

서울 일부 지하철 승무원석의 PM, 이산화탄소, 일산화탄소 모니터링에 의한 실내 공기질 특성 평가

곽현석 · 진구원* · 김 원 · 양원수 · 최상준 · 박동욱*

원진녹색병원 원진노동환경연구소, *한국방송통신대학교 자연과학부 환경보건학과

Evaluation on Air Quality inside Subway Driver Cabin by Monitoring PM, CO₂, and CO Levels

Hyun Suk Kwag · Ku Won Jin* · Won Kim · Won Su Yang · Sang Jun, Choi · Dong Uk Park*

Wonjin Institute for Occupational and Environmental Health

*Department of Environmental Health, Korea National Open University

(Received September 9, 2005; Accepted October 10, 2005)

ABSTRACT

PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂ and CO in driver cabins of subway line from 5 to 8 were monitored from 07:00 through 21:00 (or 19:30 or 20:00) on May. Driver cabin of subway line 7 showed the highest PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂ and CO concentrations. General Linear Model indicated that subway line, subway location (ground and underground track) and running time (morning and afternoon) significantly influenced the concentrations of PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂ and CO (p=0.000). Daily profile of PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂ and CO, expressed as an 30 minutes average, showed similar variation pattern over day period. These concentrations showed the highest concentrations between 07:00 and 09:00 of rush hour, slightly dropped and again rose slightly after 18:00. In correlation analysis, significant relations among PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂, and CO were detected (p<0.01). In particular, correlation coefficient between PM₁₀ and PM_{2.5} was highly significant (r=0.884). Regression analysis also concluded that PM₁₀ concentration significantly explained 71.4% of variation of PM_{2.5} concentration (p=0.000, R²=0.714). Correlations by CO with PM₁₀ and PM_{2.5} were 0.451 and 0.520, which were higher than those by CO₂. Further study is needed to examine the sources of PM_{2.5} and CO in subway and to compare pollutants concentration among subway lines.

Keywords: PM₁₀, PM_{2.5}, subway, CO₂, CO

I. 서 론

지하철은 우리나라에서 가장 많은 시민이 이용하는 교통수단이다. 앞으로도 지하철의 운행은 늘어나고 이에 따라 이용하는 승객도 함께 늘어날 수 밖에 없다. 이러한 상황임에도 불구하고 지하철 환경에 대한 연구는 물론 관리노력은 미흡한 실정이다.

지하철 환경은 크게 매표가 이루어지는 역사, 지하철을 타고 내리는 승강장 그리고 지하철 차량내부로 구분할 수 있다. 그 동안 지하철 환경에 대한 연구,

조사, 법적관리 등은 대부분 역사나 승강장만을 대상으로 이루어졌다(법, 연구 등 참고문헌). 상대적으로 승객들이 가장 많이 머무는 환경인 객차환경에 대한 연구는 거의 없었다. 최근에 박 등(2005)²⁾은 일부 지하철(1호선, 2호선, 4호선, 5호선) 객차에서 PM₁₀, PM_{2.5} 그리고 CO₂농도를 측정하고 객차내 미세먼지 오염의 심각성과 환기의 문제점을 지적한 바 있다.

지하철은 객차와 승무원석으로 구분되어 있다. 지하철을 운전하는 승무원석 환경에 대한 연구는 국내외에서 아직까지 보고 되지 않았다. 승무원은 지하철 운전의 안전을 책임지고 있다. 따라서 승무원들이 건강하고 안전하게 일할 수 있는 종합적인 환경을 제공하는 것은 지하철 안전운행에 매우 중요한 요소이다.

본 연구의 궁극적인 목적은 지하철 5호선에서 8호선

*Corresponding author : Department of Environmental Health, Korea National Open University
Tel: 82-2-3668-4707, Fax: 82-2-740-4701
E-mail : pdw545@knou.ac.kr

까지 지하철 승무원석에서 PM_{10} , $PM_{2.5}$, 이산화탄소 그리고 일산화탄소 농도를 실시간으로 모니터링하고 농도에 대한 변화특성과 항목간의 상관관을 분석하였다. 구체적인 목적은 첫째, 지하철 특성별(지하철의 운행 위치(지하와 지상), 운행시간대, 호선, 환승특성)로 PM_{10} , $PM_{2.5}$, 이산화탄소 그리고 일산화탄소 농도의 특성을 분석하였다. 둘째, 지하철특성이 PM_{10} , $PM_{2.5}$, 이산화탄소 그리고 일산화탄소 농도에 유의한 영향을 미치는지 분석하였다. 셋째, PM_{10} , $PM_{2.5}$, 이산화탄소, 일산화탄소 농도간의 상관관계를 분석하여 오염원의 근원을 추정하였다.

II. 연구대상 및 방법

1. 연구대상 및 시기

서울 지하철 5호선, 6호선, 7호선, 8호선의 승무원석을 조사대상으로 2005년 5월 17일부터 20일까지 4일 동안 조사하였다. 모니터링은 07:00부터 시작하여 19:30 혹은 21:00까지 왕복으로 실시하였다. 모니터링 시간 동안 호선별 그리고 지하철역별로 지하철이 운행된 특성(지하, 지상, 시간대, 환승특성 등)을 코딩하였다.

