

서울시 지하철 객차내에서의 미세먼지 농도 평가

노영만 · 박화미[†] · 이철민 · 김윤신 · 박동선¹ · 김석원²

한양대학교 환경 및 산업의학연구소 · ¹주) 이플러스티 · ²대한산업보건협회

A Study of PM levels in Subway Passenger Cabins in Seoul Metropolitan area

Young-Man Roh · Wha Me Park[†] · Choel Min Lee · Yoon Shin Kim · Dong Sun Park¹ · Suck Won Kim²

¹Institute of Environmental and Industrial Medicine, Hanyang University

¹EpludT Co., Ltd

²Korean Industrial Health Association

This study was performed to investigate the concentrations of PM(PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁) and its affecting factors in the subway from line 1 to line 8 in Seoul metropolitan area, from Sep. 1 to 30, 2005. PM concentrations were measured at the entrances and centers in subway passenger cabins by a light scattering equipment. And the affecting factors to PM were estimated based on the number of passenger, door open and close and running area etc.

The geometric means of PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ concentration in Seoul subway passenger cabins were 214 μ g/m³, 86.6 μ g/m³ and 27.0 μ g/m³, respectively. These mean concentrations in subway carriage were higher when it ran on an underground track than on a ground track. And running time(7AM-9AM,

11AM-13PM, 6PM-8PM) significantly influenced to the concentrations of PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁. Daily profile of PM₁₀ and PM_{2.5}, PM₁ expressed as an 10 minutes average, showed similar variation pattern over day period. In correlation analysis, significant relations among PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ were detected(p<0.01). In particular, correlation coefficient between PM₁₀ and PM₁ was highly significant(r=0.94). Further study is needed to identify the sources of PM in subway cabins and to compare pollutants concentration among subway lines.

Key Words : PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁, subway, passenger cabin

I. 서론

국내 지하공간은 주로 지하철, 지하상가, 지하주차장 등의 형태로 널리 이용되고 있다. 특히 지하공간개발의 모체인 서

울시 지하철은 1974년 제1호선 9개역을 시작으로 제2, 3, 4호선이 1985년 10월에 완전 개통되었으며, 현재는 8개노선, 총 316 역사가 개통운행 중이며 2011년에는 3기 지하철이 완공되어 서울시 교통분담률의 절반에 가까운 48%를 기록할 것으로 예상하고 있다.(Choi H.W., 2004)

접수일 : 2006년 7월 21일, 채택일 : 2007년 1월 12일

† 교신저자 : 박화미 (서울시 성동구 행당동 17번지 한양대학교 환경 및 산업의학연구소,

TEL : 02-2220-1510, E-mail : wmpark2045@hanmail.net)

이러한 지하철 노선의 확충으로 인한 지하철 공기질의 악화는 인간의 건강에 위대한 영향을 직·간접적으로 줄 수 있으며(Perry et al., 1994), 지하공간의 오염이라는 심각성을 내포하고 있다.

현재 환경부에서는 국내 실내환경 분야를 통합하기 위하여 2004년 관련법을 개정하여 기존의 “지하생활공간공기질 관리법”을 중심으로 하여 각 기관에서 별도로 관리되고 있던 대상을 포함하여 “다중이용시설 등의 실내공기질관리법”을 제정하여 관리하고 있으나 아직도 대중교통수단, 특히 지하철 내 실내공기질 조사 및 이용객의 건강위해성평가 등의 연구 수행은 부족한 실정에 있다.

특히 지하철에서의 미세먼지 오염원은 지하철 이용 승객들의 이동 중 발생하는 미세먼지, 열차의 운행과정에서 배출되는 미세먼지, 그리고 환기를 위해 도입되는 외부 공기 속에 미세먼지 등이 복합적으로 작용하여 내부 오염농도를 결정하는 것으로 알려져 있다.

국내에서의 지하철에서 발생하는 미세먼지(PM_{10})과 관련된 연구는 조영민 등(2005)의 과천선에서의 PM_{10} 농도, 김진경 등(2004)의 1~4호선에서의 14개 환승역의 승강장에서 PM_{10} 농도, 차재두 등(2003)의 지하철 1~4호선 대표역 1개 역씩을 선정하여 지하철 역사내의 적절한 환경기준의 달성을 위한 합리적인 PM_{10} 저감방안을 모색하기 위하여 지하철 역사내의 외기, 대합실, 승강장, 터널 구간의 PM_{10} 오염수준 측정 및 농도변화 추이를 분석, 김민영 등(2003)의 열차풍이 지하철역 미세먼지 농도에 미치는 영향 조사, 전재식 등(2000)의 9개 역사에서의 미세먼지(PM_{10} , $PM_{2.5}$)농도 등이다. 이들이 연구한 조사대상은 사람들이 지하철을 이용하는 시간의 대부분인 객차 내부가 아닌 객사(승강장, 대합실, 환승통로, 매표소) 등이었다.

