

지하철 전동차 객실 내부 공기질 조사 연구

Research Study on Indoor Air Quality (IAQ) inside of the Subway Cabin in Seoul Metropolitan City

이경빈 · 김진식 · 배성준¹⁾ · 김신도*

서울시립대학교 도시과학대학 환경 공학과, ¹⁾서울메트로 기술연구원

(2014년 2월 13일 접수, 2014년 2월 24일 수정, 2014년 3월 5일 채택)

Kyoung Bin Lee, Jin Sik Kim, Sung Joon Bae¹⁾ and Shin Do Kim*

Department of Environmental Engineering, University of Seoul

¹⁾*Research Institute of Technology, Seoul Metro*

(Received 13 February 2014, revised 24 February 2014, accepted 5 March 2014)

Abstract

The subways play an important part in serious traffic problems. Almost seven million citizens a day are using subways as a means of traffic communication in the Seoul metropolitan city in 2012. However, the subway system is a semi-closed environment, so many serious problems occurred in subway stations and injured passengers' health. Platform screen doors (PSD) are expected to prevent negligent accident such as injury or death from falling and improve the air quality of the subway station. Installation of PSD at stations in Seoul metropolitan subway had been completed in December 2009. Consequently, the underground transportation system became a closed environment, so the air quality has improved the platforms, but it has deteriorated in the tunnels. Especially, the subway cabin has many doors, and the doors are frequently opened and closed. For this reason, the effect of door opening on subway cabin, dust flow inside the subway cabin. In this process, the maintenance work may influence the health of people who work underground, as well as that of subway users (passengers).

In this study, we measured air quality inside and outside of the subway cabin line 2 in Seoul, Korea. This study focused on the investigation of Indoor Air Quality (IAQ) and measurement target pollutants are PM₁₀, CO, CO₂, NO₂, O₃. It was found that levels of PM₁₀, CO₂, and NO₂ inside subway cabin line 2 exceeded the Korea IAQ standard. Concentrations of PM₁₀, CO₂, and NO₂ inside of the cabin are higher than outside of the cabin (Indoor Outdoor ratio is higher than 1.). Concentrations of CO, O₃ inside of the cabin are lower than outside of the cabin (Indoor Outdoor ratio is lower than 1.). There is a high correlation between CO₂ and passengers inside of the cabin and PM₁₀ is only the weakest correlation with passengers. Therefore, it is important to find out the emission source of NO₂. The results of this study will be useful as fundamental data to study indoor air quality of a subway cabin.

Key words : Subway cabin, Indoor air quality (IAQ), Indoor Outdoor ratio (I/O), PM₁₀, CO₂, NO₂

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-6490-2860, Email : sdkim@uos.ac.kr

1. 서 론

지하철은 대도시에서 많은 사람들이 이용하는 중요한 대중교통수단이다. 국내에는 전국 558개의 역사(지하 역사 508개)가 있으며, 1일 평균 690만명이 지하철을 이용하고 있다. 또한, 대중교통수단을 넘어 각종 편의시설과 문화가 결합된 시민 생활공간으로 자리 잡으면서 지하철 환경에 대한 관심이 커지고 있다(Kim *et al.*, 2013). 수도권 도시철도는 대부분의 노선에서 지상구간과 지하구간이 혼재되어 있다. 지상구간이 포함되어 있는 경우, 객실 공기질에 긍정적인 환기효과가 있는 것으로 조사되었으나(Kwon *et al.*, 2010), 이에 대한 명확한 연구는 부족한 실정이다.

환경부에서 1996년 「지하생활공간공기질관리법」을 제정하여 지하 역사, 지하도상가를 대상으로 미세먼지(Particulate Matter less than 10 μm ; PM10), 석면(asbestos), 이산화탄소(CO_2), 일산화탄소(CO), 아황산가스(SO_2), 이산화질소(NO_2), 폼알데하이드(HCHO), 라돈(Rn)에 대하여 관리기준을 설정(Ministry of Environment, 1996)하였으며, 실내공기 오염물질을 측정함에 있어서 측정의 정확성과 통일성을 유지하기 위하여 필요한 제반 사항에 대한 규정을 정한 실내공기질공정시험기준을 고시하였다. 이는 다중이용시설

등의 실내공기질관리법 제5조의 다중이용시설 실내공기질 유지기준, 제6조의 다중이용시설 실내공기질 권고기준의 적합여부를 시험·판정하는 것으로, 다중이용시설 중 지하역사에 대한 실내공기질 유지기준은 표 1에 제시하였고, 실내공기질 권고기준은 표 2에 제시하였다.

그리고 환경부에서 2006년 차량내 공기질과 환기상태를 평가하기 위한 지표 오염물질로 실태조사를 통해 오염도가 높게 나타난 CO_2 와 PM10를 기준물질로 하여 「대중교통수단 실내공기질 관리 가이드라인」을 제정하였다(Ministry of Environment, 2006). 도시철도 공기질 권고기준은 노선 1회 운행시 평균값 기준이며, 표 3과 같다.

