

서울시 대규모 환승역의 지하철 호선별 PM_{2.5}에 대한 오염현황 연구

Comparison of PM_{2.5} Pollution Status at a Major Transit Subway Station in Seoul

유정길 · 김재혁 · 김경필 · 정수영 · 나규인 · 조효재 · 설경화 · 김기현*

한양대학교 건설환경공학과

(2014년 12월 30일 접수, 2015년 4월 10일 수정, 2015년 4월 24일 채택)

Jung-Gil Yu, Jae-Hyeuk Kim, Kyeong-Phil Kim, Soo-Young Jung, Kyu-In Na,
Hyo-Jae Jo, Kyeong-Hwa Sul and Ki-Hyun Kim*

Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

(Received 30 December 2014, revised 10 April 2015, accepted 24 April 2015)

Abstract

We investigated the pollution levels of PM_{2.5} at Wangsimni station at which four subway lines (Line 2, Line 5, the Jungang line, and the Bundang Line) are simultaneously under the operation. The analysis of PM_{2.5} was made for the period of 1 ~ 11 Nov. 2014. The results of our field campaign were analyzed to assess the effects of various factors and conditions on the PM_{2.5} pollution (such as installation of the screen door, density of floating population, weekdays and weekend, and the depth of platforms). The mean concentrations of PM_{2.5} in each subway line of the Wangsimni station was measured as: the line 2 (22.5 µg/m³); the line 5 (18.3 µg/m³); the Jungang line (31.8 µg/m³); and the Bundang line (32.2 µg/m³). Based on the detailed analysis of PM_{2.5} pollution at four subway lines, we aimed to provide some perspectives on reducing the concentration of ultrafine particles in a highly populated urban area.

Key words : PM_{2.5}, Wangsimni, Subway station, Spatial-temporal variation, Korea, Screen door

1. 서 론

미세먼지란 아황산가스, 질소산화물, 납, 오존, 일산화탄소 등과 함께 대기오염물을 평가하는 하나의 기준 항목으로 중요한 의미를 지닌다. 이들의 발생은 자동

차, 기차, 지하철 등과 같이 다양한 인위적 배출원과 함께 해염, 화산활동과 같은 자연적 배출원 등에 기인한다. 미세먼지(PM₁₀)는 직경이 10 µm 이하의 입자상 물질을 통칭하고, 직경이 2.5 µm 이하의 입자는 초미세먼지(PM_{2.5})로 다시 구분할 수 있다. PM₁₀이 코나 기도에서 상당 수준 걸러지는 데 반해, PM_{2.5}는 산소와 이산화탄소를 교환하는 폐포조직의 모세혈관까지 이동할 수 있다. 따라서 PM_{2.5}는 기관지염, 폐렴같은 호흡기 계통의 질환은 물론, 협심증, 심근경색증 같은 심혈관 질환

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-2220-2325, E-mail : kkim61@hanyang.ac.kr

환의 유발에 기여하는 것으로 알려져 있다. 국제암연구소 (IARC)는 초미세먼지 (PM_{2.5})를 석면, 흡연과 같은 등급의 발암물질로 지정하였다 (Seo *et al.*, 2006).

PM₁₀의 경우, 대기환경보전법에 의하여 1일 (24시간) 평균치는 100 μm^3 이하 그리고, 연간 평균치는 50 μm^3 이하를 관리규정으로 제시하고 있다 (KMOE, 2013). 2015년부터 관리를 개시한 PM_{2.5}의 경우, 대기환경보전법에 의하여 1일 (24시간) 평균치는 35 μm^3 이하 그리고, 연간 평균치는 15 μm^3 이하를 관리규정으로 제시하고 있다 (KMOE, 2013).

