

수도권 전동차에서의 공기질 현황 및 다변량 통계분석을 이용한 공기질 영향인자 분석

Air Quality in the Subway Cabins of the Seoul Metropolitan Area and Analysis of Its Influencing Factors Using Multivariate Statistics

박은영^{1),2)} · 박덕신^{2),*} · 조영민²⁾ · 권순박²⁾ · 최경희³⁾ · 권명희³⁾

¹⁾과학기술연합대학원대학교, ²⁾한국철도기술연구원, ³⁾국립환경과학원

(2010년 7월 8일 접수, 2010년 8월 19일 수정, 2011년 1월 12일 채택)

Eun-Young Park^{1),2)}, Duckshin Park^{2),*}, Youngmin Cho²⁾, Soon-Bark Kwon²⁾,
Kyunghee Choi³⁾ and Myunghee Kwon³⁾

¹⁾University of Science and Technology, ²⁾Korea Railroad Research Institute

³⁾Indoor Environmental Research Division, National Institute of Environmental Research

(Received 8 July 2010, revised 19 August 2010, accepted 12 January 2011)

Abstract

In this study, we have observed PM-10 and CO₂ concentration in the subway cabins and analyzed the factors affecting air quality using a multivariate statistical analysis. The measurements have been conducted at Seoul metropolitan subway lines. The results show that the mean concentration of the PM-10 and CO₂ inside subway cabins is in the range of 62.6 to 108.0 μg/m³ and 907 to 2,008 ppm, respectively. CO₂ level in specific sections during the rush hours has exceeded air quality guidelines for public transportation, which requires designated train ventilation controls. Correlation and regression analyses of influencing factors imply that CO₂ level is severely influenced by the number of passengers and PM-10 level is also correlated with the number of passengers. In particular, PM-10 level in the cabins indicates a positive correlation with outdoor PM-10 level. In addition, the PM concentration has been highly affected by the number of passengers and distance between stations.

Key words : Indoor air quality, PM-10, CO₂, Subway, Regression analysis

1. 서 론

2008년 수도권 지하철을 이용한 승객은 하루 평균

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)31-460-5367, E-mail : dspark@krrri.re.kr

약 460만 명 (Korail, 2009)이었으며, 지하철의 확장으로 이용객의 수는 더욱 증가할 전망이다. 통계자료에 따르면 2008년 한 해 동안 전국에서 2,142백만 명이 지하철을 이용하여 2007년에 비해서 약 2.5% 증가하였다. 지하철의 수송분담율은 약 16.5%로서 자동차에 이어 두 번째로 높은 수준이었으며 (MLTMA,

2009), 분담율은 매년 증가하는 추세이다.

대중교통수단의 공기질에 대한 연구는 대중교통수단에서의 오염물질 노출량 파악(Morabia and Amslavlavski, 2009; Tsai *et al.*, 2008; Lau and Chan, 2003; Adams *et al.*, 2001), 역사에서의 오염물질 현황 분석(Cheng *et al.*, 2009; Murruni *et al.*, 2009; Salma *et al.*, 2009; Cheng *et al.*, 2008; Salma *et al.*, 2007; Aarnio *et al.*, 2005), 실시간 측정 장비를 이용한 객실 오염물질 분석(Som *et al.*, 2007; Braniš, 2006; Li *et al.*, 2006) 등 공기질 측정위주의 연구와 실내공기오염에 대한 모델 개발(Shek and Chan, 2008; Wong *et al.*, 2008; Halios and Helmis, 2007; Zhao and Wu, 2007; Zhao *et al.*, 2007; Wong *et al.*, 2006) 등이 주로 진행된 바 있다. 국내에서도 지하철 전동차나 역사에서 오염물질 농도 분포(Kim *et al.*, 2008; Park and Ha, 2008; Cho *et al.*, 2006)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 수도권 전동차 전체 노선에 대한 공기질 현황 분석이나 오염 영향인자를 파악하기 위한 시도는 아직까지 없었다.

본 연구에서는 현재 운행 중인 수도권 전동차 전체 노선에 대한 공기질 현황을 분석하고, 다변량 통계분석을 이용하여 PM-10 및 CO₂ 등의 영향인자를 파악하였다. 이를 위해 수도권 전동차 전체 노선(수도권 1~8호선 및 분당선)에서 침두 시간대와 비침두 시간대에 평상시 운행조건에서 공기질을 측정하였다. 측정데이터 이외에 온도, 습도 및 승객수 등 공기질 영향인자들을 동시에 수집하여 분석하였으며, 환경부 대기측정망(TMS; telemetering system) 자료를 입수하여 외기와의 상관성을 분석하였다. 수집된 자료를 근

거로 PM-10 및 CO₂ 농도의 공기질 영향인자와의 상관관계 및 다변량 통계분석을 수행하여 오염 원인에 대한 보다 심층적인 분석을 시도하였다. 연구결과는 향후 대중교통수단에서의 공기질 제어장치 개발과 공기질 관리의 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구방법

2.1 대상 지역

본 연구에서는 수도권 전동차 노선인 전동차 1~8호선 및 분당선 등 총 9개 노선을 연구대상으로 하였다. 측정 구간 중 1호선의 경우 승객 혼잡도가 가장 높고 급행노선인 동인천역~용산역 구간을 선택하였다. 그 이외 노선은 전 노선을 측정구간으로 하였으며, 표 1에 수도권 전동차 노선도를 나타내었다.