지하철 객차 내부에서의 미세먼지에 관한 연구로는 박동욱 등(2005)의 4개 호선 총 102개 구간 조사, 박현석 등(2005)의 5~8호선 승무원석에서의 미세먼지 특성 평가, 김민영 등(2004)의 1~8호선에서의 미세먼지의 변동특성에 관한 연구, 김윤신 등(1994)의 4개 노선에서의 PM_{10} 농도 뿐이고, 지하철 객차 내가 아닌 철도 내부에서의 미세먼지 연구가 있을 뿐이다.

외국의 경우 Pfeiff et al.(1999)과 Adams et al.(2001)은 시민들의 교통 방법 이용형태별로 개인노출평가를 하였는데 지하철 이동 시민그룹이 다른 육상교통 방법(자전거, 버스, 자동차 등)보다 노출정도가 약 3배 ~ 8배 정도 더 높은 것으로 파악되었으며, 특히 총부유먼지와 $PM_{2.5}$ 농도는 택시 운전자에 비해 지하철 이동하는 시민그룹이 각각 8배 및 12배 높은 수준으로 평가되었다. 런던에서 $PM_{2.5}$ 농도는 자전거로 출근하는 사람과 비교했을 경우 지하철 이용시민의 노출정도는

약 10배가 더 높게 나타났다. 중국에서는 Chan L. Y et al.(2002)이 대중교통수단(지하철, 버스, 에어컨 장착버스, 택시)에서 PM_{10} 80개, $PM_{2.5}$ 56개의 샘플을 측정하였고, 멕시코에서도 출·퇴근 시간에 미니버스와 지하철에서 $PM_{2.5}$ 를 각각 측정하였다. 프랑스 파리에서 진행된 Dor et al.(1995)의 연구에 의하면 객차 내 오염물질의 농도는 주변 차량에서의 배출이 자연적으로 또는 환기에 의해 침투하여 영향을 받는다고 보고한 바 있다. 이는 지하철에서의 오염물질은 크게 가스상 물질과 입자상 물질로 분류할 수 있으며, 이들 농도는 환기에 따른 실외 공기질 뿐만 아니라 실내 배출원에 의하여 영향을 받는다는 보고와 같은 결과이기도 하다(Phillips et al., 1993).

본 연구에서는 지하철 객차내에 발생하는 먼지의 입자의 크기에 따른 농도변화 특성을 파악하여 서울지역 지하철 객차 내의 실내공기질 관리를 위한 기초 실태조사 자료의 확보를 목적으로 한다.

II. 연구대상 및 방법

1. 조사대상

서울 지하철 전 노선 1~8호선을 대상으로 2005년 9월 1일부터 9월 30일까지 한달 동안 조사하였다. 1호선은 시발역 부천역에서 종착역 의정부북부역, 2호선은 방배역에서 방배역, 3호선은 대화역에서 수서역, 4호선은 당고개역에서 한대역, 5호선은 상일동역에서 방화역, 6호선은 연신내역에서 봉화선역, 7호선은 온수역에서 도봉산역, 8호선은 모란역에서 암사역까지가 노선별 측정장소이며, 측정시간은 일일 출퇴근 시간대와 비교적 이용자가 적은 시간대를 고려하여 아침 07시부터 09시 및 18시부터 20시까지를 승객 밀집 시간으로, 11시부터 1시까지를 승객 비밀집 시간으로 구분하여 총 3개의 시간대로 나누어 이루어졌으며, 각 노선별로 총 3개 시간에 걸쳐 3회 연속하여 조사가 이루어졌다.

2. 조사방법

광산란 방식의 휴대용장비(DustMate Turnkey Instruments Ltd)를 이용하여 공기 중 입자상물질을 PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1 로 구분하여 10초 간격으로 연속 측정하였다. 본 연구에 사용된 DustMate(UK)는 환경모드에서 입경의 감지 범위는 0.4~20 μm 이며 먼지의 입경이 20 μm 이상인 거대입자의 경우 입경의 크기를 20 μm 로 평가하여 질량 분석한다. 농도를 나타내는 범

위는 $0\sim 60\text{mg/m}^3$ 이다. 펌프의 유량은 500cc/min 으로 조절하였으며, 광산란장비의 미세먼지 농도 QA/QC를 확보하기 위해 측정 전 기기보정을 위해 제조회사에 보정을 의뢰하였다. 본 측정방법과 환경부 공정시험법의 주시험방법인 Mini Volume air sampler를 이용한 결과와 비교 평가하기 위하여 광산란방식으로 측정할 때 일부를 주시험법으로 side-by-side 시료를 포집하여 두 측정결과를 비교 평가하였다.