대기 중 분진의 거동은 계절적 요인에 민감하게 영향을 받는다. 따라서 일반적으로 겨울과 봄에 특히 높고, 낮보다 아침과 늦은 저녁에 증가하는 양상을 보이는 것으로 잘 알려져 있다 (Jeon, 2010; Kim *et al.*, 2000; Leaderer *et al.*, 1999). 또한 미세먼지는 황사가 빈번하게 발생하는 봄철 그리고 난방연료를 많이 사용하는 겨울철에 높은 농도를 보인다. 반면, 여름에는 비에 의한 세정효과로 인해 낮은 농도를 보인다. 지하공간은 주로 지하철, 지하상가, 지하주차장 등의 형태로 널리 이용하고 있다. 지하철 노선의 확충과 이용인구의 증가로 인한 지하철 공기질의 악화는 여러 형태로 이용자의 건강에 영향을 미칠 수 있다 (Jun *et al.*, 2009). PM_{2.5}는 천식, 두통, 아토피 등 건강상의 피해를 나타내고 특히 임산부와 태아 그리고 노인에게 더 큰 영향을 미친다. 따라서 지하철 이용인구가 증가함에 따라 PM_{2.5}의 적절한 관리가 필요하다. 2013년, 현재 지하역사 (출입통로 · 대합실 · 승강장 및 환승통로와 이에 딸린 시설 포함), 지하도상가 (지상건물에 딸린 지하층의 시설을 포함)는 ‘다중이용시설 등의 실내공기질관리법’ (법률 제10789호)에 따라 적용하고 있다. 이는 다중이용시설, 신축 공동주택 및 대중교통차량의 실내공기질을 알맞게 유지하고 관리함으로써, 그 시설을 이용하는 국민의 건강을 보호하고 환경상의 위해를 예방함을 목적으로 한다. 그러나 아직도 중요한 대중교통수단인 지하철 시설과 관련한 실내공기질에 대한 조사 및 이용자의 건강위해성 등에 대한 평가는 부족한 실정이다. 특히, 지하역사에서 미세먼지 오염은 지하철 이용 승객들의 이동, 열차의 운행과정, 환기를 위해 도입하는 외부 공기 등과 같이 다양한 기작들이 작용한다. 이들의 영향이 복합적으로 나타날 경우, 내부 공기의 오염에 영향을

미친다 (Yang *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2010; Park and Ha, 2008).

지하철 역사와 터널의 공기질이 나빠지면, 전동차 내부의 공기질도 악화되므로 승객들의 건강에 악영향을 초래할 수 있다. 이러한 사실은 다양한 경로를 통해 밝혀졌다 (Roh *et al.*, 2007). 본 연구에서는 이러한 문제의 심각성을 감안하여, 지하철 역사를 중심으로 PM_{2.5} 농도를 측정하고, 이 자료를 토대로 PM_{2.5}의 발생경향을 다양한 관점에서 해석하였다. 이러한 연구를 토대로 미세먼지의 감축을 유도하기 위한 방안을 도출하는 데 일조하고자 하였다. 이를 위해 본 연구에서는 현장조사에서 측정한 왕십리 역사 내의 PM_{2.5} 자료를 통계적 해석에 기반하여 단계별로 평가를 시도하였다. 이를 위해, 왕십리역 지하철 역사 내의 시설물들에 대해 2014년 11월 01일 ~ 11월 11일까지 현장조사를 실시하였다.

2. 연구 방법

2.1 연구시기와 측정방법

왕십리 역사 내의 4개의 지하철 호선 (2호선, 5호선, 중앙선, 분당선)의 오염현황을 각각의 다양한 기준으로 비교할 수 있게 4가지의 조건 (스크린도어의 개방여부, 유동인구상황, 플랫폼의 깊이, 주중/주말 (출퇴근 시간을 고려한 시간대별 조건))을 중심으로 평가하고자 하였다. 이를 위해, 각 호선의 플랫폼에서 PM_{2.5}의 오염상황을 조사하였다. 각 호선별 조사지점 간에 측정방식의 재현성을 유지하기 위하여 기본적으로 동일한 플랫폼 위치 (3-4번)에서 측정을 실시하였다.

11월 1일, 3일, 6일, 10일, 11일에 왕십리 역사의 4개 지하철 노선 (2호선, 5호선, 중앙선, 분당선)의 3-4플랫폼에서 미세먼진측정기 DUSTTRAK™ DRX Model 8533를 이용하여 PM_{2.5}의 농도를 측정하였다. 현장측정은 사람의 호흡기 높이 (1.6 m) 수준에서 진행하였다. 유동인구가 많은 출근시간 (07:33), 퇴근시간 (20:12), 유동인구가 적은 이른 오후시간 (14:36)으로 측정시간을 구분하여, 일일 총 3회 그리고 총 4일에 걸쳐 PM_{2.5} 농도를 측정하였다. 그리고 이를 다시, 주중 주말로 구분하여 PM_{2.5}의 농도를 측정하였다. 또한, 동일한 시간에 2호선과 5호선, 중앙선, 분당선의 미세먼진 농도를

Table 1. Basic information for the analysis of PM_{2.5} at Wangsimni station.