2.2 측정 방법 및 항목

전동차 공기질은 추계(2008년 10월), 동계(2009년 1월) 및 춘계(2009년 4월) 등 총 세 차례 출근시간대와 낮 시간 등으로 구분하여 PM-10과 CO₂ 등 대중교통수단 실내공기질 관리가이드라인의 대상 물질에 대해서 측정하였다. 환경부의 대중교통수단 실내공기질 관리가이드라인은 표 2와 같다. 공기질 영향인자인 외기조건(온도, 습도, 풍속, PM-10 등)과 객실조건(승객수, 온도, 습도, 역간 운행시간, 문열림 시간 등)에 대한 자료도 수집하여 분석 자료로 활용하였다. 또한 역간 거리, 지상·지하구간 구분 및 지하구간에

Table 1. Sampling information.

	Section	Total length (km)	Distance between adjacent stations (km)	# of ground station/# of underground station	Ratio of underground stations to total stations (%)	Depth (m)
Line 1	Dongincheon-Yongsan (express)	33.9	2.6	14/0	0	-
Line 2	Seongsu-Seongsu (outer cycle)	48.8	1.1	10/34	77.3	12.7
Line 3	Daehwa-Suseo	54.1	1.4	3/37	92.5	15.8
Line 4	Dangogae-Oido	70.2	1.5	19/29	60.4	15.8
Line 5	Banghwa-Sangildong	45.2	1.1	0/44	100	23.2
Line 6	Eungam-Bonghwasan	35.1	0.9	0/38	100	24.0
Line 7	Jangam-Onsu	46.9	1.1	3/39	92.9	23.5
Line 8	Moran-Amsa	17.7	1.1	0/17	100	19.6
Bundang line	Bojeong-Seolleung	27.7	1.5	2/18	90	-

Table 2. Guidelines of indoor air quality for public transportations (average for 1 operation of a route) (Minister of Environment, 2006).

Pollutants	Classification	Level 1 ¹⁾	Level 2 ²⁾
CO ₂	Subway	Less than 2,500 ppm	Less than 3,500 ppm
	Train, Bus	Less than 2,000 ppm	Less than 3,000 ppm
PM-10	Subway	Less than 200 µg/m ³	Less than 250 µg/m ³
	Train, Bus	Less than 150 µg/m ³	Less than 200 µg/m ³

¹⁾Non-rush hour, ²⁾Rush hour

대한 심도 등을 조사하여 회귀분석시 영향인자로 이용하였다.

PM-10은 광산란 연속측정법을 사용하는 LD-3B (SIBATA)로 측정하였으며, CO₂는 비분산적외선 연속측정법을 이용한 휴대용 측정장비인 GrayWolf sensor (Wolfsense, Model:IQ-610Xtra)로 측정하였다. 광산란 측정방식은 휴대가 간편하고 별도의 전원공급 없이도 8시간 이상 연속 측정이 가능하므로 대중교통수단에서의 PM-10 측정에 유용하게 이용된다. 그리고 LD-3B에 의한 측정 결과의 신뢰성을 확보하기 위하여 동일 구간에서 소용량 공기 채취기 (mini-volume air sampler)를 이용하여 동시 측정을 수행한 후, 결과에 대한 t-test를 실시하여 99% 신뢰수준에서 차이가 없음을 확인하였으며, LD-3B 3대로 세량의 전동차에서 동시에 측정을 실시한 결과에서도 차이가 발생하지 않음을 확인하였다 ($p < 0.01$).

2.3 결과 분석

본 연구에서는 공기질 측정값인 PM-10과 CO₂의 농도에 영향을 미치는 인자에 대한 분석을 위해 다변량 통계분석기법을 이용하였다. 다변량 통계분석은 관찰되는 변수가 복수인 경우 한 변수와 다른 여러 변수간의 관계를 파악할 때 사용하는 분석 방법이다. 분석법에는 모든 독립변수를 이용한 추정식을 통해 종속변수와의 인과관계를 설명하는 다변량 회귀분석과 변수들 사이의 상관관계를 활용하여 데이터를 축약하는 주성분분석, 요인분석 및 개체간의 유사성을 이용하여 분류하는 군집분석이나 판별분석 등이 있다. 데이터 축약과 개체 분류는 측정된 변수나 개체의 수가 많을 경우 오류의 발생 가능성을 줄이기 위해서 수행 한다 (Donghwa engineering, 2007).