전체 열차 중 중간 열차의 중앙에서 이루어졌으며 측정 위치는 출입문 개폐여부에 따른 미세먼지 농도분포를 위해 출입문 입구 선반을 1개 지점으로, 출입문 개폐여부에 있어 영향을 덜 받는 중앙 선반을 1개 지점으로, 총 2개 지점을 선정하여 조사하였다. 또한 객차 내 승객수와 미세먼지간의 관계를 조사하기 위해 기록자가 탑승하여 각 노선별, 역별 승객수의 변화를 기록하였다.

3. 자료처리

통계패키지 SPSS Version 12.0을 이용하여 DustMate에서 10초마다 측정한 자료를 모두 분석하였다. 자료는 출입문이 열리고 닫힐때, 지상과 지하 운행구간, 측정 시간대, 측정 위치가 입구 또는 중앙 등으로 구분하여 분석하였다. 각각의 특성별 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, PM_1 농도 차이는 독립표본의 t-Test로 검정하였으며, 입자상물질의 입경크기별 관련성 및 혼잡도와 농도와의 관련성 유무를 확인하기 위해 피어슨 상관분석을 수행하여 제시하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 객차 내 미세먼지 농도 분포

서울시 지하철 호선별 객차 내 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 및 PM_1 의 전체 평균농도는 각각 $214.0\pm 101.2\mu\text{g/m}^3$, $86.6\pm 39.0\mu\text{g/m}^3$, $27.0\pm 11.4\mu\text{g/m}^3$ 로 PM_{10} 의 경우 환경부의 '다중이용시설 등의 실내 공기질관리법'에서 정하고 있는 다중이용시설내의 PM_{10} 농도 기준인 $150\mu\text{g/m}^3$ 을 초과하는 것으로 나타났으며, $\text{PM}_{2.5}$ 역시 미국 EPA에서 정하고 있는 기준인 $65\mu\text{g/m}^3$ 을 초과하는 것으로 나타났다(표 1).

이는 박동욱 등(2005)이 1, 2, 4, 5호선 객차내에서 연구한 PM_{10} 의 평균 $144.4\mu\text{g/m}^3$ 보다 높았으며 $\text{PM}_{2.5}$ 의 평균 농도 $118.4\mu\text{g/m}^3$ 보다는 낮았다. 또한곽현석 등(2005)의 5~8호선 승무원실에서 측정된 농도(PM_{10} : $79.1\mu\text{g/m}^3$, $\text{PM}_{2.5}$: $61.1\mu\text{g/m}^3$)보다 훨씬 높은 농도 결과를 보였으며, 이는 승객이 타고 내

릴때의 승강장으로부터의 미세먼지 등의 오염물질 유입, 이용 승객수에 따른 오염, 출입문의 개폐에 따른 영향으로 승무원석보다 객차 내 농도가 더 높은 것으로 판단된다. PM_{10} 의 경우, 김민영 등(2004)의 객차 내에서의 1~8호선에서의 농도 $131.8\mu\text{g/m}^3$ 가 조영민 등(2005)의 4호선 승강장에서의 농도 $79.87\mu\text{g/m}^3$ 보다 높게 나타났으며, 박동욱 등(2005)의 승강장과 객차 내에서의 연구결과에서도 승강장 보다는 객차내에서의 농도가 높은 것으로 동일한 결과를 나타냈다. 이는 Praml 등(2000)의 연구와 마찬가지로 외부 신선한 공기의 공급이 제대로 이루어지지 않고, 객차내에서의 승객들의 움직임, 이동, 승객들의 승차 등으로 미세먼지가 다시 공기중으로 비산하거나 떠있게 됨으로 나타난 결과라 사료된다.

PM_{10} 의 경우 $150\mu\text{g/m}^3$ 미만의 농도를 보인 자료는 전체 자료 중 27.8%에 불과한 것으로 조사되었으며, $\text{PM}_{2.5}$ 의 경우 EPA에서 정하고 있는 기준인 $65\mu\text{g/m}^3$ 미만의 농도를 보인 자료는 전체 자료 중 30.8%인 것으로 조사되었다.