Order	Survey date (8:30AM, 2:30PM, 7:30PM)	Sampling spot	Sampling code	Railroad type	Car count	Wind velocity (m/s)	Wind direction
1	2014-11-01	The line 2	S-1	Single	10	2.3	Southeast
2	2014-11-01	The line 5	S-2	Single	10	2.3	Southeast
3	2014-11-01	The Jungang line	S-3	Double	8	2.3	Southeast
4	2014-11-01	The Bundang line	S-4	Double	8	2.3	Southeast
1	2014-11-03	The line 2	S-1	Single	10	1.1	Northwest
2	2014-11-03	The line 5	S-2	Single	10	1.1	Northwest
3	2014-11-03	The Jungang line	S-3	Double	8	1.1	Northwest
4	2014-11-03	The Bundang line	S-4	Double	8	1.1	Northwest
1	2014-11-06	The line 2	S-1	Single	10	1.7	Northwest
2	2014-11-06	The line 5	S-2	Single	10	1.7	Northwest
3	2014-11-06	The Jungang line	S-3	Double	8	1.7	Northwest
4	2014-11-06	The Bundang line	S-4	Double	8	1.7	Northwest
1	2014-11-10	The line 2	S-1	Single	10	2.5	West
2	2014-11-10	The line 5	S-2	Single	10	2.5	West
3	2014-11-10	The Jungang line	S-3	Double	8	2.5	West
4	2014-11-10	The Bundang line	S-4	Double	8	2.5	West
1	2014-11-11	The line 2	S-1	Single	10	1.4	East
2	2014-11-11	The line 5	S-2	Single	10	1.4	East
3	2014-11-11	The Jungang line	S-3	Double	8	1.4	East
4	2014-11-11	The Bundang line	S-4	Double	8	1.4	East

측정하여 스크린도어의 개방여부, 단선과 복선의 여부, 각 호선별 량 수와 같은 측정지점에 따른 요인과 정보를 표 1에 정리하여 PM_{2.5}의 오염현황을 비교하였다. 그리고 지하철 시설물의 설치 깊이도 하나의 중요한 비교기준으로 활용하였다.

2.2 PM_{2.5} 측정

미세분진측정기는 90° 광산란 센서를 통해, 약 0.1 μm에서 10 μm의 입자크기까지 측정이 가능하다. 본 연구에서는 10초 간격으로 공기중의 미세먼지 측정이 가능한 DUSTTRAK™ DRX Model 8533을 이용하여, PM_{2.5}를 중심으로 분진의 농도를 측정하였다. 본 연구의 시작지점에 마노미터에 의한 교정을 거쳤고, 현장 측정시 영점 교정 후 미세분진을 측정하기 위하여, 사용자교정(User Cal)을 실시하였다. PM_{2.5}임팩터를 이용하여 샘플링을 시작하고, 15분(초기 10분을 제외한 5분간 10초 단위로 측정)자료를 확보하였다.

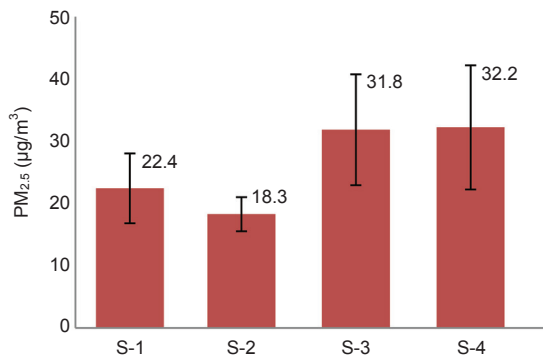
3. 결과와 토론

3.1 스크린도어의 개방 여부에 따른 미세먼지 농도 비교

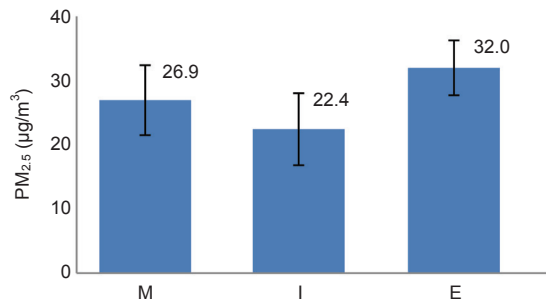
왕십리 역사에는 총 4개의 호선(2호선, 5호선, 중앙선, 분당선)을 운행하고 있다. 4개의 호선 중 2호선과 5호선은 철도와 플랫폼이 스크린도어에 의해 차단되어 있다. 반면, 중앙선과 분당선은 각각 외부와 연결되어 있다. 전체 측정 결과로부터 개방여부를 기준으로 표 2에 그 비교결과를 제시하였다. 그림 1의 결과를 보면, 차단형인 2호선, 5호선의 농도는 각각 $22.4 \pm 5.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $18.2 \pm 2.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 개방형인 중앙선, 분당선의 농도인 $31.8 \pm 8.90 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $32.2 \pm 9.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 높게 나타났다. 특히, 분당선의 농도는 5호선의 농도의 비례 57.4% 더 높은 농도를 나타내며 스크린도어 설치유무에 차이가 나타나는 것을 확인하였다. 이러한 농도차이는 95% 신뢰수준에서 유의한 것으로 나타났다. 이러한

Table 2. Comparison of PM_{2.5} concentration levels based on four major criteria selected in this study.