통계분석은 SPSS Ver. 13.0 프로그램으로 수행되었으며, 영향인자들 간의 상관성과 영향인자와 공기질

측정값 간의 상관성은 피어슨 상관분석 (Pearson correlation analysis)을 이용하였고, 영향인자의 공기질 측정값에 대한 다변량 회귀분석은 단계적 선형 회귀분석 (Stepwise linear regression analysis)을 이용하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 노선별 평균값

PM-10 및 CO₂ 측정값을 표 3과 표 4에, 그리고 계절별 농도 분포를 그림 1과 그림 2에 각각 나타내었다. PM-10의 경우 측정을 수행한 모든 계절에서 Park and Ha (2008)가 수도권 전동차 1호선, 2호선, 4호선 그리고 5호선 차량 내에서 비침투 시간대에 측정된 값인 144.0 µg/m³에 비해 낮은 농도인 62.2~83.3 µg/m³를 보이고 있으며, 표 5에 제시된 다른 여러 도시들의 측정 결과와 비교해 볼 때 유사하거나 약간 낮은 수준인 것을 알 수 있었다. 그러나 본 연구와 동일 노선을 측정한 Park and Ha (2008)의 연구는 측정시기가 나타나 있지 않고, 다른 유사 연구의 경우 측정 장비나 방법 등에서 차이가 있어 직접적인 비교에는 다소 무리가 있을 것으로 사료된다.

3.2 영향인자별 상관성 분석

표 6에 외기와 객실에서 공기질 영향인자들 간의 상관성 분석결과를 나타내었다. 분석결과, 외기 습도-외기 온도, 객실 CO₂ 농도-객실 승객수, 객실 PM-10 농도-외기 PM-10 농도-객실 온도-외기 온도, 객실 온도-외기 습도, 객실 습도-외기 온도, 객실 습도-외기 습도, 객실 습도-객실 CO₂ 농도, 객실 습도-객실 온도 사이에서 유의한 상관관계를 보이는 것으로 분석되었다. 이중 객실 CO₂ 농도와 객실 승객수 사이에서 상관계수(r)가 0.88로서 가장 높은 상관성을 보였다.

Table 3. Seasonal variations of mean PM-10 concentration in subway cabin for each route during rush and non-rush hour. (unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	Rush hour			Non-rush hour		
	Autumn	Winter	Spring	Autumn	Winter	Spring
Line 1	59.3 (± 10.0)	36.5 (± 5.8)	50.8 (± 8.8)	46.0 (± 12.3)	31.9 (± 5.3)	77.9 (± 14.9)
Line 2	128.3 (± 36.4)	99.9 (± 16.8)	66.1 (± 14.5)	46.6 (± 12.2)	66.6 (± 20.8)	62.4 (± 11.2)
Line 3	99.0 (± 29.4)	89.7 (± 20.4)	95.7 (± 19.3)	43.7 (± 13.3)	45.7 (± 12.3)	41.3 (± 15.3)
Line 4	99.9 (± 25.0)	78.0 (± 22.6)	62.9 (± 9.2)	119.8 (± 13.0)	97.3 (± 19.1)	36.4 (± 8.4)
Line 5	114.7 (± 12.9)	166.1 (± 19.3)	68.9 (± 9.9)	86.3 (± 7.1)	92.8 (± 16.4)	29.6 (± 6.5)
Line 6	170.4 (± 19.7)	94.6 (± 10.9)	105.5 (± 25.9)	151.1 (± 11.0)	86.3 (± 8.4)	101.9 (± 13.4)
Line 7	150.6 (± 27.2)	110.7 (± 15.2)	87.8 (± 16.0)	139.1 (± 14.8)	86.8 (± 12.1)	86.6 (± 19.3)
Line 8	116.1 (± 10.1)	104.3 (± 12.2)	73.1 (± 6.6)	73.4 (± 6.4)	105.6 (± 11.1)	76.9 (± 13.5)
Bundang line	33.6 (± 7.4)	65.0 (± 12.4)	49.1 (± 11.4)	43.5 (± 6.6)	59.8 (± 11.5)	47.0 (± 5.53)
Average (\pm Standard deviation)	108.0 (± 42.3)	88.3 (± 25.1)	73.3 (± 19.4)	83.3 (± 43.4)	74.8 (± 25.1)	62.2 (± 25.1)

Table 4. Seasonal variations of mean CO₂ concentration in subway cabin for each route during rush and non-rush hour. (unit: ppm)