2. 시간대에 따른 입구 및 중앙에서의 미세먼지 농도

아침, 점심, 저녁 시간별 입구와 중앙에서 조사된 PM_{10} 의 농도는 아침의 경우 각각 $237.7\pm 106.5\mu\text{g/m}^3$, $239.4\pm 107.3\mu\text{g/m}^3$ 로, 점심은 $202.4\pm 86.1\mu\text{g/m}^3$, $205.7\pm 82.1\mu\text{g/m}^3$ 로, 저녁은 $195.2\pm 103.8\mu\text{g/m}^3$, $201.4\pm 106.1\mu\text{g/m}^3$ 로 조사되었으며, 입구와 중앙에서 시간대별로 조사된 PM_{10} 의 농도 간에는 아침, 점심, 저녁시간대가 모두 통계적 유의한 차이가 있는 것으로 조사되었다(각 $p<0.01$). 아침, 점심, 저녁 시간별 입구와 중앙에서 조사된 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도는 아침의 경우 각각 $95.3\pm 42.7\mu\text{g/m}^3$, $92.9\pm 42.5\mu\text{g/m}^3$ 로, 점심은 $85.4\pm 31.5\mu\text{g/m}^3$, $83.5\pm 29.8\mu\text{g/m}^3$ 로, 저녁은 $81.6\pm 42.4\mu\text{g/m}^3$, $80.1\pm 39.5\mu\text{g/m}^3$ 로 조사되었으며, 입구와 중앙에서 시간대별로 조사된 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도 간에는 아침, 점심, 저녁시간대가 모두 통계적 유의한 차이가 있는 것으로 조사되었다($p<0.01$). 또한 아침, 점심, 저녁 시간별 입구와 중앙에서 조사된 PM_1 의 농도는 아침의 경우 각각 $29.6\pm 13.1\mu\text{g/m}^3$, $29.1\pm 13.1\mu\text{g/m}^3$ 로, 점심은 $27.2\pm 9.4\mu\text{g/m}^3$, $26.0\pm 8.7\mu\text{g/m}^3$ 로, 저녁은 $25.2\pm 11.5\mu\text{g/m}^3$, $24.6\pm 10.6\mu\text{g/m}^3$ 로 조사되었으며, 입구와 중앙에서 시간대별로 조사된 PM_1 의 농도 간에는 아침, 점심, 저녁시간대가 모두 통계적 유의한 차이가 있는 것으로 조사되었다($p<0.01$). 본 연구에서 조사된 PM_{10} 의 평균농도는 Adams 등(2001)이 여름철 영국 런던 지하철 객차 내에서 조사한 평균농도인 $247.2\mu\text{g/m}^3$ 보다 낮은 것으로 조사되었으나 Chan(2002)에 의해 조사된 중국의 Guangzhou와 Hong Kong의 지하철 객차 내에서 조사된 평균농도인 $67\mu\text{g/m}^3$ 및 $44\mu\text{g/m}^3$ 에 비해 매우 높은 농도를 나타냈다.

3. 운행시간대별 PM₁₀ 및 PM_{2.5}농도

그림. 1은 순환선인 2호선을 제외한 지하철 운행시간대(10분 간격)별로 PM₁₀, PM_{2.5} 농도의 변화이다. PM₁₀, PM_{2.5}의 시간대별 농도의 변화는 서로 비슷한 경향을 나타냈다. 아침 출근시간대인 07:00에서 07:30에서 PM₁₀, PM_{2.5} 값이 가장 높게 나타났으며, 전반적으로 오전 출근시간대가 오후 퇴근시간대(18:00~20:00)보다 높았다. 아침시간대에 최대치를 보이면서 점심시간대(11:00~13:00)에 완만한 농도 분포를 유지하다가 다시 저녁시간대에 증가하는 추세를 나타냈다. PM₁₀, PM_{2.5} 모두 아침>점심>저녁 시간대 순으로 높은 농도를 보이는 즉, 하루 중 시간이 경과함에 따라 농도가 낮아지는 경향을 보였다. 이는 지하철 마지막 운행이 중단된 시간대 이후에 환기시설이 가동되지 않는 상태에서 부유해 있는 먼지가 바닥에 침착된 후 높은 혼잡도의 아침 출근 운행시간대에 환기시설의 집중가동 및 운행에 따른 기류의 증가 등으로 바닥에 있는 먼지가 재부상하여 아침시간대가 다른 시간대보다 높았으며 정상적인 공조시스템이 가동되는 점심과 저녁시간대에도 이러한 영향을 배제 할 수 없는 것으로 사료된다.