Order	Exp No.	Sampling code	Sampling spot	PM _{2.5} (μg/m ³)	
				Sample	Ambient
1	E1	S-1	Closed subway	22.4 ± 5.61 (75(N))	24.4 ± 11.2 (30(N))
2		S-2	Closed subway	18.2 ± 2.74 (65(N))	
3		S-3	Opened subway	31.8 ± 8.90 (75(N))	
4		S-4	Opened subway	32.2 ± 9.98 (60(N))	
5	E2A	S-1	Morning rush hour (7:33AM)	26.9 ± 5.44 (25(N))	22.7 ± 6.53 (10(N))
6			Transient hour (2:36PM)	22.4 ± 5.61 (25(N))	25.9 ± 11.6 (10(N))
7			Evening rush hour (8:12PM)	31.9 ± 4.27 (25(N))	24.7 ± 14.9 (10(N))
8	E2B	S-3	Morning rush time (7:33AM)	25.4 ± 6.22 (20(N))	22.7 ± 6.53 (10(N))
9			Transient time (2:36PM)	32.3 ± 9.86 (25(N))	25.9 ± 11.6 (10(N))
10			Evening rush time (8:12PM)	28.9 ± 5.28 (20(N))	24.7 ± 14.9 (10(N))
11	E3	S-2	The Fifth Basement Level	18.2 ± 2.74 (65(N))	24.4 ± 11.2 (30(N))
12		S-1	The First Basement Level	22.4 ± 5.61 (75(N))	
13		S-4	The First Level	32.2 ± 9.98 (135(N))	
14	E4	S-2	Weekdays	18.0 ± 2.95 (255(N))	25.2 ± 12.2 (24(N))
15			Weekends	19.3 ± 1.22 (20(N))	21.5 ± 5.21 (6(N))

**Fig. 1. Comparison of PM_{2.5} levels in relation to the installation of screen door: S-1 (Line 2), S-2 (Line 5), S-3 (Jungang line), and S-4 (Bundang line).**

차이를 감안할 때, 차단형 스크린도어의 설치로 실내 미세먼지 농도를 어느 정도 조절이 가능한 것으로 판단할 수 있다. 외부와 연결되어 있는 분당선, 중앙선인 개방형의 스크린도어는 차단형의 스크린도어와 달리 미세먼지의 농도조절이 어렵다. 따라서 유동인구와 시간대와 같은 변수의 영향과 큰 상관없이 외부의 미세먼지 농도가 가장 큰 변수가 되는 것으로 나타났다. 개방형 스크린도어는 단순히 사고방지를 위한 안전장치의 기능 이상의 역할을 수행하는 것으로 판단할 수 있다.

**Fig. 2. Comparison of PM_{2.5} concentration levels by the measurement time (density) of population of the line number 2: Morning rush hour (M), Intermittent (I), and Evening rush hour (E).**

3.2 유동인구수 차이에 따른 미세먼지 농도

시간대별 기준으로 유동인구의 상황변화에 따라 농도를 비교하였다. 표 2에 전체 측정결과와 평균값으로 유동인구의 상황에 따른 결과를 제시하였다. 더불어 지상의 미세먼지 농도값도 함께 제시하여 외부공기 유입으로 인한 영향도 함께 평가하고자 하였다. 그림 2와 3의 결과에 의하면, 왕십리 역에서 유동인구가 많은 출근시간대(오전 8시~9시)와 퇴근시간대(오후 7시~8시)에 PM_{2.5} 농도가 각각 26.9 ± 5.44 μg/m³와 32.0 ± 5.56 μg/m³로 나타났다. 그리고 유동인구가 적은 이른 오후시간(오후 2시~3시)의 농도는 22.4 ± 5.61 μg/m³

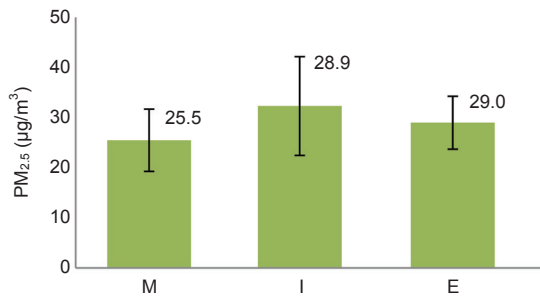


Fig. 3. Comparison of PM_{2.5} levels by density of population of the median line; Refer to Fig. 2 for three symbols of M, I, and E.