	Rush hour			Non-rush hour		
	Autumn	Winter	Spring	Autumn	Winter	Spring
Line 1	2478.0 (± 804.9)	1568.5 (± 505.6)	2168.5 (± 1164.5)	714.3 (± 147.2)	841.4 (± 146.9)	883.7 (± 270.3)
Line 2	2285.2 (± 670.8)	2036.0 (± 787.3)	1815.1 (± 595.1)	2002.2 (± 497.2)	1757.2 (± 381.1)	812.2 (± 248.4)
Line 3	1517.4 (± 661.9)	1624.1 (± 518.6)	1325.0 (± 401.0)	713.7 (± 117.4)	965.0 (± 362.6)	996.7 (± 203.2)
Line 4	1852.6 (± 1052.0)	1271.4 (± 543.3)	1306.4 (± 555.2)	1202.1 (± 427.9)	1223.9 (± 294.8)	973.9 (± 253.1)
Line 5	1506.9 (± 631.7)	1424.4 (± 514.5)	1594.4 (± 627.3)	1001.4 (± 194.3)	1002.0 (± 180.3)	753.6 (± 124.9)
Line 6	1524.9 (± 572.4)	1054.8 (± 151.7)	1409.8 (± 471.0)	864.1 (± 168.0)	866.4 (± 204.1)	769.2 (± 126.0)
Line 7	1879.1 (± 724.5)	1397.6 (± 544.9)	1809.8 (± 705.8)	1241.0 (± 342.4)	814.2 (± 215.6)	880.7 (± 182.7)
Line 8	2097.0 (± 625.1)	1531.3 (± 508.7)	1585.0 (± 637.8)	832.3 (± 148.5)	880.2 (± 178.2)	952.7 (± 210.5)
Bundang line	2928.5 (± 831.9)	1411.7 (± 308.1)	1672.4 (± 521.1)	958.0 (± 106.3)	1035.7 (± 146.4)	1139.0 (± 154.4)
Average (\pm Standard deviation)	2007.7 (± 489.8)	1480.0 (± 269.1)	1631.8 (± 275.6)	1058.8 (± 400.7)	1042.9 (± 296.1)	906.9 (± 123.1)

객실 PM-10 농도의 경우 외기 온도, 외기 습도, 외기 풍속, 객실 CO₂ 농도, 객실 온도 및 객실 습도와는 상관관계가 없는 것으로 분석되었다. 다만 객실 PM-10 농도의 경우 외기 PM-10 농도와 r값이 0.499로서 유의한 상관관계가 있는 것으로 나타났다. Cheng *et al.* (2008)과 Braniš (2006)의 연구결과를 보면 외기 PM-10 농도가 객실 PM-10 농도에 영향을 미친다고 보고한 바 있다. 그러나 Murrini *et al.* (2009)은 객실 PM-10의 농도는 외기와의 상관성이 없는 것으로 발표하였다. 여러 연구결과를 종합하면 객실 PM-10 농도는 외기 PM-10 농도뿐만 아니라 보다 복합적인 요인에 의해 결정된다고 사료되어 향후 이에 대한 추가적인 연구와 분석이 필요하다고 판단된다.

3.3 회귀분석

상관성 분석 이외에 PM-10 농도와 CO₂ 농도를 종속변수로 놓고 승객수, 역간 소요시간, 문열림시간, 심도 등을 독립변수로 하여 단계적 선형 회귀분석을 실시하였다.

3.3.1 CO₂ 농도에 영향을 미치는 요인

객실에서 CO₂의 농도변화에 영향을 미치는 요인을 분석하여 표 7에 나타내었다. CO₂ 농도에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 승객수의 변화인 것으로 확인되었다. 전체 노선에서 이용 승객수 자료뿐만 아니라 이용 승객수를 지하 및 지상 구간으로 나눈 자료에서도 모두 유의한 양의 상관계수를 나타내었다. 승객

Table 5. Literature review for indoor particulate matter monitoring in various places.

