

서울시 지하철 2호선 본선구간의 입자상물질 농도 특성 및 미세분진의 오염지도 개발

Characterizing Particle Matter on the Main Section of the Seoul Subway Line-2 and Developing Fine Particle Pollution Map

이은선 · 박민빈 · 이태정 · 김신도¹⁾ · 박덕신²⁾ · 김동술*

경희대학교 환경응용과학과, ¹⁾서울시립대학교 환경공학과,

²⁾한국철도기술연구원 교통환경연구팀

(2016년 3월 14일 접수, 2016년 4월 5일 수정, 2016년 4월 22일 채택)

Eun-Sun Lee, Min-Bin Park, Tae-Jung Lee, Shin-Do Kim¹⁾,
Duck-Shin Park²⁾ and Dong-Sool Kim*

Department of Applied Environmental Science, Kyung Hee University

¹⁾*Department of Environmental Engineering, University of Seoul*

²⁾*Transport Environment Research Team, Korea Railroad Research Institute*

(Received 14 March 2016, revised 5 April 2016, accepted 22 April 2016)

Abstract

In present, the Seoul City is undergoing traffic congestion problems caused by rapid urbanization and population growth. Thus the City government has reorganized the mass transportation system since 2004 and the subway has become a very important means for public transit. Since the subway system is typically a closed environment, the indoor air quality issues have often raised by the public. Especially since a huge amount of PM (particulate matter) is emitted from ground tunnels passing through the subway train, it is now necessary to assess the characteristics and behaviors of fine PM inside the tunnel.

In this study, the concentration patterns of PM₁, PM_{2.5}, and PM₁₀ in the Seoul subway line-2 were analyzed by real-time measurement during winter (Jan 13, 2015) and summer (Aug 7, 2015). The line-2 consisting of 51 stations is the most busy circular line in Seoul having the railway of 60.2 km length. The the one-day average PM₁₀ concentrations were 148 µg/m³ in winter and 66.3 µg/m³ in summer and PM_{2.5} concentrations were 118 µg/m³ and 58.5 µg/m³, respectively. The PM_{2.5}/PM₁₀ ratio in the underground tunnel was lower than the outdoor ratio and also the ratio in summer is higher than in winter. Further the study examined structural types of underground subsections to explain the patterns of elevated PM concentrations in the line-2. The subsections showing high PM concentration have longer track, shorter curvature radius, and farther from the outdoor stations. We also estimated the outdoor

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)31-201-2430, E-mail : atmos@khu.ac.kr

PM concentrations near each station by a spatial statistical analysis using the PM_{10} data obtained from the 40 Seoul Monitoring Sites, and further we calculated $PM_{2.5}/PM_{10}$ and PM_1/PM_{10} mass ratios near the outdoor subway stations by using our observed outdoor PM_1 , $PM_{2.5}$, and PM_{10} data. Finally, we could develop pollution maps for outdoor PM_1 and $PM_{2.5}$ near the line-2 by using the kriging method in spatial analysis. This methodology may help to utilize existing PM_{10} database when managing and control fine particle problems in Korea.

Key words : PM, Subway, Tunnel, Pollution map, $PM_{2.5}/PM_{10}$ · PM_1/PM_{10} · $PM_1/PM_{2.5}$ ratio

1. 서 론

오늘날 서울시는 급격한 인구증가와 도시화로 인해 극심한 교통문제를 겪고 있다. 서울시의 교통혼잡은 승용차의 증가로 더욱 악화되었으며, 이를 해소하고자 서울시는 2004년 대중교통체계 개편을 시행하였다. 2015년 서울시 대중교통 이용객 수는 총 40억 명, 하루 평균 약 1,114만 명으로 전년 대비 1.3% (14만 4,000명) 증가했으며, 대중교통체계 개편 이듬해인 2005년과 비교하면 11.3% 증가하였다(Seoul Metropolitan Government, 2015a). 이와 같이 대중교통의 이용이 증가함에 따라 시민들의 지하철 이용도 증가하였으며 많은 유동 인구가 지하역사 및 지하철을 이용하고 있다. 현재 서울시 지하철·철도의 교통수단 분담률은 서울시 전체 교통수단의 약 39%로 가장 높다(Seoul Metropolitan Government, 2015b). 이에 따라 대합실 및 승강장 등 역사 내 공기질뿐만 아니라 열차 내부의 공기질 관리도 중요하게 간주되고 있다. 지하철 시스템의 입자상물질(PM; particulate matters)의 오염도는 전 세계적으로 외기의 농도보다 높은 것으로 보고되고 있다(Kim *et al.*, 2008; Park and Ha, 2008; Li *et al.*, 2007; Aarnio *et al.*, 2005; Awad, 2002; Adams *et al.*, 2001). 또한, 승강장 스크린도어(PSDs; platform screen doors) 설치 이후 승강장의 공기질은 개선되었으나(Kim *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2010), PSDs에 의한 터널 내 입자상물질(PM; particulate matters)의 확산차단으로 터널의 공기질은 악화되고 있는 실정이다(Lee *et al.*, 2015; Son *et al.*, 2013).

본 연구의 목적은 열차 내부 농도에 영향을 미치는 지하철 터널 내 PM의 오염도 및 특성을 평가하기 위하여 서울시 지하철 2호선 본선 터널의 PM 농도를 겨울철과 여름철 각각 1회씩 측정하여 농도를 비교·분석하였으며, 구간별·시간별 농도의 변화를 분석하였

다. 또한, 지하철 터널 내 PM 농도에 대한 외기 농도의 영향을 파악하기 위하여 지하철역 주변의 외기의 농도를 평가하였다. 외기 농도는 서울시 대기오염측정망 40개소(도시대기 25개소, 도로변대기 15개소)의 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 자료를 이용하여 공간분석(spatial analysis)을 실시한 후 각 역사 주변의 외기 농도 값을 추출하였다. 마지막으로, 과거 대기오염 측정자료가 부족한 지역의 $PM_{2.5}$ 및 PM_1 의 농도를 예측하기 위하여 2호선의 지하터널 구간(underground section)과 지상구간(ground section)의 입경비($PM_{2.5}/PM_{10}$, PM_1/PM_{10}) 분석을 통하여 확보한 시간별, 계절별 비율을 이용하여 2호선 주변 외기의 $PM_{2.5}$ 와 PM_1 의 농도를 공간분석을 통하여 추출하였다. 이러한 방법론은 서울시의 누적된 PM_{10} 자료를 이용하여 과거 자료가 부족한 $PM_{2.5}$ 및 PM_1 의 농도를 예측하는 데 활용할 수 있다.

2. 연구 방법

2.1 서울시 지하철 2호선 본선구간의 공기질 조사

서울시 지하철 2호선은 시청역을 기점으로 하는 본선(순환선) 및 성수역과 신설동 사이를 잇는 성수지선, 신도림역과 까치산역을 잇는 신정지선으로 구성된다. 2호선 전 구간(section)의 길이는 본선의 경우 48.8km, 성수지선 5.4km, 신정지선 6.0km로 총 60.2km이며, 본선구간은 43개의 역과 성수·신정지선 구간은 8개의 역으로 총 51개의 역으로 이루어져 있다. 본선구간은 순환선으로 지하터널 구간(underground section)과 지상구간(ground section)을 운행하며, 지하터널 구간은 32개 소구간(subsection)으로, 지상구간(당산, 한양대·잠실나루, 신대방·대림)은 11개 소구간으로 구성되어 있다. 소구간은 전 역의 승강장에서 다음 역 승강장

Table 1. Specifications of the Dust monitor.

Dust monitor 1.108	
Measurement mode	Continuous
Size range (μm)	0.3~20
Display resolution	15 channels (0.3/0.4/0.5/0.65/0.8/1.0/1.6/2.5/3.0/4.0/5.0/7.5/10/15/20 μm)
Concentration range (p/L)	1 to 2,000,000
Measurement intervals	6 sec, 1 min, 5 min
Sampling flow rate (L/min)	1.2
Reproducibility (%)	±2
Sensitivity (particle/liter)	1

References: Grimm Technologies, Inc. <http://www.dustmonitor.com/>

도착 전의 터널까지를 의미하며, 서울시 지하철 2호선의 전 역사 내 승강장에는 스크린도어가 설치되어 있어 승강장을 터널의 연장선으로 보았다. 본 연구에서는 본선구간 터널의 공기질을 측정하였다.

서울시 지하철 2호선 본선구간 터널의 공기질 측정에 사용한 장비는 더스트 모니터(Dust monitor; Grimm Tech. 1.108, Germany)로, 본 기기는 광산란 측정법을 이용하여 실내 또는 외기에서 공기 중의 분진을 측정하는 장비이다. 더스트 모니터는 약 1.2 L/min의 대기 시료를 유입하여 레이저 광원에서 발생하는 빛이 각 입자에 의해 산란되는 신호를 이용하여 입자의 크기를 15개 구간으로 구분하여 측정한 후, 각 구간별 입자의 수를 질량분포로 전환하여 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁과 같은 입경별 질량농도를 측정한다. 이후 측정된 모든 입자는 장치 후단의 47 mm PTEE 여지에 여과되며 중량측정을 통해 장치의 보정이 이루어진다. 더스트 모니터는 휴대가 용이하고 실시간으로 입경별 농도 측정이 가능하다는 장점을 가지고 있다(Lim *et al.*, 2009; Oh, 2007; Kim and Jo, 2004; Viana *et al.*, 2003; Colls and Micallef, 1999). 일반적인 더스트 모니터의 자세한 사양은 표 1에 제시하였다.