4. 출입문 개폐여부 및 운행구간에 따른 미세먼지 농도

지하철 객차의 출입문 개폐에 따른 객차 내 미세먼지 농도는 문이 열렸을 경우 PM₁₀, PM_{2.5} 및 PM₁의 농도는 각각 214.4

$\pm 102.4\mu\text{g}/\text{m}^3$, $87.1\pm 39.1\mu\text{g}/\text{m}^3$, $26.4\pm 11.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 문이 닫혔을 경우 각각 $213.9\pm 100.9\mu\text{g}/\text{m}^3$, $86.5\pm 39.0\mu\text{g}/\text{m}^3$, $25.1\pm 11.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 객차내의 농도가 다소 높은 것으로 나타났으나 통계적으로 유의한 차이는 보이지 않았다(표 2). 이는 문이 열려있는 시간이 짧은데다가 사람이 문을 통해 왕래함으로써 객차에 신선한 공기의 공급 및 객차 내 오염된 공기의 외부로의 유출이 원활하지 않음을 나타내주는 결과이며, 미세먼지 농도의 약간의 증가는 출입문이 열렸을 경우 사람들의 이동에 의해 재비산으로 인해 농도가 다소 증가한 것으로 여겨진다.

지하철의 운행하는 구간 즉, 지상구간과 지하구간에서의 객차 내 미세먼지의 농도를 비교하여 보면 지하구간의 PM₁₀, PM_{2.5} 및 PM₁의 농도는 각각 $218.9\pm 100.3\mu\text{g}/\text{m}^3$, $88.9\pm 38.5\mu\text{g}/\text{m}^3$, $27.5\pm 11.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 지상구간의 미세먼지 농도는 각각 $188.5\pm 101.7\mu\text{g}/\text{m}^3$, $75.5\pm 39.6\mu\text{g}/\text{m}^3$, $23.9\pm 11.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 지하구간의 객차 내 미세먼지의 농도가 지상구간의 객차 내 미세먼지의 농도보다 높은 농도를 나타냈으며, 이의 결과는 통계적으로 유의한 차이를 보이고 있는 것으로 조사되었다. 이는 지하철 운행구간에서의 미세먼지 특성을 조사한 박동욱 등(2005)과 광현석 등(2005)에서의 결과와 같은 분포를 나타내었다.

이는 지하철의 운행구간(지상, 지하)이 PM₁₀, PM_{2.5} 및 PM₁의 농도분포에 영향을 미치는 결과라 볼 수 있으며 지하철 운행시 공기와 객차 외 공기간의 공기 전환이 이루어지고 있음을 간접적으로 시사하는 결과라 할 수 있다.

Table 1. The geometric mean concentration and standard deviation of PM according to measurement points

unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Point	Time	n	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁	P-value
Entrance	7AM-9AM	9856	$237.7\pm 106.5^*$	95.3 ± 42.7	29.6 ± 13.1	<0.01
	11AM-1PM	9291	202.4 ± 86.1	85.4 ± 31.5	27.2 ± 9.4	
	6PM-8PM	9704	195.2 ± 103.8	81.6 ± 42.4	25.2 ± 11.5	
	Sub Total	28851	212.0 ± 101.2	87.5 ± 39.8	27.3 ± 11.6	
Central	7AM-9AM	9797	239.4 ± 107.3	92.9 ± 42.5	29.1 ± 13.1	<0.01
	11AM-1PM	8886	205.7 ± 82.1	83.5 ± 29.8	26.0 ± 8.7	
	6PM-8PM	9622	201.4 ± 106.1	80.1 ± 39.5	24.6 ± 10.6	
	Sub Total	28305	215.9 ± 101.1	85.6 ± 38.3	26.6 ± 11.2	
Total	7AM-9AM	19653	238.5 ± 106.9	94.1 ± 42.6	29.3 ± 13.1	<0.01
	11AM-1PM	18177	204.0 ± 84.2	84.5 ± 30.7	26.6 ± 9.1	
	6PM-8PM	19326	198.3 ± 105.0	80.9 ± 41.0	24.9 ± 11.1	
	Total	57156	214.0 ± 101.2	86.6 ± 39.0	27.0 ± 11.4	