Location	Sampling period	Sampling site	Particulate measure	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Equipment	References
Beijing, China	December 2004	In-train	PM-10 PM-2.5	108 36.9	Dustmate (Turnkey)	Li <i>et al.</i> (2006)
Seoul, Korea		In-train Platform	PM-10/PM-2.5 PM-10/PM-2.5	144.0/118.4 125.8/111.1	Portable aerosol spectrometer (Grimm)	Park and Ha (2008)
Mexico City, Mexico	May 2002 ~ June 2002	In-train	PM-2.5	61	Vortex Ultraflow (Casella) 16L/min	Gómez-Perales <i>et al.</i> (2004)
Taipei, Taiwan	January 2005 ~ April 2005	In-train Platform	PM-10/PM-2.5/PM-1.0 PM-10/PM-2.5/PM-1.0	46.5/28.9/22.5 75.3/37.5/28.0	Portable dust monitor (Grimm)	Tsai <i>et al.</i> (2008)
Buenos Aires, Argentina	October 2005 ~ October 2006	In-train Platform	TSP TSP	152 ~ 270 55 ~ 137	Portable AirCon-2 pump (Gillilan Corp.)	Murrini <i>et al.</i> (2009)
London, UK	July 1999, February 2000	In-train	PM-2.5	247.2 (summer) 157.3 (winter)	Vortex Ultraflow (Casella) 16L/min	Adams <i>et al.</i> (2001)
Taipei, Taiwan	October 2007 ~ December 2007	In-train Platform	PM-10/PM-2.5 PM-10/PM-2.5	41 (10 ~ 97)/32 (8 ~ 68) 51 (11 ~ 137)/35 (7 ~ 100)	Dustmate (Turnkey)	Cheng <i>et al.</i> (2008)
Seoul, Korea	November 2004 ~ February 2005	In-train Platform Outdoor	PM-10/PM-2.5 PM-10/PM-2.5 PM-10/PM-2.5	311.5/125.5 359.0/129.0 154.5/102.1	DustTrak (TSI)	Kim <i>et al.</i> (2008)
Prague, Czech Republic	March 2003 ~ February 2004	In-train Platform Outdoor	PM-10 PM-10 PM-10	82.3 (summer), 125.5 (winter) 71.1 (summer), 120.2 (winter) 51.4 (summer), 84.9 (winter)	DustTrak (TSI)	Bramiš (2006)
Helsinki, Finland	March 2004	In-train Platform	PM-2.5 PM-2.5	21 (± 4) 47 (± 4)	Cyclone	Aarnio <i>et al.</i> (2005)
Budapest, Hungary	April 2006	Platform	PM-10	130	TEOM with PM-10 inlet	Salma <i>et al.</i> (2007)
Hong Kong, China	October 1999 ~ January 2000	In-train	PM-10/PM-2.5	44 (± 16)/33 (± 10)	DustTrak (TSI)	Chan <i>et al.</i> (2002)

Table 6. Results of correlation analysis of monitored variables.

		Outdoor				Cabin				
		Temp.	Relative humidity	Wind speed	PM-10	# of passenger	CO ₂	PM-10	Temp.	Relative humidity
Outdoor	Temp.	1								
	Relative humidity	0.465**	1							
	Wind speed	-0.269	0.131	1						
	PM-10	-0.106	-0.236	-0.192	1					
Cabin	# of passenger	-0.242	0.046	0.260	-0.168	1				
	CO ₂	-0.093	-0.006	0.059	-0.173	0.88**	1			
	PM-10	0.048	0.151	-0.262	0.499**	-0.086	-0.066	1		
	Temp.	0.686**	0.355*	-0.295	0.213	-0.155	-0.085	0.279	1	
	Relative humidity	0.657**	0.647**	0.034	-0.134	0.322*	0.422**	0.223	0.462**	1

(*: p<0.05, **: p<0.01)

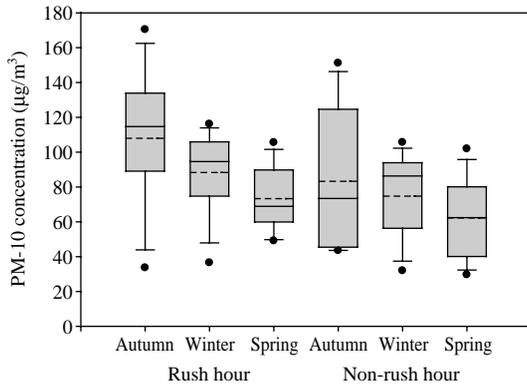


Fig. 1. Variations of PM-10 concentration according to the season and time of day (dotted line: mean, solid line in box: median, end lines of box: 25 percentile and 75 percentile, whisker caps: 10 percentile and 90 percentile, closed circles: outliers).

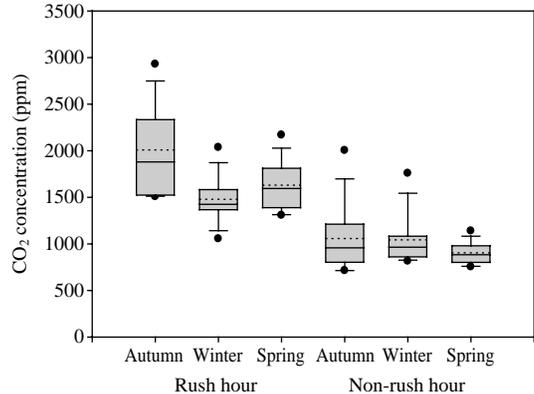


Fig. 2. Variations of CO₂ concentration according to the season and time of day (dotted line: mean, solid line in box: median, end lines of box: 25 percentile and 75 percentile, whisker caps: 10 percentile and 90 percentile, closed circles: outliers).