PM 측정을 위한 실험방법은 다음과 같다. 운행하는 전동차의 첫 번째 칸의 제일 앞쪽에 더스트 모니터를 설치한 후 노약자석에 설치된 창문을 통하여 채취관(probe)과 도관을 빼서 전동차 외부 측면에 고정하였으며, 창문은 테이프를 이용하여 밀폐시켰다. 더스트 모니터의 측정 간격은 6초이며, 열차 운행 동안 각 역의 도착과 출발시간을 기록하여 측정역과 터널과 승강장 구간을 구분하였다. 실험은 겨울철과 여름철 각각 1회에 걸쳐 실시하였으며, 겨울철 측정일시는 2015년 1월 13일 5시 30분부터 24시 50분까지, 여름철은 2015년 8

월 7일 5시 30분부터 23시 10분까지이다.

2.2 서울시 외기의 오염도 조사

서울시 대기오염측정망은 행정구역인 구를 중심으로 도시의 평균대기질을 측정하는 도시대기측정소(urban sites)와 도로변의 자동차오염물질의 기여도를 고려한 도로변측정소(road sites)로 나누어 관리하고 있다. 서울시에서 운영한 측정소는 2008년까지 총 36개소(도시대기 27개소, 도로변 9개소)가 운영되었으나, 이전 및 측정 중단과 신설 등을 거쳐 2015년 기준 총 40개소(도시대기 25개소, 도로변 15개소)가 운영되고 있다(그림 1). 서울시 측정망에서는 아황산가스(SO₂), 이산화질소(NO₂), 일산화탄소(CO), 오존(O₃), 미세먼지(PM₁₀), 납(Pb), 벤젠 등 총 7개 물질의 농도를 5분 간격으로 자동 측정하여 통계처리 후 1시간 자료로 활용하고 있으며, PM₁₀의 경우 베타선흡수법(β-ray absorption method)을 이용하여 측정하고 있다. 본 연구에서는 터널의 공기측정과 동일한 2015년 1월 13일 5~24시까지 PM₁₀ 농도의 1시간 자료와 2015년 8월 7일 5~24시까지의 자료를 이용하였으며, 총 40개 측정소의 농도자료를 공간분석의 입력자료로 활용하였다.

2.3 공간분포분석

공간분석법(spatial analysis)은 각 측정소를 중심으로 동일 시간에 측정된 자료를 평면상에 시각화할 수 있는 방법으로, 대상지역의 대기질 대표성을 분석하기 위하여 활용되고 있다(Yoon and Kim, 1997). 공간분석이란 공간자료로부터 추가적인 의미를 추출하기 위하여 원자료를 다른 형태의 자료로 조작하는 분석기법이다(Fortheringham *et al.*, 2000). 공간분석법에는 연구목적과 대상에 따라 다양한 기법과 모델이 이용되는데, 0

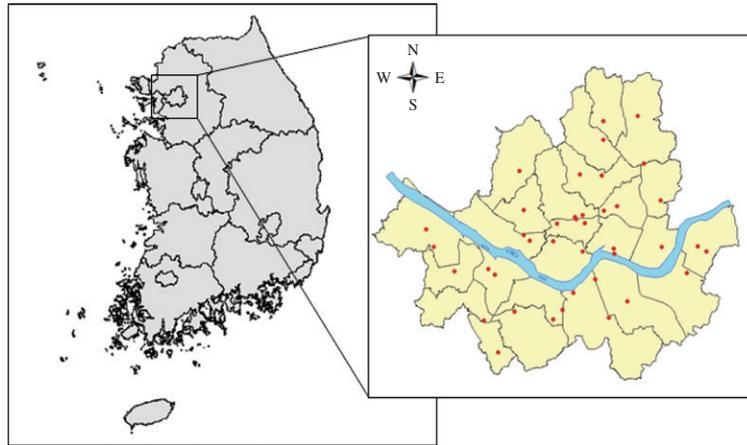


Fig. 1. The ambient air monitoring sites located in Seoul.

차원인 점 분포를 대상으로 할 때, 점과 점 사이의 거리를 이용한 거리반비례평균법(IDW: Inverse distance weighted averaging)과 kriging법이 대기환경에서 주로 이용되고 있다(Yoon and Kim, 1997). 일반적으로 측정점 개수에 따라 각기 다른 불확도를 보이는데, 측정지점 수가 100개 이상으로 충분히 확보된 조건에서는 IDW법이, 측정지점의 개수가 100개 미만에서는 kriging법의 불확도가 낮아 우수한 추정능을 보인다(Baek et al., 2008; Yoon and Kim, 1997). 따라서 본 연구에서는 측정 지점수라 할 수 있는 대기오염측정소 수가 40개소인 것을 감안하여 kriging법을 이용하여 분석을 수행하였다. Kriging 분석법은 추정하고자 하는 지점에서 주변지점의 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 각각의 상호관계에 따른 가중치를 이용하는데, 이들에 대한 선형조합으로 미측정 지점에서 새로운 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도를 추정하였다. Kriging법에 의한 미측정 지점에서의 농도는 식 (1)을 이용하여 추정할 수 있다. 가중치 λ_i는 주변의 측정된 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도 값들에 의해 가우시안(Gaussian) 분포, 대수(logarithmic) 분포, 지수(exponential) 분포 등의 분포특성을 갖는데, 이러한 분포특성은 평균, 거리, 분산 같은 매개변수로 결정된다.

$$Z' = \sum_{i=1}^n \lambda_i(Z_i) \tag{1}$$

여기서,

Z' = 미측정 지점에서 추정된 PM₁₀ 또는 PM_{2.5}의 농도

λ_i = kriging 가중치

Z_i = 측정망 지점에서 측정된 PM₁₀ 또는 PM_{2.5}의 농도

Kriging 분석법에서는 연속되는 공간에서 일어나는 현상에 대해 규칙성을 갖도록 매개변수를 결정하는 것이 중요하다. 매개변수 Z(X_i)는 확률변수(random variable)의 하나로 다음과 같이 표현된다.

$$Z(X_i) = X_i \tag{2}$$

$$X_i = (X_i, Y_i) \text{ (2차원일 경우)} \tag{3}$$

본 연구에서는 서울시의 도시대기오염측정망에서 측정된 PM₁₀ 농도자료를 이용하여, 실제 지하철 2호선 각 역사 주변에서의 PM₁₀ 및 PM_{2.5}에 대한 외기 농도의 추정 값을 얻고자 하였다. 이와 같이 임의 지점에 대한 농도함수가 거리 h에 의해 일정한 규칙을 가질 때 지역 변수는 다음과 같이 표현된다. 즉,

$$f[Z(X_i), \dots, Z(X_k)] = f[Z(X_i + h), \dots, Z(X_k + h)] + E[Z(X_i), \dots, Z(X_k)] \tag{4}$$

여기서, 변이도(variogram) E[Z(X)]는 지역변수에 영향을 주는 매개변수이다. 만약 X₁ 지점과 X₂ 지점 간의 거리를 h라 한다면, 변이도는 Z(X₁)과 Z(X₂)의 공분산(covariance)으로 표현된다. 또한, 변이도의 함수로 표현되는 준변이도(semi-variogram) r(h)는 다음 식 (5)와 같다.

Table 2. Numbers of passengers using the subway line-2 during each PM sampling period.

Time zone	Sampling period	Daily activity	Subway line-2 services frequency	Passengers through the subway line-2	
				Winter (Jan 13, 2015)	Summer (Aug 7, 2015)
I	06:00~09:00	Morning rush-hour	116	685,529	612,346
II	09:00~12:00	Morning activity	99	520,419	461,633
III	12:00~15:00	Lunch time	81	453,636	403,291
IV	15:00~18:00	Afternoon activity	95	553,291	507,877
V	18:00~21:00	Evening rush-hour	113	807,974	810,630
VI	21:00~24:00	Night activity	79	446,019	453,723

References: Seoul Metro (2015)

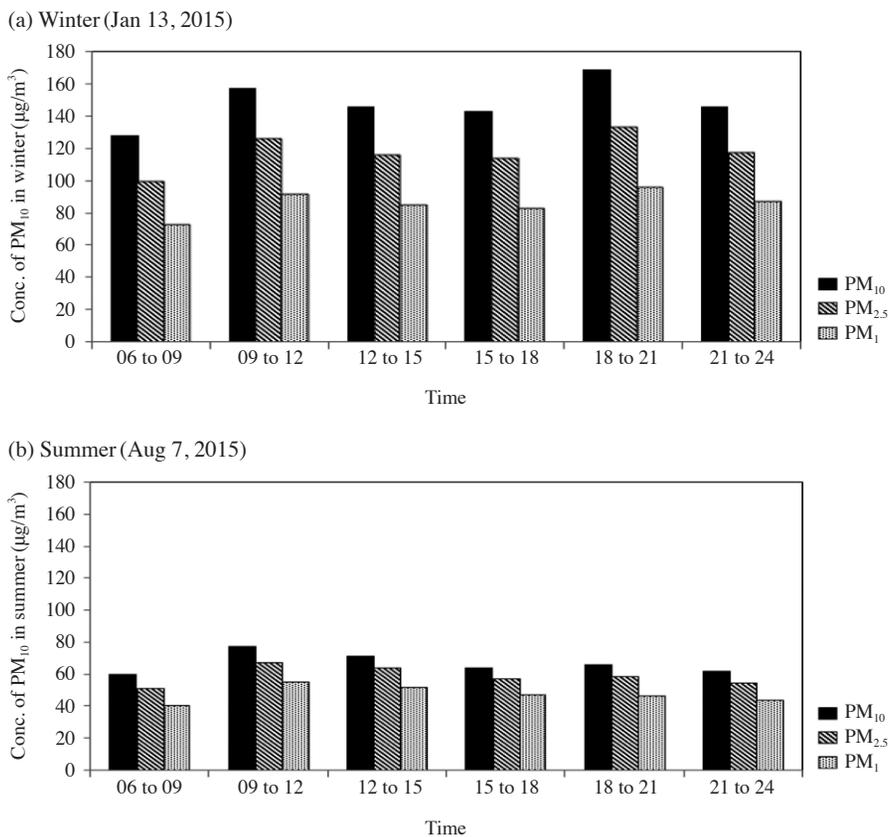


Fig. 2. Average PM concentrations during (a) Winter (Jan 13, 2015) and (b) Summer (Aug 7, 2015) for each time-zone on the Seoul subway line-2.

$$r(h) = r(X_1 : X_2) = \frac{1}{2} E[(Z(X_1) - Z(X_2))^2] \quad (5)$$

준변이도는 가중치의 편중성을 완화시키기 위한 방법

으로, 주어진 조건에 따라 여러 가지 모델로 설명할 수 있다(Yoon and Kim, 1997). 본 연구에서는 kriging 분석을 위해 보편적으로 사용되고 있는 spherical model을 사용하였다. 미측정 지점에서의 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 추

Table 3. The number of subsections by PM concentration for each time-zone in the line-2.