n - number of samples used in the analysis

*GSD - Geometric Standard Deviation

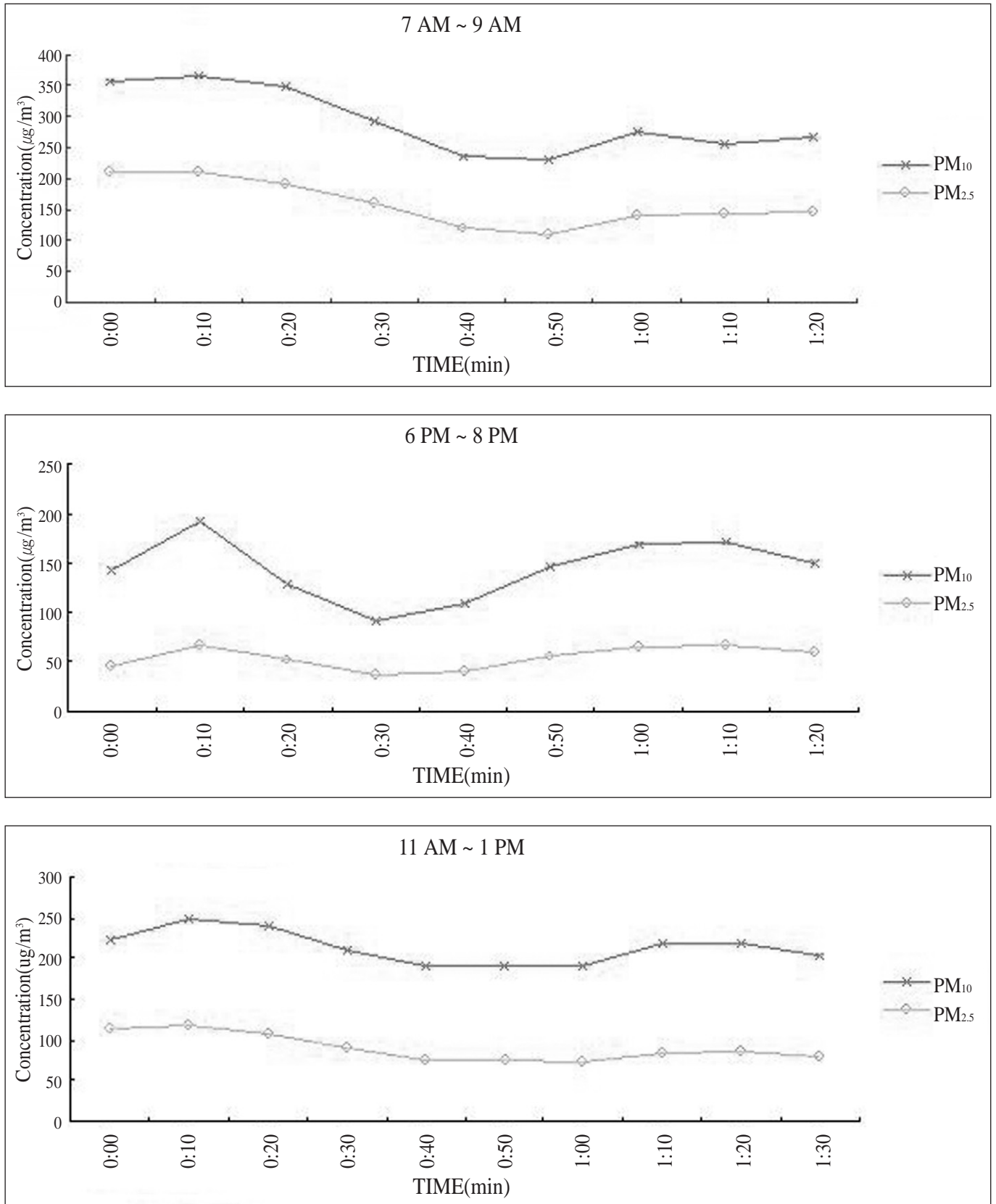


Fig. 1. Daily variation profile for PM₁₀, PM_{2.5} by operating hour

5. 미세먼지 입자 크기별 분포 및 통계적 유의성

운행 중인 객차 내에서 조사된 공기 중의 PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1 간의 상관성을 분석한 결과 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$, PM_{10} 과 PM_1 및 $PM_{2.5}$ 와 PM_1 의 상관의 크기는 각각 0.92, 0.77 및 0.94로 모두 유의한 상관을 나타냈다($p < 0.01$).

가장 밀접한 상관을 보인 변수는 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$, $PM_{2.5}$ 와 PM_1 로서 모두 0.94였다. 이러한 결과는 박동욱 등(2005)에서 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 농도의 특성의 결과처럼 PM_{10} 농도 중에서 $PM_{2.5}$ 가 차지하는 함량이 높아 농도변화에 서로 밀접한 연관이 있다는 것을 알 수 있다.

PM_{10} 은 자연 상태에서 발생하는 거대입자가 포함되어 있는 반면 $PM_{2.5}$ 는 2차로 발생하는 미세한 크기의 오염물질로서 연소과정에서 생기는 물질임을 감안할 때 PM_{10} 농도 중에서 $PM_{2.5}$ 농도가 차지 하는 함량이 높은 것은 외부 대기의 자동차와 지하철 내부의 디젤 청소차량 등에 의해 $2.5\mu m$ 이하의 먼지가 발생되기 때문으로 판단된다.