수만을 요인으로 하였을 경우 계절별 상관성의 정도를 살펴보면, 동계 지상구간에서 r^2 가 0.527로 가장 높게 나타났으며, 추계 지하구간에서의 r^2 가 0.514로 분석되었다. 이용 승객수를 제외하고 상관성이 높은 인자는 역간 운행 소요시간으로 추계와 동계 측정결과에서 유의한 요소로 나타났다. 춘계 측정결과의 경우 차량 정차시 문열림 시간에 의해서도 객실의 CO₂ 농도가 영향을 받는 것으로 분석되었다. 측정을 수행한 모든 계절 및 전 구간에서 승객수가 CO₂ 농도에 미치는 영향이 가장 큰 것을 알 수 있으며, r^2 의 범위

는 0.032~0.527을 보였다. 또한, 역간 운행시간이 길어질수록 객실에서의 CO₂ 농도가 증가하는 경향을 보였다. 전동차의 문열림 시간은 계절 및 구간에 따라 CO₂ 농도에 서로 다른 영향을 보였다. 반면, PM-10에 대하여 동일하게 수행한 회귀분석에서는 영향요인이 나타나지 않았다.

3.3.2 승객수에 따른 영향 분석

전동차는 환기설비의 용량과 승객의 밀집도 등을 고려하여 승객 160명을 설계정원의 100%로 차량을

Table 7. Results of regression analysis for seasonal variation of CO₂ (ppm).

		Parameter	Coefficients	r ²	sig.
Autumn	Total	# of passenger	5.590	0.356	0.000
		# of passenger, driving time	5.13, 1.052	0.393	0.000
	Ground	# of passenger	9.718	0.514	0.000
		# of passenger, driving time	8.159, 1.577	0.597	0.000
	Underground	# of passenger	4.766	0.329	0.000
	Winter	Total	# of passenger	4.675	0.277
# of passenger, driving time			4.467, 1.035	0.328	0.000
Ground		# of passenger	10.391	0.527	0.000
Underground		# of passenger	3.798	0.240	0.000
		# of passenger, driving time	3.734, 1.322	0.307	0.000
		# of passenger, driving time, door opening time	3.786, 1.384, -1.575	0.319	0.000
Spring	Total	# of passenger	3.019	0.092	0.000
		# of passenger, driving time	2.922, 0.767	0.110	0.000
	Ground	# of passenger	5.111	0.264	0.000
		# of passenger, door opening time	4.728, 12.421	0.399	0.000
		# of passenger, door opening time, driving time	4.757, 11.29, 1.354	0.456	0.000
	Underground	# of passenger	1.789	0.032	0.005

Table 8. Results of regression analysis for CO₂ (ppm) and PM-10 (µg/m³) when number of passenger is under 150.

		Parameters	Coefficients	r ²	sig.
Autumn	CO ₂	Underground # of passenger	12.555	0.556	0.000
		Ground # of passenger	12.048	0.733	0.000
Winter	CO ₂	Underground # of passenger	6.584	0.522	0.000
		Ground # of passenger	7.686	0.783	0.000
	PM-10	# of passenger	7.779, 0.066	0.807	0.000
		# of passenger, distance between adjacent stations	7.779, 0.066	0.807	0.000
Spring	CO ₂	Underground # of passenger	-0.389	0.223	0.000
		Ground # of passenger	5.440	0.233	0.000
		Underground # of passenger	5.440	0.233	0.000
		Ground # of passenger	11.043	0.461	0.000

제작한다. 정원 160명을 기준으로 밀집도의 높고 낮음을 결정하며, 밀집도가 공기질에 미치는 영향인자에 대해서 회귀분석을 한 결과를 표 8과 표 9에 나타내었다. 전동차에서 승객수를 셀 때 발생할 수 있는 오차를 감안하여 150~170명은 회귀분석에서 제외하였다.

밀집도가 낮은 경우 즉, 승객이 정원의 100%보다 적을 때 공기질 측정값에 가장 큰 영향을 끼친 인자는 승객수의 변화였다. CO₂ 농도는 승객수와 양의 상관관계를, PM-10 농도는 승객수와 음의 상관관계를 보였다. PM-10 농도는 유일하게 동계 측정에서 승객

수와 유의한 상관관계를 나타내었으며, 다른 계절에서는 유의한 영향을 미치는 인자가 나타나지 않았다. 밀집도가 높은 경우, CO₂의 농도는 승객수에 의한 영향이 가장 큰 것으로 나타났다. PM-10 농도는 승객수 혹은 역간 거리가 중요 영향인자로 분석되었다.