Time zone		Subsection No. within concentration range						
		I	II	III	IV	V	VI	
Total No. of underground subsections		32	32	32	32	32	32	
PM ₁₀	Winter (Jan 13, 2015)	0~100 µg/m ³	3	0	0	1	0	0
		100~150 µg/m ³	15	6	11	8	1	7
		150~200 µg/m ³	12	18	15	19	17	23
		over 200 µg/m ³	2	8	6	4	14	2
	Summer (Aug 7, 2015)	0~100 µg/m ³	5	1	1	5	0	1
		100~150 µg/m ³	24	18	22	22	12	24
		150~200 µg/m ³	3	11	9	5	20	7
		over 200 µg/m ³	0	2	0	0	0	0
PM _{2.5}	Winter (Jan 13, 2015)	0~50 µg/m ³	0	0	0	0	0	0
		50~100 µg/m ³	5	1	1	5	0	1
		100~150 µg/m ³	24	18	22	22	12	24
		150~200 µg/m ³	3	11	9	5	20	7
	Summer (Aug 7, 2015)	over 200 µg/m ³	0	2	0	0	0	0
		0~50 µg/m ³	10	1	0	6	4	6
		50~100 µg/m ³	22	31	32	26	28	26
		over 100 µg/m ³	0	0	0	0	0	0
PM ₁	Winter (Jan 13, 2015)	0~25 µg/m ³	0	0	0	0	0	0
		25~50 µg/m ³	1	0	0	1	0	0
		50~75 µg/m ³	8	1	1	3	0	1
		over 75 µg/m ³	23	31	31	28	32	31
	Summer (Aug 7, 2015)	0~25 µg/m ³	2	0	0	0	0	0
		25~50 µg/m ³	25	7	6	14	13	21
		50~75 µg/m ³	5	23	24	18	19	11
		over 75 µg/m ³	0	2	2	0	0	0

정농도는 측정지점의 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도에 대한 각각의 가중평균에 의하여 계산된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 서울시 지하철 2호선 PM 농도 특성

도시지역에서 PM₁₀ 농도의 일변화는 교통량의 영향을 가장 크게 받는다(Laakso *et al.*, 2003). 지하철역 또한 운행횟수에 따라 PM 농도에 영향을 받으므로(Son *et al.*, 2013; Park *et al.*, 2010), 본 연구에서는 열차의 운행빈도를 기준으로 I~VI까지 6개의 시간대별로 영역(time zone)을 나누고 농도경향을 분석하였다. 표 2는 PM 측정이 수행된 시간영역별 지하철 2호선을 이용한 승객수와 열차 운행빈도를 정리한 것이다.

서울시 지하철 2호선을 통과하는 전체 터널구간

에서 공기질을 측정된 결과, 지하터널 구간의 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁의 평균농도는 겨울(2015년 1월 13일)의 경우 각각 169.4, 135.4, 97.1 µg/m³로 지상구간의 81.6, 64.8, 53.1 µg/m³보다 약 2배 정도 높은 농도를 보였다. 또한 여름(2015년 8월 7일)의 경우에는 터널구간의 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁의 평균 농도는 각각 72.9, 64.3, 51.3 µg/m³로 지상구간의 46.4, 40.8, 35.6 µg/m³보다 약 1.5배의 높은 농도를 보였다. 한편 지상과 지하구간을 포함한 전체 구간에 대한 겨울철 평균농도는 각각 148, 118, 86.4 µg/m³이었으며, 여름철 평균농도는 각각 66.3, 58.5, 47.4 µg/m³로 겨울철이 여름철에 비해 약 2배 정도 높았다.

현재 우리나라 지하철의 경우, 출입통로, 대합실, 승강장 및 환승통로로 포함한 전체 지하철역사의 PM₁₀ 농도 관리기준은 150 µg/m³ 이하이며, 터널에 대한 기준은 없는 실정이다(Ministry of Environment, 2014). 한

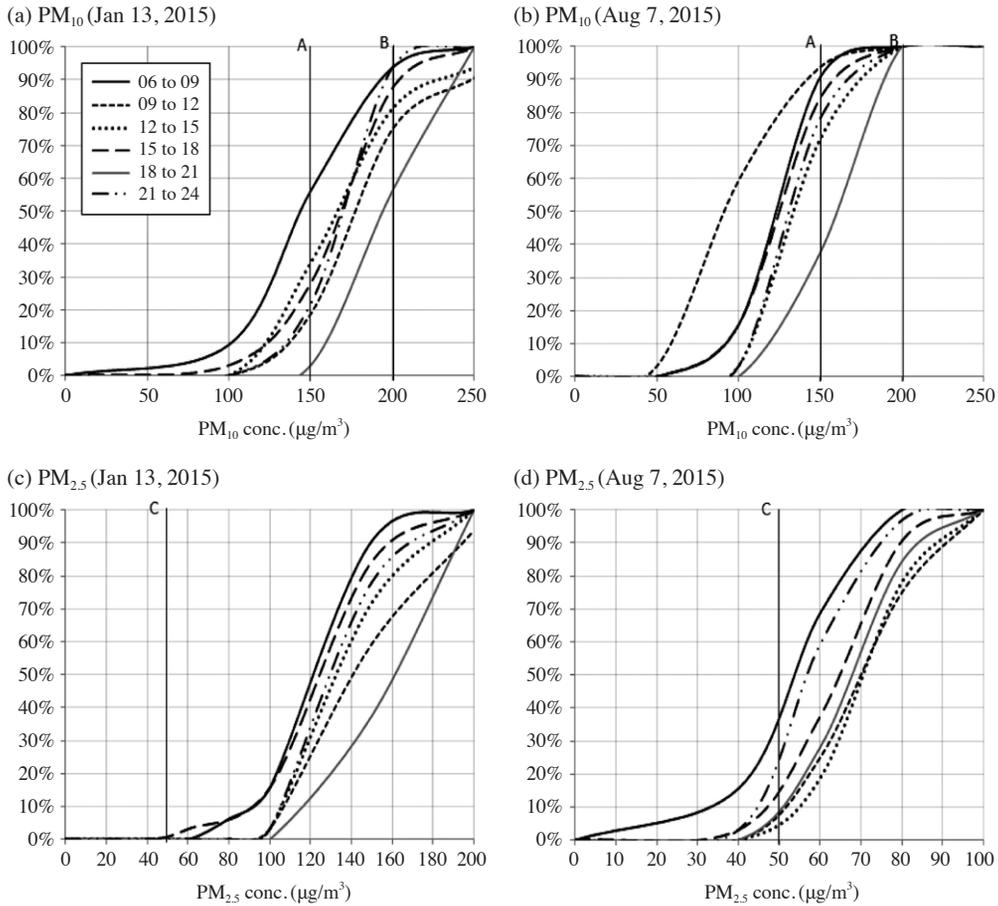


Fig. 3. Seasonal cumulative distributions of $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations monitored for each time zone in the line-2, where the solid line A in each box indicates the indoor air quality standard (PM_{10} : $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$) in Korea, the solid line B indicates the indoor air quality guideline (PM_{10} : $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$) set by the MOE mass transit, and the solid line C indicates the ambient air quality standard ($PM_{2.5}$, 24-hr basis: $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) in Korea.

편, 대중교통차량의 관리지침에 의하면, 운행 중인 도시철도차량에서 미세먼지에 대한 실내공기질 권고기준은 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 설정되어 있다. 또한 대기환경기준은 24시간을 기준으로 각각 PM_{10} $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $PM_{2.5}$ $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다.

표 3은 지하철 2호선 본선 터널 지하구간의 각 시간대별 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도범위에 해당하는 소구간의 개수를 나타낸 것이며, 그림 3은 32개 지하터널 소구간의 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도별 빈도 퍼센트를 나타낸 것이다. PM_{10} 의 경우, 겨울철에는 전체 소구간 중 약 90% 이상이 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하였으며, 대부분의 시간대에

서 약 60% 이상의 소구간들이 PM_{10} 실내환경기준인 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 기준을 초과하였다. 또한 전 시간대영역의 소구간에서 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하였다. 반면 여름철의 경우에는 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상을 초과하는 소구간은 거의 0%로 겨울에 비해 현저히 낮은 농도 값을 보였다. PM_{10} 빈도 퍼센트를 시간영역별로 비교한 결과 퇴근시간대에 많은 소구간이 높은 농도를 보였으며, 출근시간대에는 상대적으로 낮은 농도 값을 보였다. $PM_{2.5}$ 의 경우에도 겨울에 비해 여름이 현저히 낮은 농도 값을 보였다.