2. 연구방법

승무원석의 제어판 옆(높이 1~1.2m)에 측정 기구를 설치하였다. PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 모니터링은 채취유량 1.2 l/분으로 보정된 Portable Aerosol Spectrometer(Model 1108, Grimm, Germany, PAS)로 6초 간격으로 실시간 동안 모니터링하였다. 총 모니터링 횟수는 20,395 회였다(Table 1). 한편 PAS로 측정된 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 모니터링 결과에 대한 신뢰성을 검증하기 위하여 필터(PM_{10} : $PM_{2.5}$)를 장착한 개인시료채취기(Model 200 Personal Environmental Monitor, MSP, USA)를 PAS와 동일한 위치에서 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 를 측정하여 그 결과를 비교하였다. 지하은행구간에서 필터법과 PAS결과를

비교한 결과 평균 2배 이상으로 나타나 PAS의 모니터링 결과에 “2”를 보정하였다. PAS지침서는 지하에서 측정할 경우 먼지의 밀도와 특성에 따라 “2”를 보정하도록 권고하여 이를 검증하는 조사를 실시한 것이다. 한편 동일한 시간, 같은 위치에서 이산화탄소 농도는 Indoor Air Quality Meters(Model 8760, TSI, US)를 이용하여 5초 간격으로 모니터링하였다. 총 모니터링 횟수는 20,366회였다. 이산화탄소 농도는 승무원석의 환기의 효율을 판단하는 지표로 사용하였다.³⁾

3. 자료처리

SPSS Version 12.0을 이용하여 모니터링 자료를 모두 분석하였다. 지하철 특성 중에서 지하와 지상 그리고 오전과 오후 등 2개 그룹간 변수(PM_{10} , $PM_{2.5}$, CO, CO₂ 등)들의 농도 차이는 독립표본의 t-Test로 검증하였다. 지하철 호선별 변수의 차이는 Sheffes의 다중 회귀분석(multiple comparison)을 활용하여 평균차이를 검증하였다. 2개 이상 요인들(지하와 지상, 지하철 호선, 환승특성, 시간대)이 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$, CO, CO₂ 농도에 미치는 영향은 일변량 분산분석(univariate ANOVA)으로 평가하였다.

III. 결과 및 고찰

1. PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 농도

지하철 5, 6, 7, 8호선 승무원실에서 측정된 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 농도결과는 Table 2와 같다. 일변량분석(univariate ANOVA)결과, 지하철 특성(호선: 5, 6, 7, 8호선, 위치: 지상과 지하), 운행시간대: 오전과 오후, 환승특성: 환승역 수)이 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 농도에 모두 유의하게 영향을 미치는 것으로 분석되었다(PM_{10} : $R^2=0.487$, $p=0.000$; $PM_{2.5}$: $R^2=0.756$, $p=0.000$). 설명력(R^2)을 보면 지하철 특성이 PM_{10} 보다 $PM_{2.5}$ 에 더 유의하게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이것은 $PM_{2.5}$ 가 지하철 환경에 보다

Table 1. General information concerning monitoring

Subway line	No monitored	Block of track	Duration monitored	Date	Temp. (°C)	Humidity (%)
5	5,503	Changanpyung~Kunja	07:00~21:00 (11:00~15:00: break)	May, 20	23.9	44.9
6	4,925	Sukgae~Taereng	07:00~19:30 (11:10~15:00 : break)	May, 19	22.3	53.2
7	5,479	Yopungmasan~Kangnam office	07:00~20:00 (11:40~14:50 : break)	May, 17	23.3	63.0
8	4,488	Sukchon~Chamsil	07:00~20:00 (11:00~16:00 : break)	May, 18	23.7	60.0

Table 2. The average concentrations of PM₁₀, PM_{2.5} by subway line and subway track location, Mean ± SD

	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8	Total
No. monitored	5,503	4,925	5,479	4,488	20,395
PM ₁₀ , µg/m ³					
Ground	NA	NA	67.9 ± 37.7	28.7 ± 10.3	61.3 ± 37.6
Underground	82.8 ± 44.3	80.2 ± 30.5	99.0 ± 33.3	54.4 ± 15.4	79.8 ± 36.7
Total	82.8 ± 44.3	80.2 ± 30.5	95.2 ± 35.3	53.6 ± 15.9	79.1 ± 36.1
PM _{2.5} , µg/m ³					
Ground	NA	NA	51.1 ± 22.0	20.5 ± 4.1	46.0 ± 23.1
Underground	56.9 ± 30.8	62.9 ± 18.5	86.3 ± 29.2	39.2 ± 7.3	61.7 ± 29.0
Total	56.9 ± 30.8	62.9 ± 18.5	82.0 ± 30.6	38.6 ± 7.9	61.1 ± 29.0

NA: Not Applicable

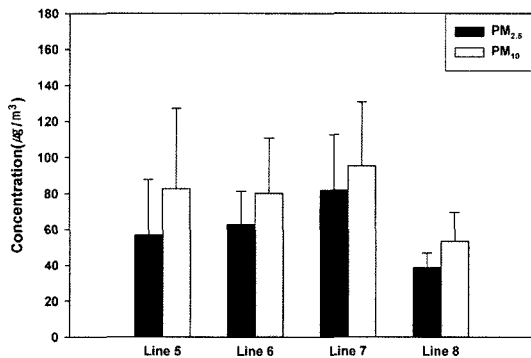


Fig. 1. The average concentration and standard deviation of PM₁₀ and PM_{2.5} by subway line.