6. 미세먼지와 혼잡도와와의 상관성

혼잡도란 단위면적 당 승차인원을 승차정원으로 환산한 비율로 지하철 한 칸 정원을 160명(좌석 54, 입석 106명)으로 잡고 이 인원을 혼잡도 100%(적정 승차 인원)으로 계산한다. 본 연구에서는 기록자가 탑승하여 객차 운행시, 각 노선별 승객수의 변화를 조사하였는데, 혼잡도와 거의 같은 결과를 나타냈다. 객차 내 정원 승객수인 160명 이하의 승객인원이 탑승한 객차 내 인구 밀집도와 PM 중 PM_{10} 의 농도와의 관계를 조사한 결과 PM_{10} 은 승객의 수와의 상관의 크기가 -0.15 로 음의 관계가 있는 것으로 조사되었다($p < 0.01$). 현재 국내 '다중이용시설 등의 실내공기질관리법'에서 정하고 있는 지하철에서의 PM_{10} 의 기준인 $150\mu g/m^3$ 을 객차 내에서 유지하기 위한 적정 승객수를 산출하기 위해 회귀방정식을 산출한 결과 승객수(명) = $34.06 - 0.09PM_{10}(\mu g/m^3)$ ($R^2 = 0.30$, $p < 0.01$, $n = 707$)으로 산출되었으며, 현 기준치이하를 유지하기 위한 객차 내 적정 승객수는 61명으로 조사되었다.

Table 2. The geometric mean concentration of PM by subway door close/open and running area

					unit : $\mu g/m^3$
Pollutant	Classification		Mean	GSD*	p-Value
PM_{10}	Door	Closed	213.9	100.9	> 0.05
		Open	214.4	102.4	
$PM_{2.5}$		Closed	86.5	39.0	< 0.01
		Open	87.1	39.1	
PM_1		Closed	25.1	11.2	
		Open	26.4	11.4	
PM_{10}	Area	Underground	218.9	100.3	
		Ground	188.5	101.7	
$PM_{2.5}$		Underground	88.9	38.5	
		Ground	74.5	39.6	
PM_1		Underground	27.5	11.4	
		Ground	23.9	11.7	

n = number of samples used in the analysis

*GSD = Geometric Standard Deviation

Table 3. Correlation coefficient among PM_{10} , $PM_{2.5}$ and PM_1

Classification	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_1
PM_{10}	1.00*	0.92*	0.77*
$PM_{2.5}$		1.00*	0.92*
PM_1			1.00*

* : Correlation is significant at the 0.01 level.

IV. 결론

본 조사연구에서는 서울시내 지하철 전 노선(1~8호선)을 대상으로 2005년 9월 한달간 실내공기오염의 중요한 지표인 미세먼지를 객차 내에서 측정하였다.

PM₁₀, PM_{2.5} 및 PM₁의 농도는 측정위치(입구, 중앙), 측정시간(아침, 점심, 저녁), 운행구간(지하, 지상), 출입문 개폐(열림, 닫힘) 등 모든 장소와 구간에서 국내외 기준치를 초과하였다.

특히 출퇴근 시는 물론이고 승객의 이용이 한가하고 외부 오염이 심하지 않은 점심시간(11~13시)에도 높은 농도임을 감안하면 우리나라 지하철의 미세먼지 농도는 우려할 수준인 것으로 판단된다. 지하철로 유입되는 미세먼지의 근원은 지하철 입구와 출구, 환기장치의 설치 및 관리, 객차내 승객수와 승객의 움직임, 오염된 공기의 유입 등으로 높아질 수밖에 없으며 가능하면 오염농도가 낮은 공기를 공급하여 오염농도를 낮추는 것이 좋은 방법이며 런던이나 일본, 미국처럼 터널이나 지표아래 부분의 청소, 오염된 환기필터의 주기적 교체, 지하철 역사 및 객차 내의 공기질 기준에 관한 법령 등에 의한 정부차원의 특별한 규제가 필요한 사항이다. 또한 미세먼지 농도의 변화패턴 형태, 변화주기, 운행시간 및 구간에 따른 영향의 정확한 분석을 통해 이에 따른 적절한 대책이 필요하다 할 수 있다. 산업장이나 실내환경과 다르게 지하철의 환경인 경우 광범위한 오염원을 가지고 있고, 오염물질의 발생과 농도, 계절별, 이용하는 사람의 수, 대기 오염 정도 등에 많은 영향을 받기 때문에 측정해야 할 오염물질 종류, 기준, 측정방법 등에 대한 근본적인 접근 방법이 달라져야 판단된다. 특히 지하 구간에서의 미세먼지의 농도가 높아지고 있으므로 지하철 역사, 터널 뿐 아니라 지하철 객차내의 정확한 환기 성능 평가를 통하여 환기수준을 높임과 더불어 미세먼지의 발생원을 규명함으로써 보다 깨끗하게 제어되어져야 할 것이다.