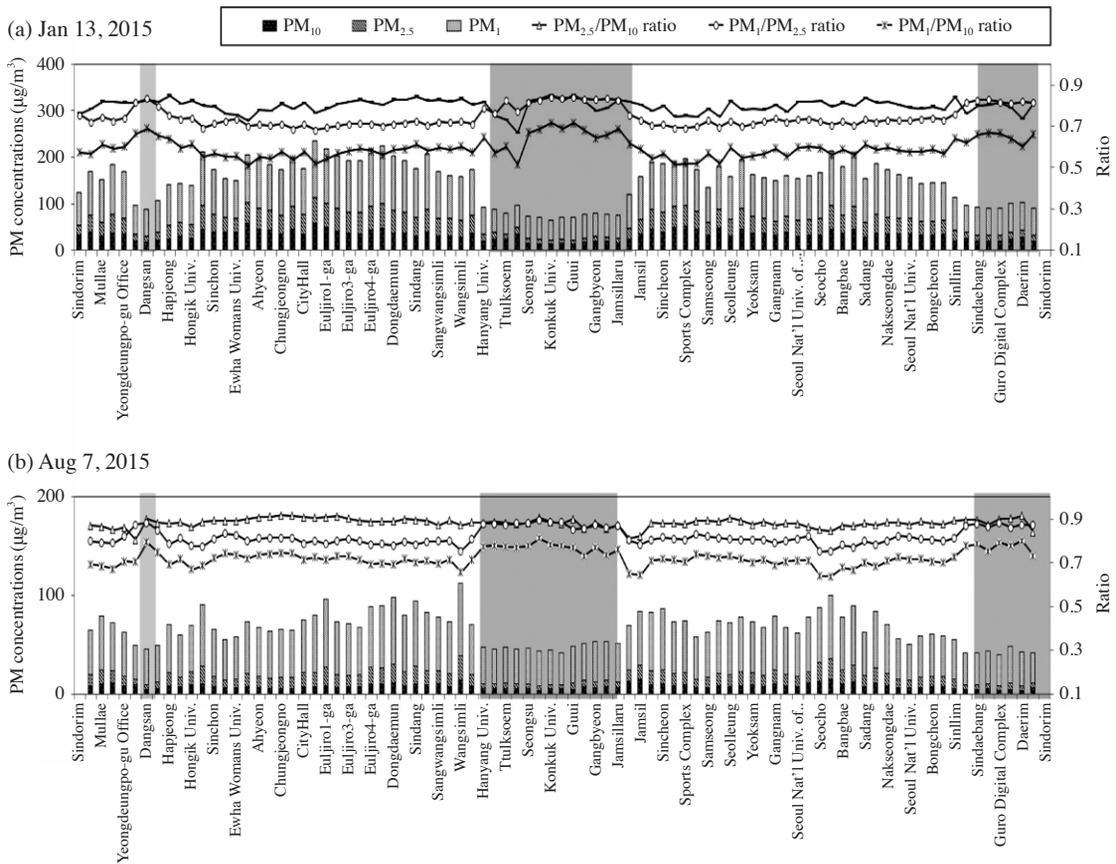


Fig. 4. Variations of PM_1 , $PM_{2.5}$, and PM_{10} mass concentrations and their corresponding mass ratios monitored on each subsection of the Seoul subway line-2. Shaded parts in the graph are ground section.

Table 4. A statistics of PM mass ratios measured on the Seoul subway line-2.

Section	Winter (Jan 13, 2015)			Summer (Aug 7, 2015)		
	$PM_{2.5}/PM_{10}$	$PM_1/PM_{2.5}$	PM_1/PM_{10}	$PM_{2.5}/PM_{10}$	$PM_1/PM_{2.5}$	PM_1/PM_{10}
Ground	0.80	0.82	0.65	0.88	0.87	0.77
Underground	0.80	0.72	0.58	0.88	0.80	0.71
Min	0.67	0.68	0.51	0.81	0.75	0.64
Max	0.85	0.84	0.72	0.92	0.90	0.81

3.2 분진의 입경에 따른 질량농도비 비교

대기환경에서 입자상물질(분진)의 물리적 특성 중 입자의 크기(입경)는 가장 중요한 인자 중 하나이다. 이는 입경에 따라 분진의 생성원, 생성 및 소멸과정, 구성 성분, 체류시간, 이동거리 등의 물리적 특성이 현저하게 차이가 있기 때문이다(EPA, 1999). 본 연구에서는

분진의 입경에 따른 질량농도의 비율을 계산하여 분진의 물리적 특성을 정성적으로 분석하고자 하였다.

그림 4는 여름철과 겨울철의 특정일 하루 중 측정된 분진에 대하여, $PM_{2.5}/PM_{10}$, $PM_1/PM_{2.5}$, PM_1/PM_{10} 비율을 도식한 것이며, 표 4는 이들 비율을 지상과 지하터널 구간으로 나누고 계절별로 평균한 값을 보여주고

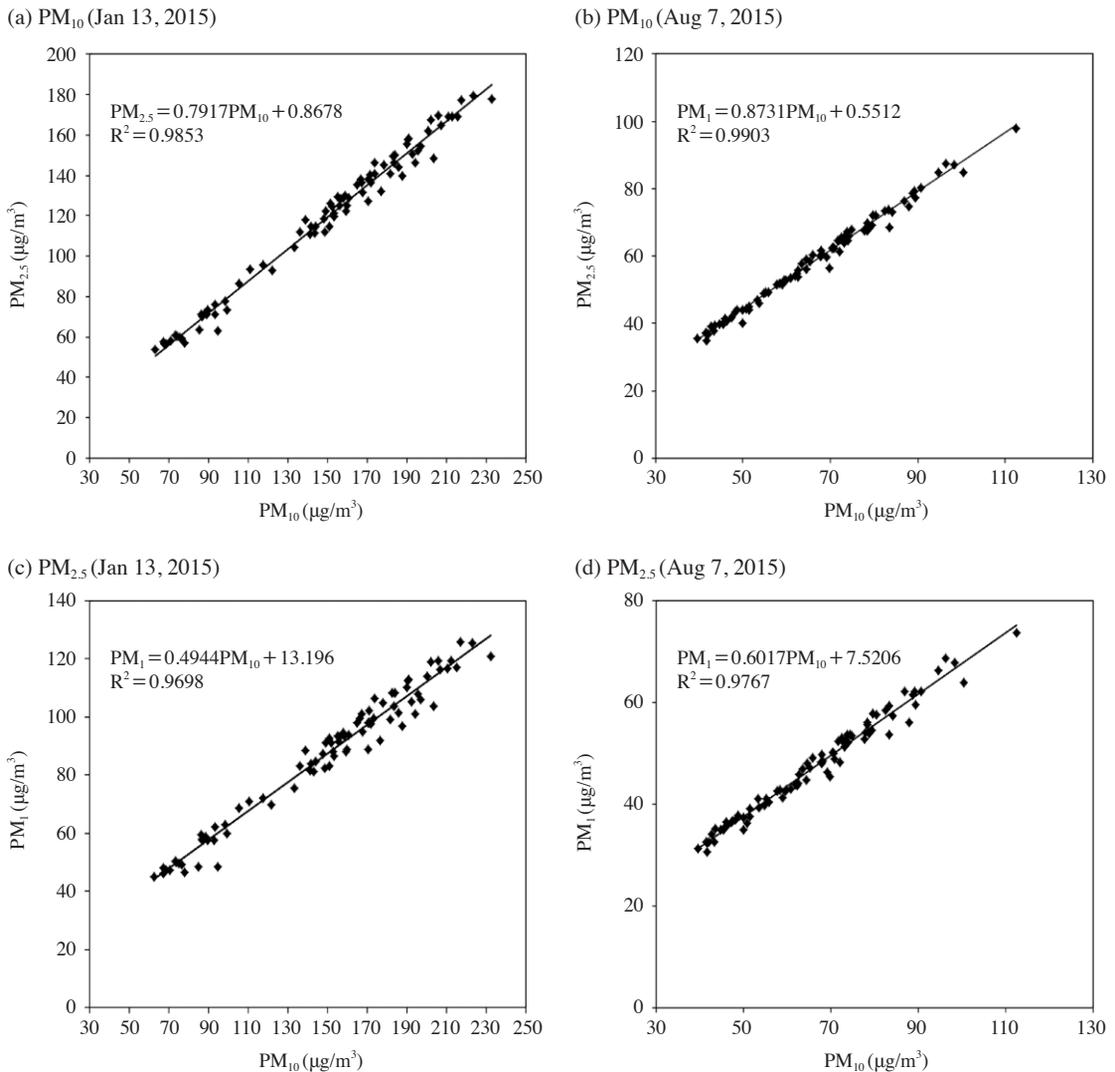


Fig. 5. Results of linear regressions among PM_{10} , $PM_{2.5}$, and PM_1 mass concentrations which measured on the Seoul subway line-2.

있다. 그림 4 그래프의 음영부분은 지상구간을 나타낸 것이다. 우선 지상구간과 지하터널 구간을 비교한 결과, $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비율은 겨울 0.80로 지상구간과 지하구간이 같았으며, 여름 0.88로 지상구간과 지하구간이 같았다. 즉, $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비율에 입각한 분진의 지하 및 지상구간의 특성비교는 의미가 없었으며 계절적 차이를 관측할 수 있었다.