밀접하게 관련되는 것으로 추정할 수 있다. 지하철 특성별로 PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도의 변화나 차이를 설명하면 다음과 같다.

1) 지하철 호선별

평균 PM₁₀농도는 모두 실내 환경기준(150 µg/m³) 이하였다.³⁾ 평균 PM_{2.5}농도는 지하철 7호선의 지하구간에서만 미국 환경부(US Environmental Protection Agency, EPA)의 대기 하루 평균 환경기준(65 µg/m³)⁴⁾을 초과하였다. 다중회귀분석결과, 호선별로 PM₁₀과 PM_{2.5}농도는 서로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다(p<0.05). 지하철 7호선(2000년 8월 완전개통)이 가장 높았고 8호선(1996년 11월 부분개통, 1999년 7월 완전개통)은 가장 낮은 농도를 나타냈다. 지하철 7호선과 6호선(2000년 12월 부분개통, 2001년 3월 완전개통)은 지하철 5호선(1995년 11월 부분개통, 1996년 3월 완전개통)과 8호선에 비해 운행시간이 짧았는데도 불구하고⁵⁾ PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도가 유의하게 높았다. 이것은 지하철 호선별 환기특성, 운행구간의 특성, 이용승객 수 등 다양한 요인이 영향을 미칠 수 있는 것으로 판단된

다. 특별히 지하철 8호선에서 모니터링한 PM₁₀과 PM_{2.5}농도는 다른 호선에 비해 훨씬 낮았다(Fig. 3). 이것은 8호선이 다른 지하철 호선에 비해 운행구간(운행시간)이 짧아 종착역에서 청소와 환기의 기회가 다른 지하철에 비해 자주 이루어졌기 때문으로 판단된다. 향후 호선별로 PM농도의 차이를 초래하는 원인에 대한 조사를 통해서 가장 영향을 크게 미치는 요인별 관리가 필요할 것으로 판단된다.

지금까지 국내외에서 지하철 승무원실에서 PM₁₀과 PM_{2.5}농도를 보고한 연구는 없어 본 연구결과에 대한 직접적인 비교는 할 수 없었다. 본 연구결과는 서울 지하철 1호선, 2호선, 3호선, 4호선 객차에서 측정된 농도(PM₁₀: 137.0 µg/m³, PM_{2.5}: 115.6 µg/m³)²⁾ 보다 훨씬 낮다. 이러한 차이에 영향을 미치는 요인은 측정 시기(계절), 시간, 장소, 환기특성, 지하철 특성 등 여러 가지일 것으로 판단된다. 승무원실의 PM농도가 객차보다 낮은 이유는 객차는 승객이 타고 내릴 때 승강장으로부터 PM 등의 오염물질이 유입되지만, 승무원실의 문은 운행동안 대부분 닫혀 있어 직접적으로 외부 공기(승강장 등)가 유입되지 않아 외부 오염에 영향을 덜 받기 때문으로 판단된다. 지하철 1, 2, 4, 5호선의 객차에서는 급기와 배기가 거의 이루어지지 않아²⁾ 오염된 PM 등 오염물질은 쉽게 낮아지지 않는다. 본 연구대상 지하철(5, 6, 7, 8호선)과 운행시간이 보다 더 오래된 1, 2, 3, 4호선에 대한 객차, 승무원석 등의 실내환경을 비교할 필요가 있다.

2) 운행시간대별

Table 2에서 제시한 호선별 PM₁₀과 PM_{2.5}농도는 07:00부터 21:00(혹은 19:30, 20:00)까지 모니터링한 값을 전체 평균한 값이다. 지하철은 광범위한 오염원을 가지고 있고 오염물질의 발생과 농도는 계절, 승객의 수, 대기의 오염 정도 등에 영향을 받기 때문에 운행시

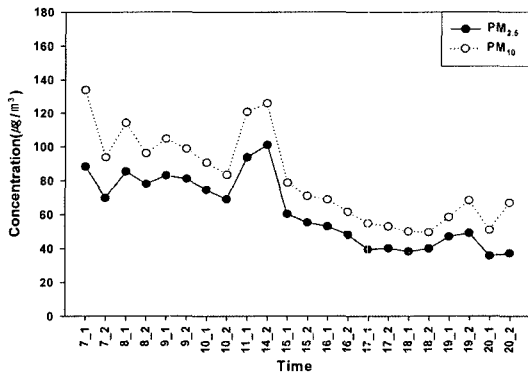


Fig. 2. Daily variation profile for PM_{10} and $PM_{2.5}$ by operating hour (7_1 shows between AM 7:00 and AM 7:30, 7_2 between AM 7:31 and 08:00).