지하 역사의 경우 내부 오염원과 외부 대기환경에 영향을 받게 되며, 구조적인 특성상 한번 유입된 오염물질이 다시 외부로 배출되기 어렵다(Kim, 2002). 그리고 2009년 12월에 승강장 안전문의 설치가 완료된 후, 승강장의 공기질은 향상이 되었으나, 다른 한편으로 터널 속에서는 오염물질이 축적되고 있는 것으로 추정된다.

그림 1은 서울시 지하철 역사 공기질 측정자료의

Table 1. Standards for Maintenance of IAQ (Subway stations).

PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	CO_2 (ppm)	HCHO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Total floating bacteria (CFU/ m^3)	CO (ppm)
150	1,000	100	—	10

Table 2. Standards for Recommendation of IAQ (Subway stations).

NO_2 (ppm)	Rn (pCi/L)	VOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Asbestos (ea/cc)	O_3 (ppm)
0.05	4.0	500	0.01	0.06

Table 3. Carbon dioxide and PM10 guideline for urban railway.

Classification	Normal times	Rush hours
CO_2 (ppm)	2,500	3,500
PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	200	250

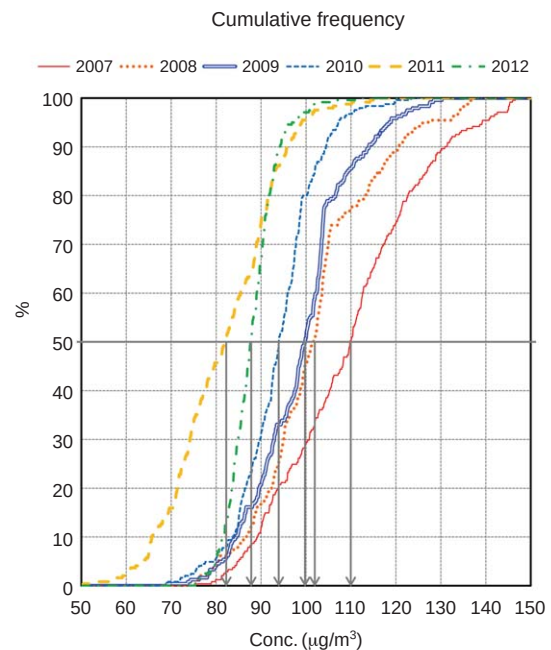


Fig. 1. Trend of PM10 in subway station.

누적빈도를 그래프로 나타낸 것이다. 승강장 안전문이 설치(2009년 12월)되기 전에는 지하 역사 오염도의 중앙값이 약 $100 \sim 110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었는데, 설치 이후에는 약 $82 \sim 94 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 농도가 약 15%정도 감소하여 확연히 오염도가 낮아지고 있음을 알 수 있다. 이는 승강장 안전문이 설치되기 전에는 승강장이 하나의 환기구 역할을 하였으나, 현재는 터널 구간내부에서 먼지가 정체됨에 따라 터널 내부의 오염농도가 증가할 가능성이 높음을 의미한다. 이러한 고농도의 오염물질은 차량의 환기설비와 승·하차시 열리는 문에 의하여 전동차 객실 내부로 유입되어 전동차 객실 내부의 공기질에 큰 영향을 미칠 수 있다(Oh *et al.*, 2011; Park *et al.*, 2004).

승객들은 역사내 대합실 및 승강장에서 기다리는 시간보다는 전동차 객실을 타서 이동하는 시간이 길기 때문에 역사내의 공기질도 중요하지만 전동차 객실 내부의 공기질이 훨씬 더 중요하다. 또한, 전동차 내부에서 PM10 이나 CO₂에 대한 다수의 연구는 발표된 바가 있으나(Xu *et al.*, 2013; Park *et al.*, 2012; Cho *et al.*, 2011; Oh *et al.*, 2011; Park and Ha, 2008; So and Yoo, 2008), 전동차 내부에서 실내공기질 유지 및 권고기준의 다른 물질에 대해서 발표된 논문은 거의 없다.

이에 본 연구에서는 전동차가 운행중일 때, 터널 속의 공기가 전동차 객실 내부로 들어오게 되므로 운행중인 전동차를 대상으로 전동차 객실 내부와 외부의 공기질을 동시에 측정 및 분석하여 실태를 파악하고, 효과적인 관리방안 수립을 위한 자료를 제공

하고자 하였다.

2. 측정 개요

2.1 측정 대상 노선 선정

2012년 서울특별시 서울통계의 자료에 의하면 서울지하철 2호선은 가장 많은 승객(752,918천명)이 이용한 노선으로 총 지하철 승객(2,559,655천명) 중 약 29.4%가 이용(Seoul Metropolitan Government, 2012)하는 서울의 대표적인 노선이다. 그리고 서울의 주요 지역(시청, 신촌, 을지로입구, 동대문역사문화공원, 강남, 사당 등)을 지나가는 노선으로, 서울지역 전역을 순회하는 순환선이다. 또한, 계속적으로 순환하므로 충분한 샘플링 시간 확보가 가능하고, 서울의 대표적 성격을 매우 잘 나타낼 것으로 추정되기 때문에 2호선 순환선을 연구대상으로 선정하였다.