하지만 $PM_1/PM_{2.5}$ 와 PM_1/PM_{10} 의 경우 지상구간이 지하구간에 비해 여름과 겨울 모두 높은 비율을 보였

다. 즉 지상 외기에서, 겨울에는 PM_{10} 질량농도의 65%가 PM_1 이었으며 여름철에는 77%가 PM_1 이었고, 또한 지하터널에서, 겨울에는 PM_{10} 질량농도의 58%가 PM_1 이었으며 여름철에는 71%가 PM_1 이었다. 이를 통해 몇 가지 사항을 추론할 수 있었다. 첫째, 지상구간 외기에서 자동차 등의 이동오염원 및 각종 인위적 연소과정에서 직접 배출된 초미세입자의 영향, 둘째, 이들 오염원에서 배출된 가스상물질의 2차분진(secondary aerosol)으로의 변환(gas-to-particle), 셋째, 여름철 높은 태

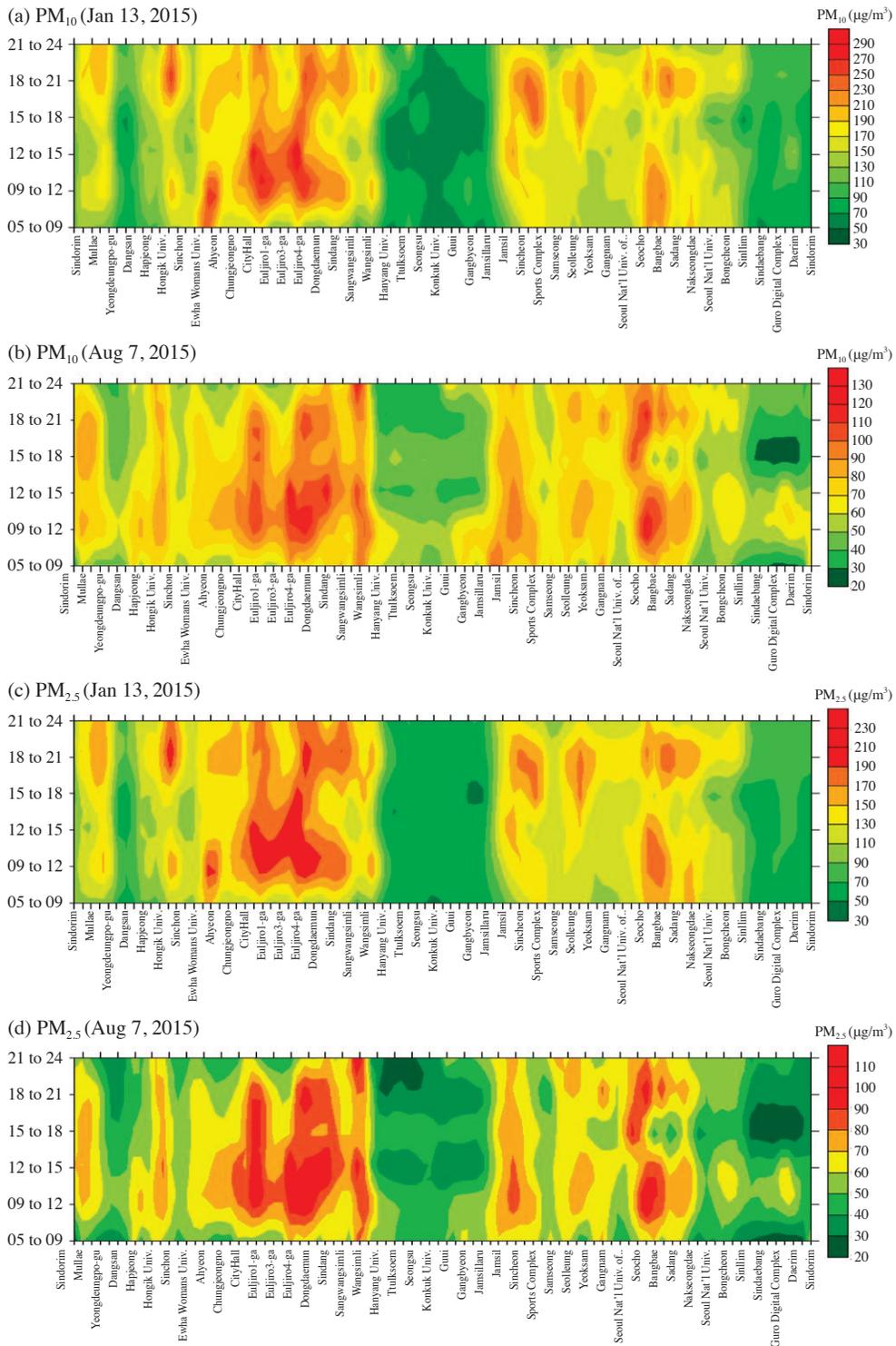


Fig. 6. 2-D contours for PM_{10} and $PM_{2.5}$ mass concentrations on the basis of each time-zone and subsections on the Seoul subway line-2.

Table 5. Structural characteristics of underground subsections in the Seoul subway line-2.

Station	Tunnel subsection length (m)	Under ground depth (m)	Curvature radius (m)	Transfer line
Sindorim	981	11.9	Straight	
Mullae	660	13.0	Straight	
Yeongdeungpo-gu Office	626	14.1	Straight	National Railroad Line
Hapjeong	870	14.2	Straight	
Hongik Univ.	1,110	13.3	900	Line-5
Sinchon	625	15.1	400	Line-6
Ewha Womans Univ.	713	28.4	Straight	Airport Railroad Line
Ahyeon	593	14.9	1,000	
Chungjeongno	858	16.4	1,200	
CityHall	477	21.0	400	
Euljiro1-ga	555	14.6	Straight	Line-5
Euljiro3-ga	435	12.7	Straight	Line-1
Euljiro4-ga	810	15.3	3,000	
Dongdaemun History & Culture Park	735	15.1	900	Line-3
Sindang	673	13.4	450	Line-5
Sangwangsimli	643	15.2	600	Line-4, Line-5
Wangsimli	790	13.6	900	Line-6
Jamsil	1,010	11.1	1,200	
Sincheon	950	10.8	1,200	Line-5, Gyengui-jungang Line
Sports Complex	770	12.3	1,200	Line-8
Samseong	1,112	13.4	900	
Seolleung	998	13.1	Straight	
Yeoksam	570	17.7	Straight	
Gangnam	1,040	13.1	2,000	Bundang Line
Seoul Nat'l Univ. of Education	490	13.1	Straight	
Secho	1,450	15.4	Straight	
Bangbae	1,355	12.8	500	Line-3
Sadang	1,455	13.8	Straight	
Nakseongdae	842	13.4	Straight	
Seoul Nat'l Univ.	776	13.4	400	Line-4
Bongcheon	942	13.1	400	
Sinllim	572	12.9	1,200	

References: Seoul Metro (2015)

양강도 및 기온으로 인한 2차분진화의 가속화 등으로 1.0 μm 이하인 분진(submicron particle)의 질량농도가 높아졌을 것으로 판단된다. 이 결과를 통해 지상 및 지하 환경에서 차지하는 분진 중 미세분진의 기여율은 매우 높음을 알 수 있었고, 미세분진 중 PM_1 의 기여율은 더욱 높음을 알 수 있었다. 특히 지하철 환경에서는 PM_1 의 특정 발생원이 존재하지 않는다고 판단되기 때문에, 이들 PM_1 의 대부분은 역사 주변의 외기에서 지하환경으로 유입되었다고 사료된다.

서울 지하철 2호선에서 지상을 포함한 전체 구간의 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 의 계절별 비율은 겨울철에는 0.80, 여름철에는 0.88 값을 보였다. 여름과 겨울의 비율을 비교하면, 겨울보다는 여름이 더 높음을 확인할 수 있었다. 참

고로 지하철역에서 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 의 비율을 살펴보면, 타이베이(Taipei) 0.67~0.78 (Cheng *et al.*, 2008), 광저우(Guangzhou)에서는 0.79 (Chan *et al.*, 2002a), 홍콩(Hongkong)은 0.72~0.78 (Chan *et al.*, 2002b) 값을 보였다. 로스앤젤레스(LA) 지하철의 경우 지상구간에서는 0.76, 지하구간에서는 0.73 값을 보였으며 (Kam *et al.*, 2011) 지상구간이 지하구간에 비해 높은 결과를 보였다. 중국 상하이 지하철의 경우에서도 열차 운행이 시작되었을 때 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 뿐만 아니라 $\text{PM}_1/\text{PM}_{10}$, $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 비율이 최솟값으로 떨어짐을 확인할 수 있었는데 이는 열차 운행으로 많은 거대입자가 생성되었기 때문이다(Qiao *et al.*, 2015). 한편, 지상 외기의 경우에는 역사 주변의 이동오염원과 각종 인위적 오염원으

Table 6. The underground subsections in the Seoul subway line-2 showing elevated PM concentration and their corresponding structural characteristics.

Stations	Structural characteristic
Hongik Univ., Jamsil, Sincheon, Samseong, Seolleung, Gangnam, Seocho, Bangbae, Sadang	Long tunnel length
CityHall, Sindang, Sangwangsimli, Bangbae, Seoul Nat'l Univ, Bongcheon	Short curvature radius
Euljiro1-ga, Euljiro3-ga, Euljiro4-ga, Dongdaemun History & Culture Park	Transfer station

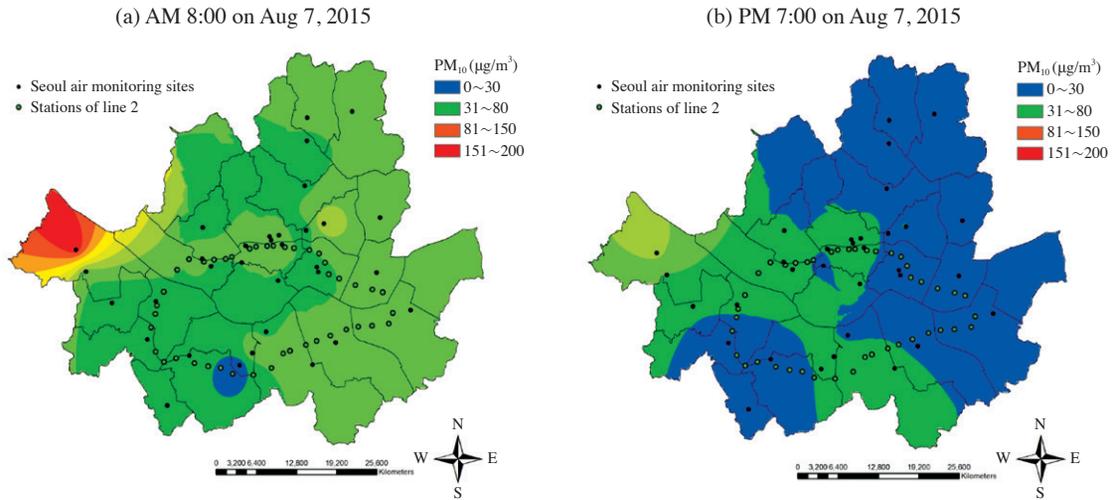


Fig. 7. Outdoor PM₁₀ concentrations estimated a spatial analysis near subway stations on the line-2.