간별로 농도의 변화는 일어날 수 밖에 없다. 따라서 지하철 환경을 평가할 때 시간별로 각종 오염물질의 농도를 모니터링하고 평가하는 것이 필요하며 이러한 자료를 근거로 관리대책을 수립하는 것이 효율적이다. Fig. 2는 지하철 운행시간대(30분 간격)별로 PM_{10} 과

$PM_{2.5}$ 농도의 변화이다. 아침 07:00부터 21:00(혹은 19:30, 20:00)까지 30분 간격으로 평균한 농도의 변화를 나타낸 것이다. PM_{10} 은 아침 출근시간대인 07:00에서 07:30($133.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 그리고 14:31에서 15:00($125.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 시간대가 가장 높았다. 다음으로 높은 농도를 나타낸 시간대는 08:01에서 08:30 그리고 11:01부터 11:30 였다. 이후 14:31에서 15:00시간대를 제외한 오후 시간대는 특별히 유의하게 높은 PM농도가 관찰되지 않았다.

$PM_{2.5}$ 의 시간대별 농도의 변화도 PM_{10} 과 비슷한 경향을 나타냈다(Fig. 2). 전반적으로 오전 출근시간대(07:00-10:00)가 오후보다 높았다. 14:31에서 15:00까지 $101.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높게 나타났다. 특별히 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 농도가 오후 2시와 3시에 이상적으로 높은 원인을 추정하지 못했다. 오전과 오후로 구분하여 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 평균농도를 비교하면 오전이 오후보다 유의하게 높은 농도를 나타냈다($p=0.000$).

위(“지하철 호선별”)에서 고찰한 바와 같이 지하철 승무원실에서 PM농도는 운행시간대에 따라 농도의 차이가 있었지만 큰 변화는 관찰되지 않았다. 이것은 승무

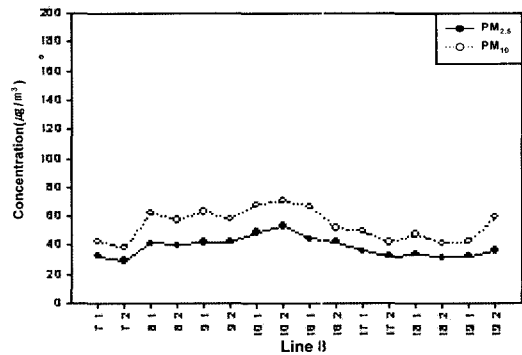
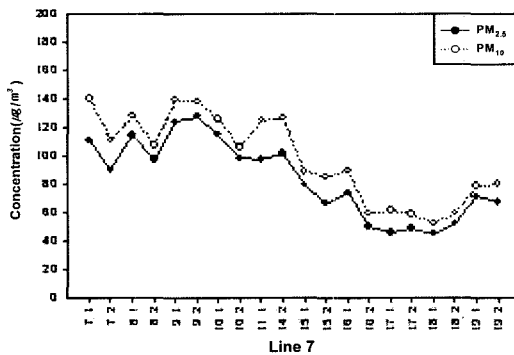
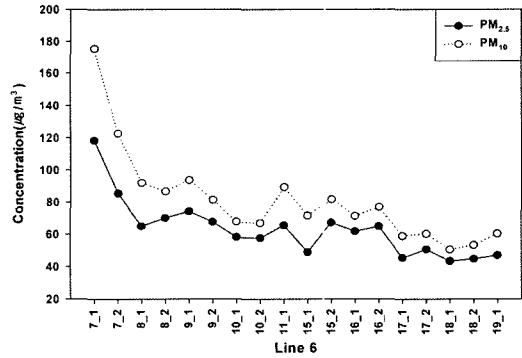
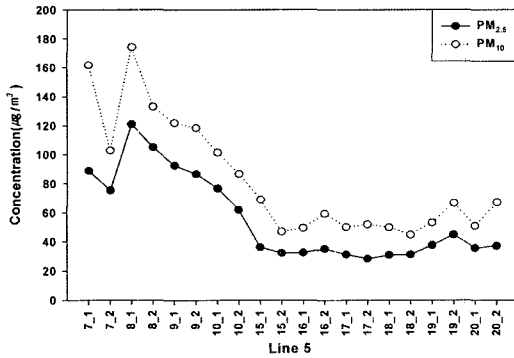


Fig. 3. Daily variation profile for PM_{10} and $PM_{2.5}$ by subway line and operating hour (7_1 shows between AM 7:00 and AM 7:30, 7_2 between AM 7:31 and 08:00).