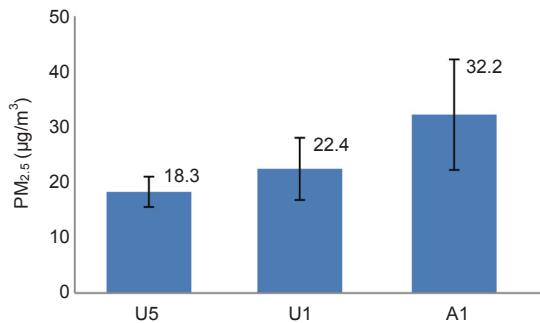


Fig. 4. Comparison of PM_{2.5} levels by underground depth of each subway line: U5 (5th floor-underground), U1 (1st floor-underground), and A1 (1st floor-above-ground).

로 나타났다. 5호선은 유동인구가 많은 출근시간(오전 8시~9시)과 퇴근시간(오후 7시~8시)에 농도가 각각 $23.8 \pm 2.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $27.3 \pm 2.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 유동인구가 적은 이른 오후시간(오후 2시~3시)의 농도는 $18.3 \pm 2.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 지상에 위치한 개방형인 중앙선과 분당선은 중앙선에서 유동인구가 많은 출근시간(오전 8시~9시)과 퇴근시간(오후 7시~8시)의 농도가 각각 $25.5 \pm 6.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $29.0 \pm 5.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 그리고 유동인구가 적은 이른 오후시간(오후 2시~3시)의 농도는 $32.3 \pm 9.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 분당선은 유동인구가 많은 출근시간(오전 8시~9시)과 퇴근시간(오후 7시~8시)의 농도가 각각 $28 \pm 5.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $31.2 \pm 5.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났고, 유동인구가 적은 이른 오후시간(오후 2시~3시)의 농도는 $32.2 \pm 9.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 유동인구가 적은 오후시간에 더 높은 미세먼지 농

도를 나타내었다. 지하에 위치한 차단형인 2호선과 5호선에서는 유동인구가 많은 시간에 미세먼지 농도가 높게 나타났다. 이는 지하철을 이용하는 사람들의 옷에 묻어있던 먼지나, 보행 중 바닥 등에 쌓여있는 먼지를 발생시켜서 농도가 높게 나타나는 것으로 보인다. 그러나, 개방형인 중앙선과 분당선에서는 오히려 유동인구가 적은 이른 오후시간에 미세먼지 농도가 높게 나타났다. 이러한 결과를 감안할 때, 개방형 역사는 유동인구의 영향보다는 외부 미세먼지의 농도가 더 크게 작용하는 것으로 보인다. 실제로 측정 당시 지상의 평균 먼지농도는 오후시간(오후 2시~3시)에 $25.9 \pm 11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 출근시간(오전 8시~9시) $22.7 \pm 6.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 퇴근시간(오후 7시~8시) $24.7 \pm 14.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 높은 값을 나타내며 지상철인 중앙선과 분당선의 경향과 일치하는 것을 확인하였다. 따라서 외부의 미세먼지 농도가 높아 지하철 이용객들이 상대적으로 고농도의 PM_{2.5}에 노출되는 상황을 예상해 볼 수 있다. 유동인구상황에 따른 미세먼지의 농도 차이는 95% 신뢰수준에서 유의한 것으로 나타났다.

3.3 역사 내 플랫폼 깊이에 따른 PM_{2.5} 농도

왕십리 역사 내의 2호선, 5호선, 중앙선, 분당선, 4개의 호선은 지상철(중앙선, 분당선), 지하철(2호선, 5호선)으로 이루어져 있다. 그 호선들은 플랫폼의 깊이에 상당한 차이가 존재한다. 다른 조건은 무시하고, 역사의 깊이만을 기준으로 비교한 결과는 표 2에 제시한 바와 같다. 중앙선과 분당선은 지상 1층, 2호선은 지하 1층, 5호선은 지하 5층으로 구분한 후, 각 호선별 위치에 대해 같은 시간대에 미세먼지 PM_{2.5}의 농도를 조사하여 평균값을 비교하였다. 그림 4를 보면, 지상 1층이 $32.2 \pm 9.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 지하 1층이 $22.4 \pm 5.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 지하 5층이 $18.3 \pm 2.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 이 자료를 분석해 본 결과, 지하 5층에서 지하 1층로 이동하면서 미세먼지의 농도가 22.6% 증가하였다. 또한 지하 1층에서 지상 1층으로 이동하면서 43.7% 증가하였다. 지하 1층과 지하 5층에 비해 지상 1층이 약 60% 정도 높게 나타났다. 이는 지상 1층의 분당선과 중앙선이 외부와 노출된 지상시설물이라 외부 배출원의 농도의 영향을 절대적으로 크게 받는 것으로 보인다. 그러나 이에 반해, 지하 1층과 지하 5층의 2호선과 5호선은 외부 미세먼지 농도의 영향을 상대적으로 적게 받아 낮은 농도를 보인 것