로 인해 미세입자의 비율이 증가했다고 판단된다. 참고로 이동오염원의 경우, 도로상 차량의 PM_{2.5}/PM₁₀ 비율은 1, 비도로상 차량은 0.95를 보였다(Jin *et al.*, 2012).

PM_{2.5}/PM₁₀의 계절별 비율에 대해 회귀분석(linear regression)을 수행한 결과, PM₁/PM₁₀ 및 PM_{2.5}/PM₁₀의 기울기도 겨울보다 여름이 더 높음을 알 수 있다(그림 5 참조). 이는 중유 또는 LNG 연소시설 등 각종 연료 연소시설에서 고온연소 시 각 금속의 증기압에 따라 형성된 금속 증기의 핵형성·응축·응집을 거쳐 주로 유해 중금속을 포함한 미세입자가 생성되는데(Linak and Wendt, 1993), 겨울보다는 여름에, 터널보다는 외기에서 미세입자가 응축되어 생성되었다고 판단된다.

한편, 지하철 터널 내에서의 PM_{2.5}/PM₁₀과 PM₁/PM₁₀ 비율은 동력장치(power systems), 제동장치(braking systems), 환기시설 그리고 지하철 내 미소환경에서의 작업환경에 영향을 받는다(Qiao *et al.*, 2015). 지하철 내 분진오염원은 크게 외부 및 내부 발생원으로 나눌 수 있는데, 외부 오염원의 원인으로는 지하철 주변의

교통으로 인한 배출이 커다란 기여를 하며(Kim *et al.*, 2008), 내부에서의 발생은 열차의 운행 또는 제동 시 발생하는 기계적인 마모와 터널 내에서 환풍 및 보수 작업을 수행할 때 등이다(Qiao *et al.*, 2015). 향후 수용 모델 연구를 통한 심층적 원인 파악이 필요하다.

3.3 서울시 지하철 2호선 지하터널 구간의 유형조사

그림 6은 서울시 지하철 2호선 본선구간의 소구간별, 시간영역별 PM₁₀과 PM_{2.5}의 질량농도 경향을 2-D로 시각화한 것이며, 표 5는 높은 농도를 보이는 역사간 소구간에 대한 지하구조의 특성을 요약한 것이다. 또한 표 6은 상대적으로 높은 농도를 보이는 터널의 유형을 분석한 결과인데, 일반적으로 터널의 길이가 길거나 곡률반경(curvature radius)이 작은 경향을 보였다. 지상을 운행하는 일반철도와 달리 지하철의 곡률반경이 작고 곡선구간이 많은 이유는 지하철의 대부분 노선이 도시가 형성된 이후 인구와 건축물이 과밀한 상

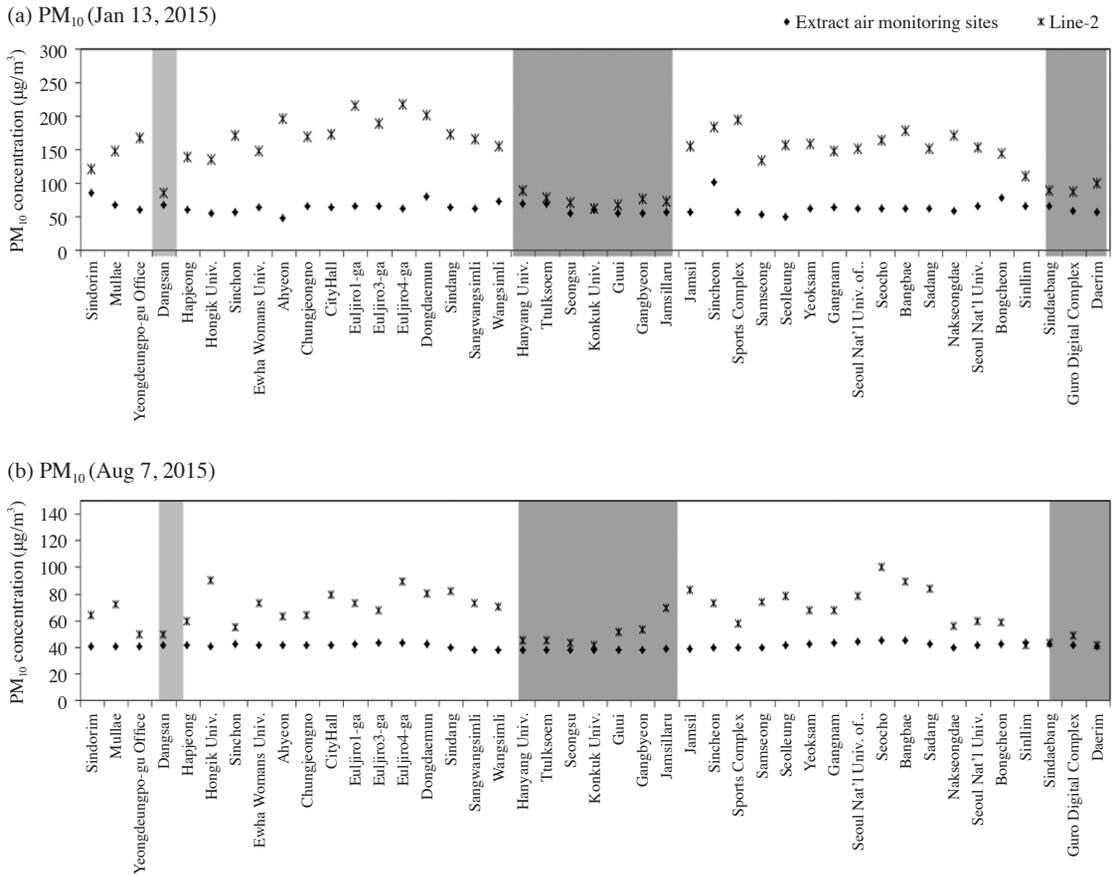


Fig. 8. Extracted outdoor PM₁₀ concentrations by a spatial analysis using air pollution monitoring DB and observed PM₁₀ concentrations thru the line-2. Shaded parts in the graph are ground section.

태에서 도시계획에 따라 건설되었기 때문이다. 이에 따라 많고 짧은 곡선구간으로 인해 열차 운행 중 레일과 철재차륜 사이의 강한 마찰로 철성분의 분진이 다량 발생되고 (Park *et al.*, 2010), 또한 전력공급선 (catenary)과 집전장치 (pentagraph)의 마찰로 구리 및 탄소성분의 분진이 다량 발생된다고 판단된다. 따라서 환기조건에 따른 오염된 외부공기의 유입현상과 함께, 지하철 지하구간의 건축구조 특성이 지하구간 분진오염에 커다란 영향을 준다고 판단된다.

3.4 공간분포분석에 의한 외기 농도와와의 관계

지하철 지하터널 구간의 분진오염도에 미치는 외기의 영향을 평가하기 위하여 서울시 대기오염측정망(도시대기측정소 25개, 도로측정소 15개)의 총 40개 지점

에 대한 PM₁₀ 농도자료를 입수하고 kriging법을 이용하여 지하철 2호선 역사 주변의 시간대별 외기 농도를 산출하였다. 그림 7은 2015년 8월 7일 오전 8시 및 오후 7시의 자료를 공간분석법으로 도식한 농도분포도로서 서울시 측정망과 2호선 역사의 위치를 함께 표시한 것이다.

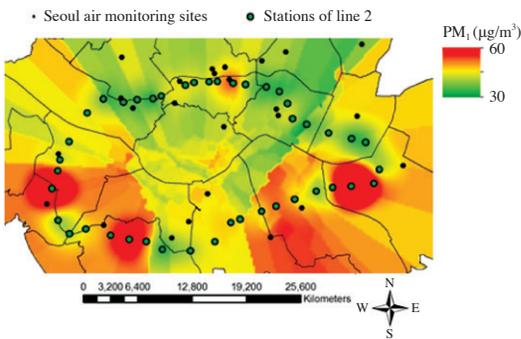
그림 8은 그림 7의 공간농도지도로부터 지하철 역사 위치에 해당하는 외기 농도를 추출하여 도식한 것으로 지하철에서 직접 측정된 지상구간과 지하구간의 농도를 함께 보여주고 있다. 그림 8에 의하면, 지상구간의 PM₁₀ 농도가 외기와 매우 비슷한 농도를 보이며, 지상구간에서 지하구간으로 떨어질수록 PM₁₀ 농도가 크게 증가함을 확인할 수 있다. 지하철 2호선 내 지하구간에서의 PM₁₀ 농도는 역사 주변의 외기 농도와 비교하여,