REFERENCES

건설교통부, 한국건설기술연구원. 지하철 구간의 환경관리 방안 및 오염도 저감에 관한 연구, 2002
 박현석, 진구원, 김원, 양원수, 최상준, 박동욱. 서울 일부 지하철 승무원석의 PM, 이산화탄소, 일산화탄소 모니터링에 의한 실내 공기질 특성평가. 한국환경보건학회지 2005;31(5): 379-386
 김민영, 이민환, 조석주, 김신도. 지하철 역사내 미세먼지의

변동특성과 동태에 관한 연구. 한국대기환경학회추계학술대회 2004: 383-386
 김민영, 이민환, 여인학, 조석주, 이상열. 열차풍이 지하철역 미세먼지 농도에 미치는 영향조사. 한국대기환경학회추계학술대회 2003: 108-109
 김운신, 홍승철, 전준민. 서울시의 대중교통수단 내 실내공기질에 대한 연구. 한국환경위생학회지 1994; 20(1): 28-38
 김진경, 백남원. 서울 지하철 내 공기 중 먼지의 특성에 관한 연구. 한국환경위생학회지 2004; 30(2): 154-160
 박덕신, 조영민, 이철규, 박병현. 철도 터널에서의 공기질 연구, 한국대기환경학회추계학술대회, 2004; 363-364
 박동욱, 윤경섭, 박수택, 하권철. 서울 일부 지하철 객차와 승강장에서 측정한 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도의 특성. 한국환경보건학회지 2005; 31(1): 39-46
 전재식, 신도철, 이민환, 김민영, 신재영. 서울지역 지하철역사내 공기질 조사. 한국대기환경학회추계학술대회 2000: 359-360
 조영민, 박덕신, 박병현, 박은영. 수도권 전철 과천시 지하철역사의 실내공기질 연구. 한국대기환경학회추계학술대회 2005: 463-464
 차재두, 장철순, 황인조, 김동술. 서울시 지하철 역사 내 PM₁₀ 오염원의 기여도 추정. 한국대기환경학회추계학술대회 2003: 345-346
 Adams HS, Nieuwenhuijsen MJ and Colville RN. Determinants of fine particle(PM_{2.5}) personal exposure levels in transport microenvironments London, UK. Atmospheric Environment 2001; 35: 4577-4566
 Adams HS, Nieuwenhuijsen MJ, Colville RN, McMullen MAS, and Khandelwal P. Fine particle(PM_{2.5}) personal exposure levels in transport microenvironments London, UK. Sci Total Environ 2001; 279: 29-44
 Chan LY, Lau WL, Wang XM, Lee SC, and Chan CY. Commuter exposure to particulate matter in public transportation modes in Hong Kong. Atmospheric Environment 2002; 36: 3363-3373
 Chan LY, Lau WL, Zou SC, Cao ZX, Lai SC. Exposure level of carbon monoxide and respirable suspended particulate in public transportation modes while commuting in urban area of Guangzhou, China. Atmospheric Environment 2002; 36: 5831-5840
 Choi HW, Hwang IJ, Kim SD, Kim DS. 2004. Determination of Source Contribution Based on Aerosol Number and Mass Concentration in the Seoul Subway Stations. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment 2004; 20(1): 17-31.
 Dor F, Moullec YL, Festy B. Exposure of city residents to carbon

- monoxide and monocyclic aromatic hydrocarbons during commuting trips in the Paris metropolitan area. *J Air Waste Manage Assoc* 1995; 45: 103-110
- Perry R and Gee IL. Vehicle emissions and effects on air quality indoor and outdoor. *Indoor Environ* 1994; 3: 224-236
- Pfeifer GD, Harrison RM, Lynam DR. Personal exposures to airborne metals in London taxi drivers and office workers in 1995 and 1996. *Sci Total Environ* 1999; 235: 253-260
- Phillips JL, Field R, Goldstone M, Reynolds JN, Lester JN and Perry R(1993) Relationships between indoor and outdoor air quality in four naturally ventilated office in the United Kingdom. *Atmospheric Environment* 1993; 27A: 1743-1753.
- Praml G, Schirl R. Dust exposure in Munich public transportation : A comprehensive 4-year survey in buses and teams. *Int Arch Occup Environ Health* 2000; 73: 209-214