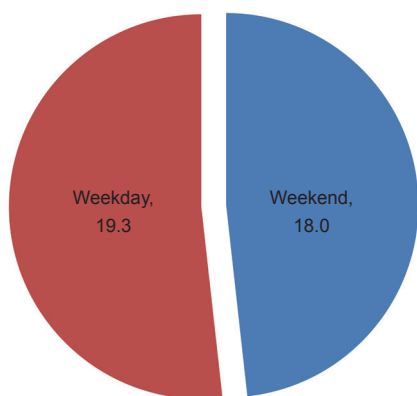


Fig. 5. Comparison of PM_{2.5} levels (μg/m³) between the weekdays and weekends.

으로 사료된다. 이때 깊이에 따른 미세먼지의 농도차이는 95% 신뢰수준에서 모든 비교쌍의 차이가 유의한 것으로 나타났다. 이러한 결과로 미루어보아, 지상 1층인 중앙선과 분당선은 외부배출원의 영향을 크게 받아 지하철인 2호선과 5호선보다 농도가 높다고 판정할 수 있다. 반면에 지하철은 지상철보다 미세먼지의 농도가 낮게 나타났다. 특히, 깊이가 지하 2층에 위치한 5호선이 지하 1층에 위치한 2호선보다 외부공기와와의 접촉이 더 적어 미세먼지의 농도가 더 낮게 나타났다.

3.4 유동인구의 차이에 따른 PM_{2.5} 농도

주중 주말의 유동인구의 차이가 PM_{2.5}의 농도수준에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 다른 조건은 동일하게 두고 주중과 주말이라는 조건으로 PM_{2.5} 자료를 비교한 결과는 표 2에 제시하였다. 또한 그림 5를 보면, 유동인구가 많은 주중의 농도는 $23.3 \pm 4.88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 가 주말에서의 농도인 $19.3 \pm 1.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 20.3% 증가하는 것으로 나타났다. 이때 주중과 주말에 따른 PM_{2.5}의 농도차이는 95%의 신뢰수준에서 유의한 것으로 나타났다. 주중 주말의 유동인구 상황은 현저히 다르다. 토요일은 평일 평균의 76.1%, 일요일은 54.3%를 나타낸다. 따라서 주중의 지하철 이용객이 주말의 지하철 이용객보다 많기 때문에, PM_{2.5}의 농도도 상승한 것으로 판단된다. 이는 위에서 언급한 시간대에 따른 유동인구 상황의 변화가 미세먼지 농도에 미치는 영향과 유사한 관점에서 판단할 수 있다. 또한, 유동인구와 비례하게

실제 지하철의 운행횟수가 늘어나기 때문에 열차 운행 횟수에 따른 영향도 함께 미친다고 유추할 수 있다.

3.5 기존 연구와 비교

본 연구의 결과를 선행연구들의 결과와 농도분포 측면에서 비교해 보았다. 지하철 7호선, 강남구청역과 논현역, 이수역 구간 등이 인접한 다른 역보다 PM_{2.5}의 농도가 높아 집중 발생구간으로 나타났다. 또한 이수역 구간의 경우 하루 동안 본선터널에 노출된 미세먼지의 총량은 PM_{2.5}의 농도가 $7,017 (\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{시간})$ 이며, 이는 인접 역인 내방역의 $4,661 (\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{시간})$ 과 장승배기역의 $4,655 (\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{시간})$ 에 비해서 1.5배 높게 나타났다 (Park *et al.*, 2010a, b). 또한, 서울의 1, 2, 4, 5선의 PM_{2.5} 농도는 $77.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $158.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준으로 보고되었다 (Park and Ha, 2008). 이는 본 연구 결과와 비교해 볼 때, PM_{2.5}의 직접적인 비교가 어려울 정도로 높은 농도 수준에 해당한다. 이는 왕십리역보다 유동인구가 많고, 2010년 조사 당시 스크린도어가 설치되지 않았기 때문에 미세먼지의 농도가 높게 나온 것으로 볼 수 있다 (참고로 7호선은 2012년에 스크린도어를 설치함).