겨울철은 122.1% (터널 142.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 외기 64.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 높았으며, 여름철에는 59% (터널 65.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 외기 41.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 높은 값을 보였다. 이는 동절기에 실내온도를 유지할 목적으로 하절기에 비해 환기시설의 가동시간이 매우 짧아, 지하철 터널 내부에서 발생한 PM_{10} 의 영향을 더 크게 받기 때문이다. 따라서 지하터널 구간에서의 농도가 지상구간보다 현저히 높기 때문에 지하구간에 대한 관리의 필요성이 요구된다. 특히 근래에 본격적으로 설치된 스크린도어의 설치로 시민이 이용하는 승강장에서의 공기질은 일부 개선되었다고 하지만 (Lee *et al.*, 2010), 스크린도어의 개폐 시 오염된 터널 내 공기의 역사 내로의 유입 가능성도 꾸준히 존재한다. 또한, 공간이 한정된 도심지역에서 많은 지하철 노선이 연결되면서 지하역사의 심도도 점차 깊어지기 때문에 자연환기 방식의 관리로는 한계가 있으며, 지하역사 공기를 외부공기와 강제적으로 순환시키는 환기 방식도 비용과 효율 측면에서 한계가 있다 (Park *et al.*,

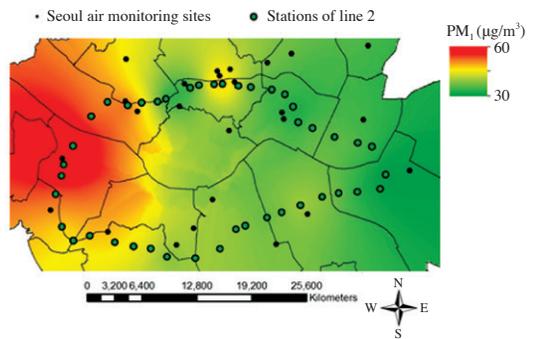
2010). 따라서 지하터널 내 PM_{10} 농도 저감을 위한 다양한 연구가 모색되어야 한다.

앞서 기술한 것처럼, 지하철 역사 내 PM_{10} 농도는 외기와 상관성이 높다고 보고되고 있는데 (Mugica-Alvarez *et al.*, 2012; Kam *et al.*, 2011; Cheng and Lin, 2010; Cheng *et al.*, 2008), 이는 외기에서 발생된 분진이 환기시설, 에스컬레이터, 지하통로 등을 통해 내부 공기질에 영향을 주기 때문이다. 하지만 본 연구 결과에 따르면, 지하역사와는 달리 지하터널의 경우에는 지하터널 내기와 역사 주변 외기 사이의 PM_{10} 농도 상관성은 0.15로 매우 낮게 조사되었다. 특히 지상구간에서 지하구간으로 멀어질수록 또한 기온이 낮을수록 지하구간의 PM_{10} 농도는 높았으며 상관성은 낮게 조사되었다. 지상구간에서 가까울수록 농도가 낮고 상관성이 높은 이유는 열차 운행 자체로 일어나는 피스톤-방식 환기 (piston-type ventilation)의 영향 때문이며, 지상구간에서 멀수록 오염도가 증가하는 이유는 강제환기의 부족

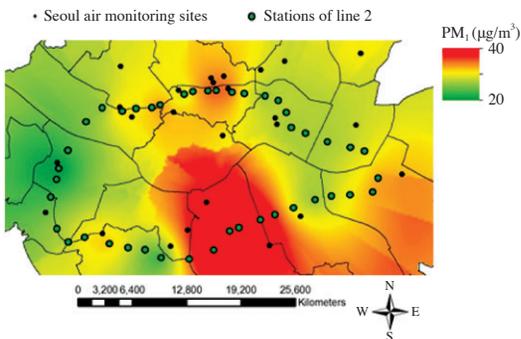
(a) PM_{10} (09:00~12:00 on Jan 13, 2015)



(b) PM_{10} (18:00~21:00 on Jan 13, 2015)



(c) PM_{10} (09:00~12:00 on Aug 7, 2015)



(d) PM_{10} (18:00~21:00 on Aug 7, 2015)

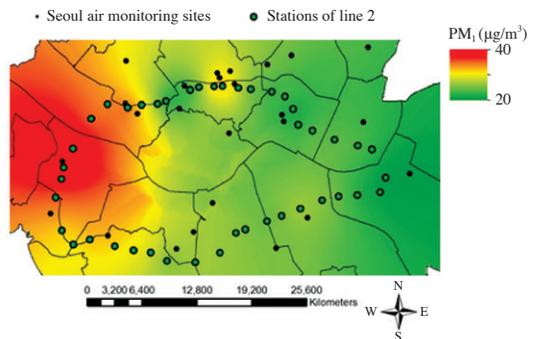


Fig. 9. PM_{10} pollution maps developed by using monitored PM_{10} DB and calculated $\text{PM}_1/\text{PM}_{10}$ mass ratios near the area of the Seoul subway line-2.

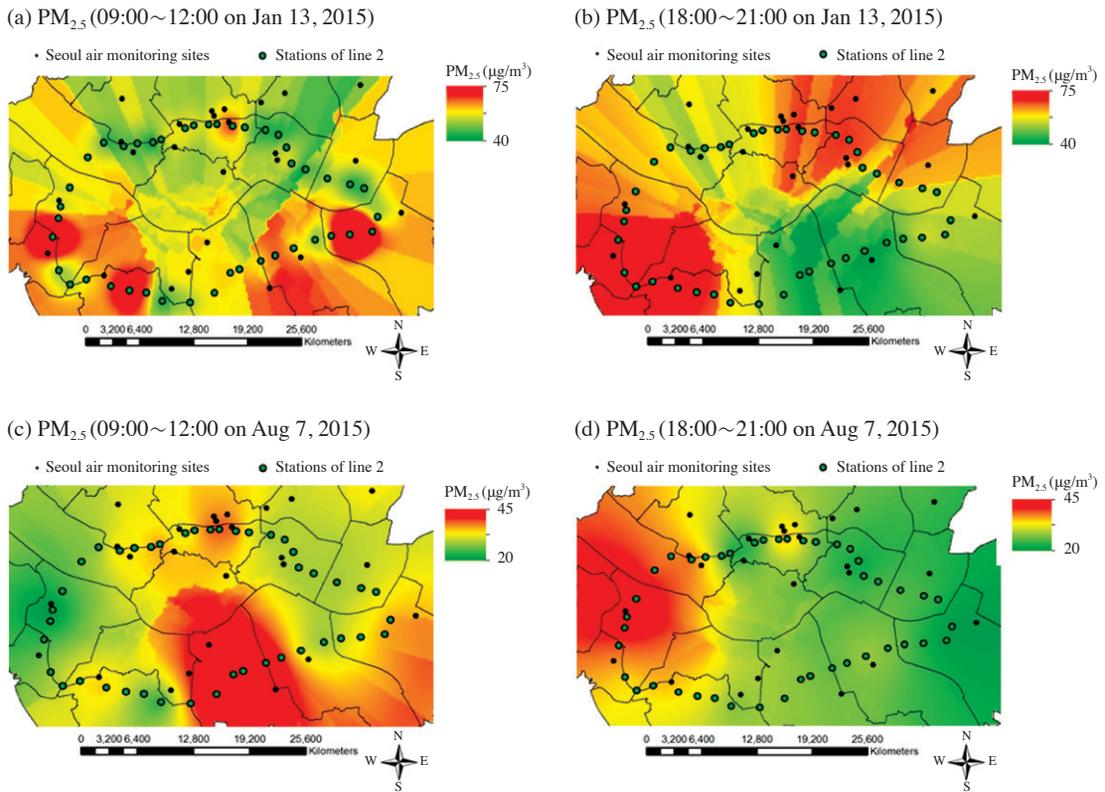


Fig. 10. $PM_{2.5}$ pollution maps developed by using monitored PM_{10} DB and calculated $PM_{2.5}/PM_{10}$ mass ratios near the area of the Seoul subway line-2.

또는 적절한 처리설비의 부재로 PM_{10} 의 체류시간(residence time)이 증가하기 때문으로 사료된다.

한편 지상구간에서 확보한 $PM_{2.5}/PM_{10}$, $PM_1/PM_{2.5}$, PM_1/PM_{10} 비율을 이용한다면, 현재 서울지역 40개 측정소에서 측정된 PM_{10} 외기 농도를 바탕으로 PM_1 또는 $PM_{2.5}$ 의 농도를 추정할 수 있다. 그림 9와 10은 그림 7의 공간지도에서 추출한 지하철 2호선 역사별 PM_{10} 외기 농도와 본 연구에서 산출한 지상구간에서의 $PM_{2.5}/PM_{10}$, $PM_1/PM_{2.5}$, PM_1/PM_{10} 비율을 각각 이용하여 PM_1 과 $PM_{2.5}$ 의 외기 농도를 계산한 후, 이를 다시 공간분석의 kriging법을 이용하여 도식한 PM_1 과 $PM_{2.5}$ 의 외기 농도 지도이다. 앞에 서술한 것처럼, 분진은 크기별로 발생원과 소멸원이 현저히 다르고 각 크기별 농도도 지역에 따라 또한 시간에 따라 차이가 크다. 따라서 PM_1 , $PM_{2.5}$, PM_{10} 각각의 농도 거동도 각기 차이가 있으며 크기별 질량농도의 비율도 지역별 및 시간별로

당연히 차이가 있다. 이에 따라 본 연구에서는 2호선 주변의 한정된 지상구역에서의 농도자료를 활용하였기 때문에 그림 9와 10은 단지 이들 지역 주변의 추정농도만을 보여주고 있다. 이러한 연구과정이 지하철 2호선뿐만 아니라 전 호선으로 확장된다면, 서울시 전역에서의 시간에 따른 PM_1 과 $PM_{2.5}$ 의 오염지도가 완성될 수 있다.