표 8과 표 9의 분석결과에서 전동차에서 CO₂의 농도는 승객의 수에 관계없이 영향을 받지만 PM-10의 농도는 승객의 밀집도가 높을 때 상관성이 높아지는 것을 알 수 있었다. 이는 Li *et al.* (2006)의 연구에서 승객의 수가 CO₂ 농도뿐만 아니라 PM-10 농도와도 상관성을 보인다는 결과와 유사하다. 또한, 밀집

Table 9. Results of regression analysis for CO₂ (ppm) and PM-10 (µg/m³) when number of passenger is over 170.

		Parameters		Coefficients	r ²	sig.
Autumn	CO ₂	Underground	# of passenger	8.931	0.369	0.000
		Ground	# of passenger	15.170	0.454	0.046
	PM-10	Underground	distance between adjacent stations	-0.031	0.102	0.013
		Underground	distance between adjacent stations, # of passenger	-0.036, -0.413	0.195	0.002
Winter	CO ₂	Underground	# of passenger	8.493	0.522	0.000
	PM-10	Underground	# of passenger	0.485	0.253	0.000
		Underground	# of passenger, distance between adjacent stations	0.399, -0.017	0.359	0.000
Spring	CO ₂	Underground	# of passenger	6.330	0.156	0.001
		Underground	# of passenger, distance between adjacent stations	6.389, -0.313	0.215	0.001
	PM-10	Underground	# of passenger	-0.176	0.162	0.001

도가 높을 경우, 지하구간에 대한 회귀분석 결과에서 역간 거리가 중요한 영향인자로 작용하였다. 이는 운행시간이 길어지는 경우 역에서 정차할 때 전동차 공기가 외기와외의 치환에 의한 환기시간이 지연되기 때문으로 사료된다.

4. 결 론

주요 대중교통수단인 전동차의 PM-10 및 CO₂의 농도에 영향을 미치는 인자를 파악하기 위해서 계절 별로 측정을 실시했으며, 온도, 습도, 이용 승객수, 지상 및 지하구간 등 다양한 인자들을 측정 농도 값과 같이 상관분석 및 회귀분석을 실시하였다. 공기질 측정결과, 노선 평균값은 PM-10 농도의 경우 62.6~108.0 µg/m³의 수준으로 나타났으며, CO₂는 907~2,008 ppm의 범위를 보였다. CO₂ 농도의 경우 승객이 집중되는 출근 시간대의 일부 구간에서 대중교통수단 실내공기질 관리가이드라인을 초과하는 것으로 나타나서 CO₂ 농도를 줄이기 위해서는 전동차의 환기 방식을 구간대 및 시간대 별로 차별화하거나 CO₂ 흡착장치를 특정 시간대에 가동하는 방법 등을 고려할 수 있다. CO₂ 농도와 PM-10 농도에 대한 상관관계를 분석한 결과, CO₂ 농도는 전동차 이용 승객의 수와 유의한 수준의 상관성을 보여 승객수에 의해 가장 큰 영향을 받는 것을 알 수 있었다. PM-10 농도의 경우, 승객의 밀집도에 따라 양이나 음의 상관

계수를 나타내었으며, 외기 PM-10 농도와 양의 상관 계수를 보였다.

선형 회귀분석에서 CO₂ 농도는 승객수와 역간 운행 시간에 의해 영향을 가장 많이 받는 것으로 나타났다. PM-10 농도는 승객의 밀집도가 높을 경우 승객수 및 역간 거리에 의한 영향 정도가 증가하였다.

본 연구를 통해 전동차에서 PM-10 및 CO₂ 농도에 영향을 미치는 요인을 분석하였다. 분석결과 CO₂의 농도는 승객수 및 역간 거리 등 몇 가지 요인에 의해서 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. PM-10의 농도는 외기 농도 및 승객 밀집도에 의해 다소 좌우되거나 상관성이 높은 요인을 밝히기 위해서는 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다. 본 연구의 결과는 전동차 공기질 관리계획을 수립하거나 공기질 제어 장치를 설계하는데 기초자료로 활용이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 국토해양부 미래도시철도기술개발사업 (09 Urban railroad A-01)의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

