, D. B. Turner and D. C. Fuy: Fundamentals of air pollution., 2th, 1984.
- 7) 이기영: 대기오염물질이 인체에 미치는 영향, 서울대학교 보건대학원, 1986.
- 8) 보건사회부: 공중이용시설위생관리기준에 대한 공정 시험법, 9-21, 1990.
- 9) 환경부: 대기오염공정시험방법, 195-198/374-375, 1991.
- 10) 日本藥學會: 衛生試驗法註解, 金原出版株式會社, 東京, 1233-1236, 1990.
- 11) 김민영, 이규남, 윤원용, 정일현: 지하철 시청역 구내에서의 부유먼지 농도의 변동 패턴과 측정방법간 비교, 한국대기보전학회지 게재예정.