원실에서 PM농도는 객차나 승강장보다 변화가 크지 않는 것으로 판단된다. 즉, 지하철 환경(혼잡함, 안전운행, 소음 등) 때문에 승무원실은 외부와 격리되어 있어 상대적으로 승강장이나 대기의 오염 등에 영향을 덜 받는 것으로 판단된다. 오히려 승무원실의 PM농도는 승강장과 대기보다는 객차의 오염농도에 영향을 받을 것으로 추정된다. 승무원의 환기구조는 객차로부터 승무원실로 공기가 유입되고 배기장치는 설치되어 있지 않은 설계이다. 따라서 승무원실은 배기가 되지 않으므로 항상 양압(positive pressure)이 되어 객차에서 공기 유입은 원활하게 일어나지 않는다. 또한 급기가 승무원 바로 위에서 머리에 국소적으로 이루어지므로 국소냉방 등의 불편함 때문에 대부분의 승무원이 급기를 차단해 버린다. 이러한 이유 때문에 승무원실로 외부(객차, 승강장, 대기 등) 공기 유입은 거의 일어나지 않는다. 지하구간에서는 승무원이 창문을 거의 열지 않으므로 승무원실로 신선한 공기는 거의 유입이 되지 않은 상태이다. 그러나 지상구간을 운행할 때 창문을 열어 자연환기를 시키는 경우가 있다.

3) 위치별(지상과 지하)

t-Test에 의한 결과, 모든 지하철 호선의 지하에서 지상보다 PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도가 유의하게 높은 것으로 나타났다(p=0.000). 특히, 7호선과 8호선은 지하의 PM₁₀과 PM_{2.5}농도가 지상보다 거의 2배 정도 높은 것으로 나타났다(Table 2와 Fig. 4 참조). 모든 지하철에서 지하의 PM농도가 지상보다 높은 원인은 환기 때문으로 판단된다. 지하는 자연환기가 지상보다 원활하게 이루어지지 않아 대부분의 공기순환 및 교환은 기계에 의한 강제 환기(forced ventilation)에 의존할 수밖에 없다. 그러나 강제 환기가 원활하지 않거나 설계의 결함 등으로 신선한 공기가 외부로부터 주기적으로 공급되

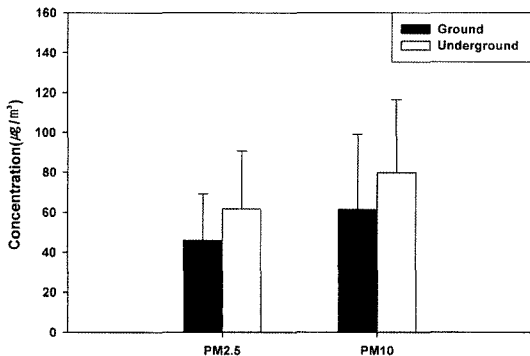


Fig. 4. Daily variation profile for average concentration and standard deviation for PM₁₀ and PM_{2.5} by subway location.

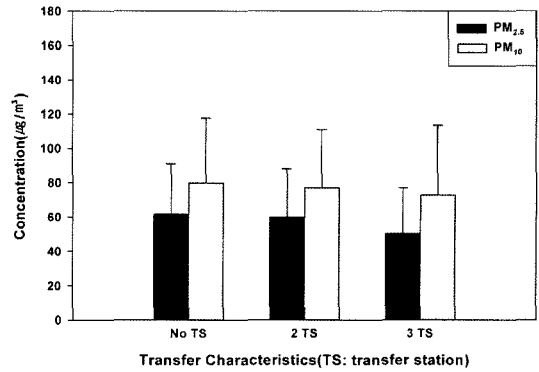


Fig. 5. PM₁₀ and PM_{2.5} concentration by the number of transfer station (TS).

지 않으면 지하에서 PM 등 오염물질의 농도는 높아질 수 있다. 본 연구에서 지하 구간을 운행할 때 모니터링 한 승무원실 PM농도는 우려할 수준은 아니지만 지하철 6, 7호선의 평균 PM_{2.5}농도는 미국환경부의 대기기준을 초과하였다.

4) 환송특성별

측정한 역의 환송특성(환송이 없는 경우, 환송 2개 역, 환송 3개역)에 따라 PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도를 비교하였다. 환송특성에 따라 승무원실의 PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도는 유의한 차이가 없었다(Fig. 5 참조).

2. 이산화탄소(CO₂)와 일산화탄소(CO) 농도 특성

지하철 5호선부터 8호선 승무원실에서 측정된 CO₂와 CO농도 결과는 Table 3에 제시되어 있다. 일변량분석(univariate ANOVA)결과, 지하철 특성(호선: 5, 6, 7, 8호선, 위치: 지상과 지하), 운행시간대: 오전과 오후, 환송특성: 환송역 수)이 CO₂와 CO농도에 모두 유의하게 영향을 미치는 것으로 나타났다(CO₂: R²=0.245, p=0.000; CO: R²=0.649, p=0.000). 설명력(R²)을 볼 때 특별히 지하철 특성이 CO농도에는 더욱 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 지하철 특성별(호선, 위치, 운행시간대, 환송특성)로 농도의 특성을 분석하였다.