가장 이용량이 많은 대전시 지하철 역사 내 승강장에서 4차 (약 15일/차, 24시간/일)에 걸쳐 측정을 실시하였다 (Lim *et al.*, 2010). 측정결과 PM_{2.5}의 경우 $36.9 \pm 12.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. PM_{2.5}의 경우 PM₁₀의 농도의 약 62%정도를 구성하는 것으로 나타났다. 이 결과는 이용량이 많은 대전시 지하철과 왕십리역의 유동인구가 비슷하고, 스크린도어가 전면 차단형으로 설치되어 있어, 본 연구와 유사한 값을 보이는 것으로 사료된다. 본 연구의 결과, PM_{2.5}의 평균농도는 2호선 ($22.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 5호선 ($18.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 분당선 ($32.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 중앙선 ($32.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$)의 수준으로 나타났다.

싱가포르 지하철의 PM_{2.5} 농도를 관측한 결과, 평균 $11.43 \sim 13.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 매우 낮게 나타났다 (Jung *et al.*, 2010). 이는 우리나라 본 연구의 PM_{2.5} 오염상태와는 큰 차이를 보인다. 본 연구결과인 왕십리역과 비교해 보아도 50%정도 수준에 불과하다. 이에 반해, 홍콩은 $33 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 중국은 $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 멕시코는 $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도로 본 연구결과에 비해 높게 나타났다 (Park *et al.*, 2008; Chow *et al.*, 2002).

4. 결 론

본 연구에서는 왕십리 역사 내의 PM_{2.5} 오염현황을 연구하기 위해, 왕십리역의 4개 지하철 호선(2호선, 5호선, 중앙선, 분당선)의 플랫폼(3-4번)에서 PM_{2.5}의 농도를 측정하였다. 이들 PM_{2.5} 관측 데이터를 토대로 4개의 비교기준(스크린도어의 개방여부, 유동인구상향, 플랫폼의 깊이, 주중/주말)을 세우고, PM_{2.5} 농도를 이들 조건에 맞추어 통계적 기준으로 비교하였다.

그 결과 PM_{2.5}의 평균농도는 2호선 (22.5 µg/m³), 5호선 (18.3 µg/m³), 중앙선 (31.8 µg/m³), 분당선 (32.2 µg/m³)으로 나타났다. 스크린도어 개방여부에 따른 미세먼지 농도는 차단형인 2호선/5호선의 평균농도 (20.4 ± 9.39 µg/m³)는 개방형인 중앙선/분당선의 농도 (32.0 ± 4.87 µg/m³)로서 양자 간의 차이는 95% 신뢰수준에서 유의한 것으로 나타났다. 2호선에서 유동인구가 많은 시간인 출근시간(오전 8시~9시)과 퇴근시간(오후 7시~8시)에 각각 26.9 ± 5.44 µg/m³와 32.0 ± 5.56 µg/m³이고 유동인구가 적은 이른 오후시간(오후 2시~3시)의 농도는 22.4 ± 5.61 µg/m³로 나타났다. 5호선은 유동인구가 많은 시간대(출근시간(오전 8시~9시)과 퇴근시간(오후 7시~8시))와 유동인구가 적은 이른 오후시간(오후 2시~3시)의 농도는 각각 23.8 ± 2.28, 27.3 ± 2.62, 18.3 ± 2.74 µg/m³로 나타났다. 반면 이와 같은 비교를 적용한 경우, 중앙선이나 분당선의 경우, 오히려 유동인구가 적은 시간대에 더 높은 농도로 나타났다. 지하철 공간의 깊이에 따른 미세먼지 농도 분포를 비교한 결과, 중앙선/분당선에서 지상 1층, 2호선이 지하 1층, 5호선을 지하 5층으로 나누어 각각에 대해 같은 시간대별로 미세먼지 농도를 측정하였다. 지하 5층에서 지하 1층로 이동하면서 미세먼지의 농도가 22.6% 증가하였고 지하 1층에서 지상 1층으로 이동하면서 43.7% 증가하였다. 그리고 주중, 주말에 따른 미세먼지 농도차이는 유동인구가 많은 주중 농도가 주말보다 20.3% 증가하는 것을 알 수 있었다.