4. 결 론

서울시 지하철 2호선 터널 내 공기질을 겨울철(2015년 1월 13일)과 여름철(2015년 8월 7일) 두 차례에 걸쳐 PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1 을 측정하였다. 측정은 지하터널 구간과 지상구간으로 크게 나누고 각 구간을 다시 역과 역 사이의 소구간으로 나누어 진행하였으며, 또한 하루

를 6개 시간영역별로 나누고 영역별 그 농도경향을 분석하였다. 겨울철의 평균농도는 여름철에 비해 약 2배 가량 높았으며, 지하터널 구간의 평균농도는 지상구간보다 약 65% 정도 높은 경향을 보였다. 시간영역별로는 겨울철 PM₁₀의 경우 퇴근시간대(18~21시)에 가장 높은 농도를 보였으며, PM_{2.5}의 경우에는 시간대별로 다양한 양상을 보였다. 특히 여름철에는 PM₁₀, PM_{2.5} 모두 오전시간대에 가장 높은 농도를 보였다.

여름과 겨울의 특정한 날에 대해 시간영역별로 채취한 분진에 대해 PM_{2.5}/PM₁₀, PM₁/PM_{2.5}, PM₁/PM₁₀의 질량농도 비율을 산출하였다. 크기별 농도비율은 겨울보다는 여름이 높아 미세분진의 질량기여가 높았다. 특히 지하터널 구간과 지상구간에서의 PM_{2.5}/PM₁₀의 비율은 같았지만, PM₁/PM_{2.5} 및 PM₁/PM₁₀의 비율은 지상구간에서 뚜렷하게 높았다.

또한 본 연구에서는 지하터널의 구조특성을 통해 역별·시간별 농도추이를 파악하고자 하였다. 연구결과 지하터널의 길이가 길거나 터널의 곡률반경이 짧을 때 높은 농도경향을 보였다. 한편, 본 연구에서는 서울시 대기오염측정망 자료를 공간분석의 입력자료로 활용하여 서울시 지하철 2호선을 통과하는 각 역사 주변에서의 PM₁₀ 외기 농도를 추정하였으며, 이 추정농도와 본 연구에서 직접 측정된 농도를 비교하였다. 또한 이 결과를 이용하여 지하터널 구간에서의 오염특성을 분석하였다. 최종적으로 공간분석을 통해 추정된 PM₁₀의 외기 농도 결과와 계절별, 시간별로 계산된 지상구간의 PM_{2.5}/PM₁₀, PM₁/PM_{2.5}, PM₁/PM₁₀의 비율을 이용하여, 비록 한정된 지역이지만, 2호선이 통과하는 서울시 일부 지역에 대한 PM₁ 및 PM_{2.5}의 오염지도를 우리나라에서는 처음 작성하였다. 미세분진은 국민의 건강과 복지에 커다란 영향을 미치는 만큼, 이러한 오염지도의 작성은 우리나라 분진오염 관리에 커다란 도움을 줄 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부의 재원으로 미래철도기술연구사업(14RTRP-B081249-01)의 연구비를 지원받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Aarnio, P., T. Yli-Tuomi, A. Kousa, T. Makela, A. Hirsikko, K. Hammeri, M. Raisanen, R. Hillamo, T. Koskentalo, and M. Jantunen (2005) The concentrations and composition of and exposure to fine particles (PM_{2.5}) in the Helsinki subway system, *Atmos. Environ.*, 39(28), 5059-5066.
- Adams, H.S., M.J. Nieuwenhuijsen, R.N. Colvile, M.A.S. McMullen, and P. Khandelwal (2001) Fine particle (PM_{2.5}) personal exposure levels in transport micro-environments, London, UK. *Sci. Total Environ.*, 279, 29-44.
- Awad, A.H.A. (2002) Environmental study in subway metro stations in Cairo, Egypt. *J. of Occup. Health*, 44(2), 112-118.
- Baek, S.A., T.J. Lee, S.D. Kim, and D.S. Kim (2008) Studies on the spatial analysis for distribution estimation of radon concentration at the Seoul area, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 24(5), 538-550.
- Chan, L.Y., W.L. Lau, S.C. Zou, Z.X. Cao, and S.C. Lai (2002a) Exposure level of carbon monoxide and respirable suspended particulate in public transportation modes while commuting in urban area of Guangzhou, China, *Atmos. Environ.*, 36(38), 5831-5840.
- Chan, C.Y., L.Y. Chan, W.L. Lau, and S.C. Lee (2002b) Commuter exposure to particulate matter in public transportation modes in Hong Kong, *Atmos. Environ.*, 36(21), 3363-3373.
- Cheng, Y.H. and Y.L. Lin (2010) Measurement of particle mass concentrations and size distributions in an underground station, *Aerosol Air Qual. Res.*, 10, 22-29.
- Cheng, Y.H., Y.L. Lin, and C.C. Liu (2008) Levels of PM₁₀ and PM_{2.5} in Taipei rapid transit system, *Atmos. Environ.*, 42(31), 7242-7249.
- Colls, J.J. and A. Micallef (1999) Measured and modelled concentrations and vertical profiles of airborne particulate matter within the boundary layer of a street canyon, *Sci. Total Environ.*, 235, 221-233.
- EPA (1999) Air Quality Criteria for Particulate Matter, Vol. 1, EPA600/P-99/002a.
- Fotheringham, A.S., C. Brunson, and M. Charlton (2000) *Quantitative Geography: Perspectives on Spatial Data Analysis*, London: Sage Publications.
- Jin, H.A., J.H. Lee, K.M. Lee, H.K. Lee, B.E. Kim, D.W. Lee, and Y.D. Hong (2012) The estimation of PM_{2.5} emissions and their contribution analysis by source categories in Korea, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*,

- 28(2), 211-221.
- Kam, W., K. Cheung, N. Daher, and C. Sioutas (2011) Particulate matter (PM) concentrations in underground and ground-level rail systems of the Los Angeles Metro, *Atmos. Environ.*, 45(8), 1506-1516.
- Kim, K.H., D.X. HO, J.S. Jeon, and J.C. Kim (2012) A noticeable shift in particulate matter levels after platform screen door installation in a Korean subway station, *Atmos. Environ.*, 49, 219-223.
- Kim, K.Y., Y.S. Kim, Y.M. Roh, C.M. Lee, and C.N. Kim (2008) Spatial distribution of particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) in Seoul metropolitan subway station, *J. Hazard. Materials*, 154(1), 440-443.
- Kim, M.Y. and S.J. Jo (2004) Estimation of practical use for portable aerosol spectrometer, *Korean Soc. Atmos. Environ. Spring Conference*, 93-97.
- Laakso, L., T. Hussein, P. Aarnio, M. Komppula, V. Hiltunen, Y. Viisanen, and M. Kulmala (2003) Diurnal and annual characteristics of particle mass and number in urban, rural and Arctic environment in Finland, *Atmos. Environ.*, 37, 2629-2641.
- Lee, T.J., H. Lim, S.D. Kim, D.S. Park, and D.S. Kim (2015) Concentration and Properties of Particulate Matters (PM₁₀ and PM_{2.5}) in the Seoul Metropolitan, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 31(2), 164-172.
- Lee, T.J., J.S. Jeon, S.D. Kim, and D.S. Kim (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), 543-553.
- Li, T.T., Y.H. Bai, Z.R. Liu, and J.L. Li (2007) In-train air quality assessment of the railway transit system in Beijing: a note, *Transp. Res. Part D*, 12, 64-67.
- Lim, K.S. and H.S. Park (2009) Comparison of particle size distribution and particle number concentration measured by APS 3321 and Dust Monitor 1.108, *Atmos. Environ.*, 5(2), 63-70.
- Linak, W.P. and J.O.L. Wendt (1993) Toxic metal emissions from incineration: mechanisms and control, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 19, 145-185.
- Ministry of Environment (2015) <http://www.me.go.kr>
- Mugica-Álvarez, V., J. Figueroa-Lara, M. Romero-Romo, J. Sepúlveda-Sánchez, and T. López-Moreno (2012) Concentrations and properties of airborne particles in the Mexico City subway system, *Atmos. Environ.*, 49, 284-293.
- Oh, S.W. (2007) Concentrations of atmospheric fine particles measured during 2005 in Chungnam, Korea, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 23(1), 132-140.
- Park, D.U. and K.C. Ha (2008) Characteristics of PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂ and CO monitored in interiors and platforms of subway train in Seoul, Korea, *Environ. Intern.*, 34(5), 629-634.
- Park, J.H., J.C. Park, and S.J. Eum (2010) 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 Soc. Transp.*, 28(6), 121-131.
- Qiao, T., G. Xiu, Y. Zheng, J. Yang, L. Wang, J. Yang, and Z. Huang (2015) Preliminary investigation of PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ and its metal elemental composition in tunnels at a subway station in Shanghai, China, *Transp. Res. Part D*, 41, 136-146.
- Seoul Metro (2015) <http://www.seoulmetro.co.kr/board/bbs/view.action?bbsCd=61&mCode=C080000000&idxId=20173>
- Seoul Metropolitan Government (2015a) Transportation Indicators, <http://traffic.seoul.go.kr/archives/285>
- Seoul Metropolitan Government (2015b) Transportation allotment rate, <http://traffic.seoul.go.kr/archives/289>
- Son, Y.S., A. Salama, H.S. Jeong, S. Kim, J.H. Jeong, J. Lee, Y. Sunwoo, and J.C. Kim (2013) The Effect of Platform Screen Doors on PM₁₀ Levels in a Subway Station and a Trial to Reduce PM₁₀ in Tunnels, *Asian J. Atmos. Environ.*, 7(1), 38-47.
- Viana, M., X. Querol, A. Alastuey, G. Gangoiti, and M. Menendez (2003) PM levels in the Basque Country (Northern Spain): analysis of a 5-year data record and interpretation of seasonal variations, *Atmos. Environ.*, 37, 2879-2891.
- Yoon, H.J. and D.S. Kim (1997) Spatial distribution analysis of metallic elements in dustfall using GIS, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 13(6), 463-474.