1) 지하철 호선별

지하철 5, 6, 7, 8 호선의 승무원실에서 측정된 CO₂ 평균 농도는 5호선을 제외하고 모두 환기기준인 1,000 ppm을 초과하였다. 다중회귀분석결과, CO₂농도는 7호선이 가장 높고 8호선, 6호선, 5호선 순이었다(p<0.05). 특별히 7호선과 8호선 승무원실의 CO₂농도는 항상 1,000 ppm이상으로 나타나 환기상태는 불량한 것으로 추정할 수 있다. 특히, 지하철 7호선은 “1”항에서 언급했던 PM농도와 마찬가지로 CO₂ 농도도 다른 지하철

Table 3. The concentration of CO₂ and CO by subway line and subway location (Mean ± SD)

	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8	Total
No monitored	5,503	4,925	5,450	4,488	20,366
CO ₂ , ppm					
Ground	NA	NA	1,415 ± 502	1,218 ± 589	1,381 ± 523
Underground	989 ± 271	1,063 ± 433	1,490 ± 628	1,219 ± 570	1,181 ± 524
Total	989 ± 271	1,063 ± 433	1,481 ± 615	1,219 ± 571	1,189 ± 525
CO, ppm					
Ground	N/A	N/A	3.95 ± 0.49	3.74 ± 0.34	3.91 ± 0.47
Underground	3.14 ± 0.64	3.61 ± 0.51	4.10 ± 0.46	3.71 ± 0.33	3.62 ± 0.62
Total	3.14 ± 0.64	3.61 ± 0.51	4.08 ± 0.47	3.71 ± 0.33	3.63 ± 0.61

NA: Not Applicable

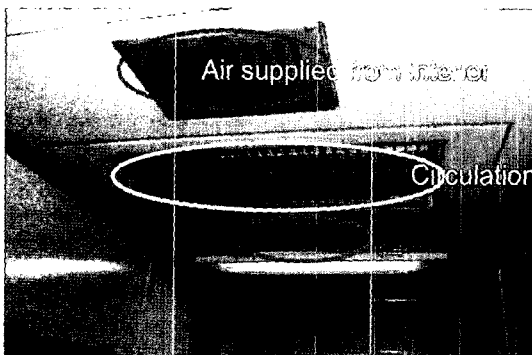


Photo 1. Ventilation system to supply air from interior subway without exhausting air into subway driver cabin.

호선에 비해 유의하게 높은 것으로 나타났다.

위(“지하철 호선별”)에서 고찰한 바와 같이 지하철 5, 6, 7, 8호선의 환기구조는 객차에서 공기가 유입되고 배기장치가 없는 설계이다. 따라서 공기의 순환은 원활하

게 이루어지 않을 뿐만 아니라 객차로부터 공기가 유입된다 해도 승무원실의 오염농도를 낮출 수 있는 신선도는 낮다. 이것은 고찰한 바와 같이 객차의 오염도가 높은 경우가 많기 때문이다. 또한 승무원이 직접 문을 열지 않으면 외부 공기가 전혀 유입되지 않은 밀폐 상태가 된다. 승무원실은 지하구간을 운행할 때 소음과 먼지 때문에 문을 거의 열지 않아 외부 공기의 유입은 거의 없다. 지상구간에서 가끔 문을 열어 외부 공기가 유입되지만 충분한 공기량이 되지 않을 수 있다. 밀폐된 공간의 승무원실에서 PM, CO 등 오염인자의 농도가 높아 신선한 공기가 부족하면 불쾌감, 답답함 등 안전 운전엔 영향을 미칠 수 있는 가능성이 있다. 승무원은 지하철 운행의 안전을 모두 책임지고 있으므로 실내 환경의 기준과는 상관없이 승무원실의 실내 환경을 가능하면 쾌적하게 조성하여 안전한 심리적, 육체적인 상태를 유지할 수 있도록 하는 것이 바람직하다.

2) 운행시간대별

Fig. 6과 Fig. 7은 지하철 운행시간대별(07:00부터

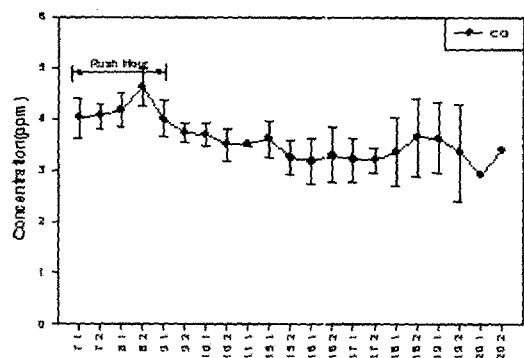
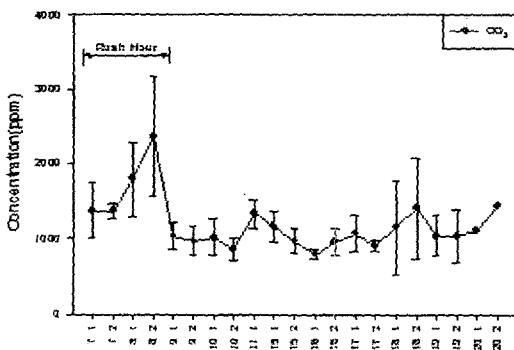


Fig. 6. Daily variation profile for CO₂ and CO by operating hour (7_1 shows between AM 7:00 and AM 7:30, 7_2 between AM 7:31 and 08:00).