이들 자료에 대한 통계적 검정을 실시한 결과, 거의 모든 비교기준에 대해 PM_{2.5}의 농도차이가 유의하다는 결과를 확인하였다. 이를 통해 분당선, 중앙선의 PM_{2.5} 농도는 유동인구와 시간대와 무관하게 외부 미세먼지의 농도가 가장 큰 변수로 작용하였다. 2호선과 5호선

에서는 차단형 스크린도어와 유동인구가 미세먼지 농도에 변수로 작용해서, 이들의 영향이 민감하게 나타나는 것을 유추할 수 있다. 본 연구를 통하여 왕십리 역사 4개 호선의 PM_{2.5} 농도가 각각의 비교 관점에 따라 어떠한 영향을 받는지 분석하였다. 미세먼지의 농도에 영향을 미치는 변수들을 파악하고, 변수들에 따른 미세먼지의 감축방안을 도출하는 데 일조하고자 하였다. 따라서 일반적인 지하철 역사 내의 미세먼지에 대한 문제점의 인식재고와 개선방향에 대한 검토가 체계적으로 이루어지기를 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(과제번호 2009-0093848).

References

- Chow, J.C., J.G. Watson, S.A. Edgerton, and E. Vega (2002) chemical composition of PM_{2.5} and PM₁₀ in Mexico city during winter 1997, *Sci. Total Environ.* 287, 177-201.
- Jeon, B.I. (2010) Characteristics of spacio-temporal variation for PM₁₀ and PM_{2.5} concentration in Busan, *J. Environ. Sci.*, 19(8), 1013-1023.
- Jung, J.H., Y.S. Son, S.Y. Yun, J.H. Kim, P.H. kim, and J.C. Kim (2010) Comparison of PM₁₀ Concentrations with Respect to measurement Sites in Singapore Subways, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.* 2010 autumn conference, 383.
- Jun, J.S., J.C. Yoon, H.C. Lee, S.W. Um, and Y.J. Chae (2012) A noticeable change in indoor radon levels after platform screen doors installation in Seoul subway station, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 28(1), 59-67.
- Kim, S.C., D.S. Kang, and Y.H. Cha (2000) Study on Characteristic by Aerodynamic Diameter of Qirborne Suspended Particulate Matters, *Korean Journal of Environmental Health Society*, 26(2), 108-115.
- Korea Ministry of Environment (2013) Air environmental conservation act.
- Leaderer, B.P., L. Naeher, T. Jankun, K.R. Holford, C. Toth, J.

- Sullivan, J.M. Wolfson, and P. Koutrakis (1999) Indoor, outdoor, and regional summer and winter concentrations of PM₁₀, PM_{2.5}, SO₄²⁻, NH₄⁺, NO₃, NH₃, and nitrous acid in homes with and without kerosene space heaters. *Environ. Health Perspectives*, 107(3), 223-231.
- Lee, T.J., J.S. Jeon, S.D. Kim, D.S. Kim, and J.B. Huh (2010) A Comparative Study on PM₁₀ Source Contributions in a Seoul Metropolitan Subway Station Before/After Installing Platform Screen Doors, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.* 26(5), 543.
- Lim, J.M., J.H. Jung, B.Y. Jung, J.H. Lee, J.H. Mun, and Y.S. Jung (2010) Distribution Characteristics of Cr, Fe, and Mn in PM_{2.5}/PM₁₀ at a Subway Station, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.* 2010 autumn conference, 441-442.
- Park, D.U. and K.C. Ha (2008) Characteristics of PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂ and CO monoter in interiors and platforms of subway train in Seoul, Korea, *Environment International*, 34, 629-634.
- Park, J.H., J.C. Park, and S.J. Eum (2010a) Estimation of Diffusion Direction and Velocity of PM₁₀ in a Subway Station (For Gachwasan Station of Subway Line 5 in Seoul), *Korean Society of Transportation*, 28(5) 55-64.
- Park, J.H., J.C. Park, and S.J. Eum (2010b) Development of the Method Estimating Sections Occurring Intensive PM₁₀ in a Subway Tunnel (For the South Section (Cheongdam ~ Jangseungbaegi) of Subway Line 7 in Seoul), *Korean Society of Transportation*, 28(6), 121-131.
- Roh, Y.M., W.M. Park, C.M. Lee, Y.S. Kim, D.S. Park, and S.W. Kim (2007) A Study of PM Levels in Subway Passenger Cabins in Seoul Metropolitan area, *The Korean Industrial Hygiene Association*, 17(1), 13-20.
- Seo, J.H., E.H. Hae, B.E. Lee, H.S. Park, H. Kim, Y.C. Hong, and O.H. Yi (2006) The effect of PM₁₀ on Respiratory-related admission in Seoul, *Journal of Korea Society for Atmospheric Environment*, 22(5), 564-573.
- Yang, S.S., D.S. Bak, Y.M. Joe, and S.B. Kwon (2010) The Study on PM₁₀ and Chemical Composition in Seoul Subway Cabin, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.* 2010 autumn conference, 636-637.