Aarnio, P., T. Yli-Tuomi, A. Kousa, T. Mäkelä, A. Hirsikko, K. Hämeri, M. Räisänen, 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, 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.
- Braniš, M. (2006) The contribution of ambient sources to particulate pollution in spaces and trains of the Prague underground transport system, *Atmos. Environ.*, 40, 348-356.
- Chan, L.Y., W.L. Lau, S.C. Lee, and C.Y. Chan (2002) Commuter exposure to particulate matter in public transportation modes in Hong Kong, *Atmos. Environ.*, 36, 3363-3373.
- Cheng, Y.H., Y.L. Lin, and C.C. Liu (2008) Levels of PM-10 and PM_{2.5} in Taipei Rapid Transit System, *Atmos. Environ.*, 42, 7242-7249.
- Cheng, Y.H., Y.L. Lin, and C.C. Liu (2009) Levels of ultrafine particles in Taipei Rapid Transit System, *Transport. Res. D.*, 14, 479-486.
- Cho, J.H., K.H. Min, and N.W. Paik (2006) Temporal variation of airborne fungi concentrations and related factors in subway stations in Seoul, Korea, *Int. J. Hyg. Environ. Health*, 209, 249-255.
- Donghwa engineering (2007) Environmental Statistics.
- Gómez-Perales, J.E., R.N. Colvile, M.J. Nieuwenhuijsen, A. Fernández-Bremauntz, V.J. Gutiérrez-Avedoy, V.H. Páramo-Figueroa, S. Blanco-Jiménez, E. Bueno-López, F. Mandujano, R. Bernabé-Cabanillas, and E. Ortíz-Segovia (2004) Commuters' exposure to PM_{2.5}, CO, and Benzene in public transport in the metropolitan area of Mexico City, *Atmos. Environ.*, 38, 1219-1229.
- Halios, C.H. and C.G. Helmis (2007) On the estimation of characteristic indoor air quality parameters using analytical and numerical methods, *Sci. Total Environ.*, 381, 222-232.
- Kim, K.Y., Y.S. Kim, Y.M. Roh, C.M. Lee, and C.N. Kim (2008) Spatial distribution of particulate matter (PM-10 and PM_{2.5}) in Seoul Metropolitan Subway stations, *J. Hazard. Mater.*, 154, 440-443.
- Korail (2009) 2009 Statistical Year Book of Railroad.
- Lau, W.L. and L.Y. Chan (2003) Commuter exposure to aromatic VOCs in public transportation modes in Hong Kong, *Sci. Total Environ.*, 308, 143-155.
- Li, T.T., Y.H. Bai, Z.R. Liu, J.F. Liu, G.S. Zhang, and J.L. Li (2006) Air quality in passenger cars of the ground railway transit system in Beijing, China, *Sci. Total Environ.*, 367, 89-95.
- Ministry of Environment (2006) Guideline on Indoor Air Quality of Public Transport.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2009) Statistical Year Book of Land, Transport and Maritime.
- Morabia, A. and T.M. Amstislavski (2009) Air pollution and activity during transportation by car, subway, and walking, *Am. J. Prev. Med.*, 37, 72-77.
- Murrini, L.G., V. Solanes, M. Debray, A.J. Kreiner, J. Davidson, M. Davidson, M. Vázquez, and M. Ozafrán (2009) Concentrations and elemental composition of particulate matter in the Buenos Aires underground system, *Atmos. Environ.*, 43, 4577-4583.
- Park, D.U. and K.C. Ha (2008) Characteristics of PM-10, PM_{2.5}, CO₂ and CO monitored in interiors and platforms of subway train in Seoul, Korea, *Environ. Int.*, 34, 629-634.
- Salma, I., M. Pósfai, K. Kovács, E. Kuzmann, Z. Homonnay, and J. Posta (2009) Properties and sources of individual particles and some chemical species in the aerosol of a metropolitan underground railway station, *Atmos. Environ.*, 43, 3460-3466.
- Salma, I., T. Weidinger, and W. Maenhaut (2007) Time-resolved mass concentration, composition and sources of aerosol particles in a metropolitan underground railway station, *Atmos. Environ.*, 41, 8391-8405.
- Shek, K.W. and W.T. Chan (2008) Combined comfort model of thermal comfort and air quality on buses in Hong Kong, *Sci. Total Environ.*, 389, 277-282.
- Som, D., C. Dutta, A. Chatterjee, D. Mallick, T.K. Jana, and S. Sen (2007) Studies on commuters' exposure to BTEX in passenger cars in Kolkata, India, *Sci. Total Environ.*, 372, 426-432.
- Tsai, D.H., Y.H. Wu, and C.C. Chan (2008) Comparisons of commuter's exposure to particulate matters while using different transportation modes, *Sci. Total Environ.*, 405, 71-77.
- Wong, L.T., K.W. Mui, and P.S. Hui (2006) A statistical model for characterizing common air pollutants in air-conditioned offices, *Atmos. Environ.*, 40, 4246-4257.
- Wong, L.T., K.W. Mui, and P.S. Hui (2008) A multivariate-logistic model for acceptance of indoor environmental quality (IEQ) in offices, *Build. Environ.*, 43, 1-6.
- Zhao, B. and J. Wu (2007) Particle deposition in indoor envi-

- ronments: Analysis of influencing factors, *J. Hazard. Mater.*, 147, 439-448.
- Zhao, W., P.K. Hopke, E.W. Gelfand, and N. Rabinovitch (2007) Use of an expanded receptor model for personal exposure analysis in schoolchildren with asthma, *Atmos. Environ.*, 41, 4084-4096.