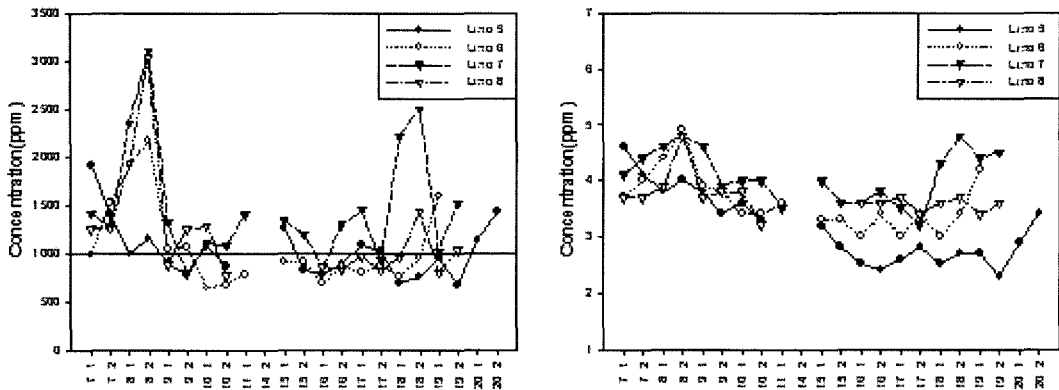


Fig. 7. Daily variation profile for CO₂ by operating hour (7_1 shows between AM 7:00 and AM 7:30, 7_2 between AM 7:31 and 08:00, top: CO₂, bottom: CO).

10:00까지) 그리고 호선별로 30분 간격으로 평균한 CO₂와 CO농도의 변화를 나타낸 것이다. 시간대별 CO₂와 CO의 농도변화도 PM₁₀의 농도변화와 비슷한 경향을 보였다. 즉 아침 출근시간대인 07:00에서 09:00까지 가장 높은 농도(CO₂: 1,365 ppm-2,363 ppm, CO: 4.0-4.6 ppm)를 나타냈다. 가장 높은 농도를 나타낸 시간대는 08:30에서 09:00사이로 CO₂는 2,363 ppm 그리고 CO는 4.6 ppm이었다. 오후에는 오전보다 농도가 낮아 졌다가 저녁퇴근 시간대인 18:00부터 다시 높아지기 시작하여 모두 환기효율기준인 1,000 ppm을 초과하였다. 오전에 측정된 CO₂와 CO농도가 오후보다 유의하게 높았다(p=0.000).

본 연구에서 측정된 CO의 평균농도(3.6 ppm)는 Chan 등(2002b)이 14:00-16:30와 저녁퇴근시간대(17:00-19:30)에 중국 Guangzhou의 공기조화장치가 설치된 지하철 객차에서 측정된 평균 CO농도(3.1 ppm, 범위: 1.7-4.5 ppm)⁷⁾보다 높았다.

3) 위치별(지상과 지하), 환승특성별

t-Test에 의한 분석결과, 운행구간의 위치(지하와 지상) 및 환승특성별 CO₂와 CO의 유의한 농도차이는 없었다(Table 3 참조).

3. PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂, CO간의 상관

PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂, CO간의 상관(correlation)을 분석한 결과, 변수 서로 간에 모두 유의한 상관을 나타냈다(p<0.01). 가장 밀접한 상관을 보인 변수는 PM₁₀과 PM_{2.5}로서 0.884였다. 이러한 결과는 PM₁₀ 농도 중에서 PM_{2.5} 농도가 차지하는 함량이 높아²⁾ 농도변화에 서로 밀접한 연관이 있다는 것을 의미한다.

한편, PM₁₀농도(독립변수)에 의해 PM_{2.5}농도(종속변

수)를 예측할 수 있는 회귀방정식은 다음과 같다.

$$PM_{2.5} (\mu g/m^3) = 10.23 + 0.569 PM_{10} (\mu g/m^3) \\ (R^2=0.714, p=0.000, n=39634)$$

이 회귀방정식에서도 PM₁₀농도는 PM_{2.5} 농도 변화의 71.4%를 설명할 수 있는 매우 유의한 관련성을 나타냈다. PM₁₀은 자연 상태에서 발생하는 거대(coarse) 입자 크기와 PM_{2.5}를 포함한다. 거대입자크기의 근원은 공사, 자연적인 먼지 등이다. PM_{2.5}는 2차로 발생하는 미세한 크기의 오염물질 입자로서 연소과정(combustion process), 즉 자동차 배출물, 공장 연소 배출물에 의해서 생기는 오염물질이다. 도시의 대기나 지하철에서 측정된 PM_{2.5}의 오염원은 대부분 자동차 배출물(exhaust)로 판단할 수 있다.¹⁰⁾ 또한 결과는 PM₁₀ 농도 중에서 PM_{2.5} 농도가 차지하는 함량이 높은 것은²⁾ 지하철에서 발생하는 먼지는 2.5 μm 이하의 먼지를 발생시키는 외부 대기의 자동차와 그리고 지하철 운행이 끝난 후 지하철에서 먼지를 제거하는 디젤 청소차량 등에 의한 영향을 크게 받기 때문으로 판단된다. 따라서 지하철 구간에서 PM 오염원의 주범은 자동차 등이기 때문에 PM_{2.5}의 농도의 변화는 PM₁₀의 농도변화와 상관이 있는 것은 당연하다.

CO₂와 CO의 상관도 0.731로서 매우 밀접한 상관을 나타냈다. CO₂가 승객의 호흡산물이기도 하지만 CO와 마찬가지로 유기물의 연소산물이기 때문에 유의한 상관을 나타낸 것으로 판단된다. CO는 PM₁₀과 PM_{2.5}와의 상관도 각각 0.451과 0.520로 나타나 CO₂에 의한 상관 0.154, 0.171보다 훨씬 높다. 흥미로운 점은 CO와 PM_{2.5}와의 상관이 PM₁₀보다 높다는 점이다. 위에서 고찰한 바와 같이 CO는 유기물이 완전하게 연소되지

Table 5. Correlation matrix among PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂, and CO

Classification		PM ₁₀	PM _{2.5}	CO ₂	CO
PM ₁₀	Pearson r	1	0.884**	0.154**	0.451**
	no. monitored	39,634	39,634	20,366	20,366
PM _{2.5}	Pearson r	0.884**	1	0.171**	0.520**
	no. monitored	39,634	39,634	20,366	20,366
CO ₂	Pearson r	0.154**	0.171**	1	0.731**
	no. monitored	20,366	20,366	20,366	20,366
CO	Pearson r	0.451**	0.520**	0.731**	1
	no. monitored	20,366	20,366	20,366	20,366

** : p<0.01

않을 때 발생하는 배출가스이고 PM_{2.5}도 자동차 연료의 연소과정에서 배출되므로 상관성이 높은 것으로 판단된다. 즉, 지하철에서 CO의 주요 발생원은 PM_{2.5}와 마찬가지로 디젤연료를 이용하는 자동차의 배출물(diesel exhaust)일 것으로 추정된다.

IV. 결 론

일변량분석(univariate ANOVA)결과, 지하철 특성(호선: 5, 6, 7, 8호선, 위치: 지상과 지하), 운행시간대: 오전과 오후, 환승특성: 환승역 수)이 PM은 물론 CO₂와 CO농도에 모두 유의하게 영향을 미치는 것으로 나타났다(p=0.000). 시간대별 PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂, CO의 농도변화도 비슷한 변화형태를 나타냈다. 아침 출근시간대인 07:00에서 09:00까지 가장 높은 농도를 나타냈고 오후에는 오전보다 농도가 낮아 졌다가 저녁퇴근 시간대인 18:00부터 다시 높아지기 시작하는 것으로 조사되었다. 7호선이 다른 지하철에 비해 PM₁₀, PM_{2.5},

CO₂, CO의 농도가 유의하게 높았다. PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂, CO간의 상관(correlation)을 분석한 결과, 변수 서로 간에 모두 유의한 상관을 나타냈다(p<0.01). 가장 밀접한 상관을 보인 변수는 PM₁₀과 PM_{2.5}로서 0.884였다. 회귀방정식에서도 PM₁₀농도는 PM_{2.5} 농도 변화의 71.4%를 설명할 수 있는 매우 유의한 관련성을 나타냈다. CO는 PM₁₀과 PM_{2.5}가 각각 상관도 0.451과 0.520으로 CO₂(PM₁₀:0.154, PM_{2.5}:0.171)에 의한 상관보다 훨씬 높았다.

참고문헌

1. 환경부 : 지하생활공간 공기질 관리법 시행규칙 개정령, 2004.
2. 박동욱, 윤경섭, 박수택, 하권철 : 서울 일부 지하철 객차와 승강장에서 측정된 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도의 특성. 환경보건학회지, **31**(1), 1-8, 2005.
3. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., ASHRAE Standard 62-2001, "Ventilation for Acceptance Indoor Air Quality", ISSN 1041-2336, 2001.
4. Environmental Protection Agency : National Ambient Air Quality Standards (NAAQSS), <http://www.epa.gov/air/criteria.html>.
5. 서울특별시 지하철 건설본부, <http://subway.seoul.go.kr/>.
6. 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. *Atmospheric Environment*, **36**, 3363-3373, 2002a.
7. Chan, L. Y., Lau, W. L., Zou, S. C., Cao, Z. X. and Lai, S. C. : Exposure level of carbon monoxide and respirable suspended particulate in public transportation modes while commuting in urban area of Guangzhou, China. *Atmospheric Environment*, **36**, 5831-5840, 2002b.