2.2 현장 측정 방법

측정은 2013년 1월 21일 전동차가 출차되는 오전 07:19부터 회송되는 오후 11:59까지 서울지하철 2호선 전동차 객실 내부에서 진행되었다.

측정지점은 측정시 승객의 안전과 측정의 용이성, 대표성을 고려하여 전동차 객실 출입문 L 4-4지점의 출입부로 선정하였고, 노약자 석(Sampling point)에 측정장비를 설치하였다(그림 3 참조). 그리고 전동차 객실 내부의 승객 변화에 따른 실내공기질의 영향을 알아보기 위하여 각 출입문 앞에서 승·하차하는 인

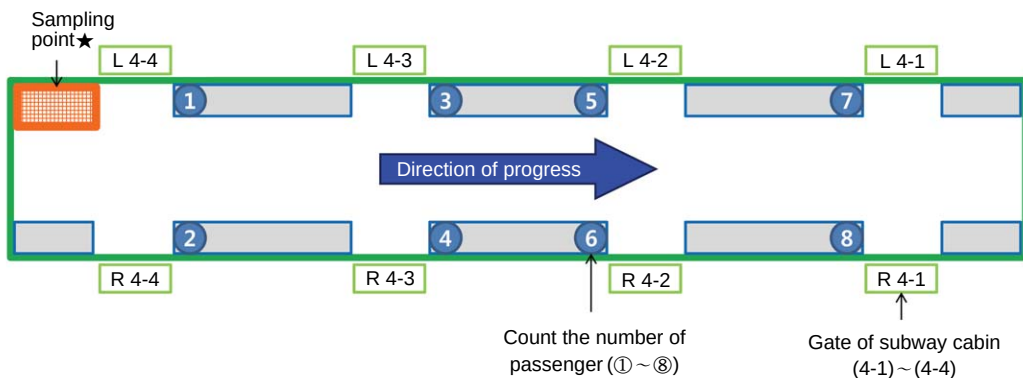


Fig. 2. Schematic diagram of the sampling point in the subway cabin line 2.

Table 4. Measuring equipment and measurement method.

	Measuring equipment		Measurement method
	Inside of the cabin	Outside of the cabin	
PM10	GRIMM (Dust monitor, Germany)	GRIMM (Dust monitor, Germany)	Light scattering method
CO	Serinus 30 (ECOTECH, Australia)	300E (Teledyne API, USA)	Non dispersive infrared method
CO ₂	410i (Thermo Scientific, USA)	Airwell plus (Kinsco Tech., Korea)	
NO, NO ₂	Serinus 40 (ECOTECH, Australia)	200E (Teledyne API, USA)	Chemiluminescence method
O ₃	Serinus 10 (ECOTECH, Australia)	400E (Teledyne API, USA)	Ultraviolet absorption method

**Fig. 3. Schematic diagram of the location of sampling point in the subway cabin line 2.**

원에 대하여 계수(①~⑧)하였다. 이에 대한 내용은 그림 2에 표현하였다.

측정 물질은 다중이용시설 등의 실내공기질관리법에서 규정하는 항목 중 PM10, CO, CO₂, NO₂, O₃와 NO에 대하여 공정시험방법에 따라 전동차 객실 내

부와 외부를 측정하였다. 측정항목에 따른 장비 및 측정방법은 표 4와 같고, 측정장비들은 측정 전 교정을 하였다. 그리고 전동차 객실의 가변성을 충분히 알아보기 위하여 매 1분마다 측정한 자료를 저장하고 분석하였다. 측정전경은 그림 3에 사진으로 나타내었다.

3. 측정 결과

3.1 전동차 객실의 운행에 따른 오염물질별 전동차 객실 내·외부 농도 측정 결과

전동차가 운행할 때 오염물질별 (PM10, CO, CO₂, NO, NO₂, O₃) 전동차 객실 내부와 외부의 농도는 그림 4, 5에 나타내었다.

그림 4, 5의 그래프는 측정한 데이터 중 승객이 가장 덜 붐비는 시간대인 9:00부터 11:00의 데이터를 나타낸 것으로, 가로축은 전동차가 성수~성수까지 1회 순환하는 동안을 나타낸 것이고, 세로축은 오염물질별 농도를 나타낸 것이다. 굵은 실선은 전동차 객실 내부의 농도 변화, 얇은 실선은 전동차 객실 외부의 농도 변화, 점선은 전동차의 운행에 따른 역사별 승객수의 변화, 이중 실선은 실내공기질 기준, 이중 점선은 대중교통수단 중 도시철도 내부 공기질 기준을 나타낸 것이다. 짙게 색칠해진 구간은 지상구간, 색이 없는 곳은 지하구간을 나타낸 것이다.

전동차가 성수~성수까지 1회 순환하는 동안 각 오염물질별 전동차 객실 내부와 외부의 전체 평균 농도는 표 5에 제시하였다.

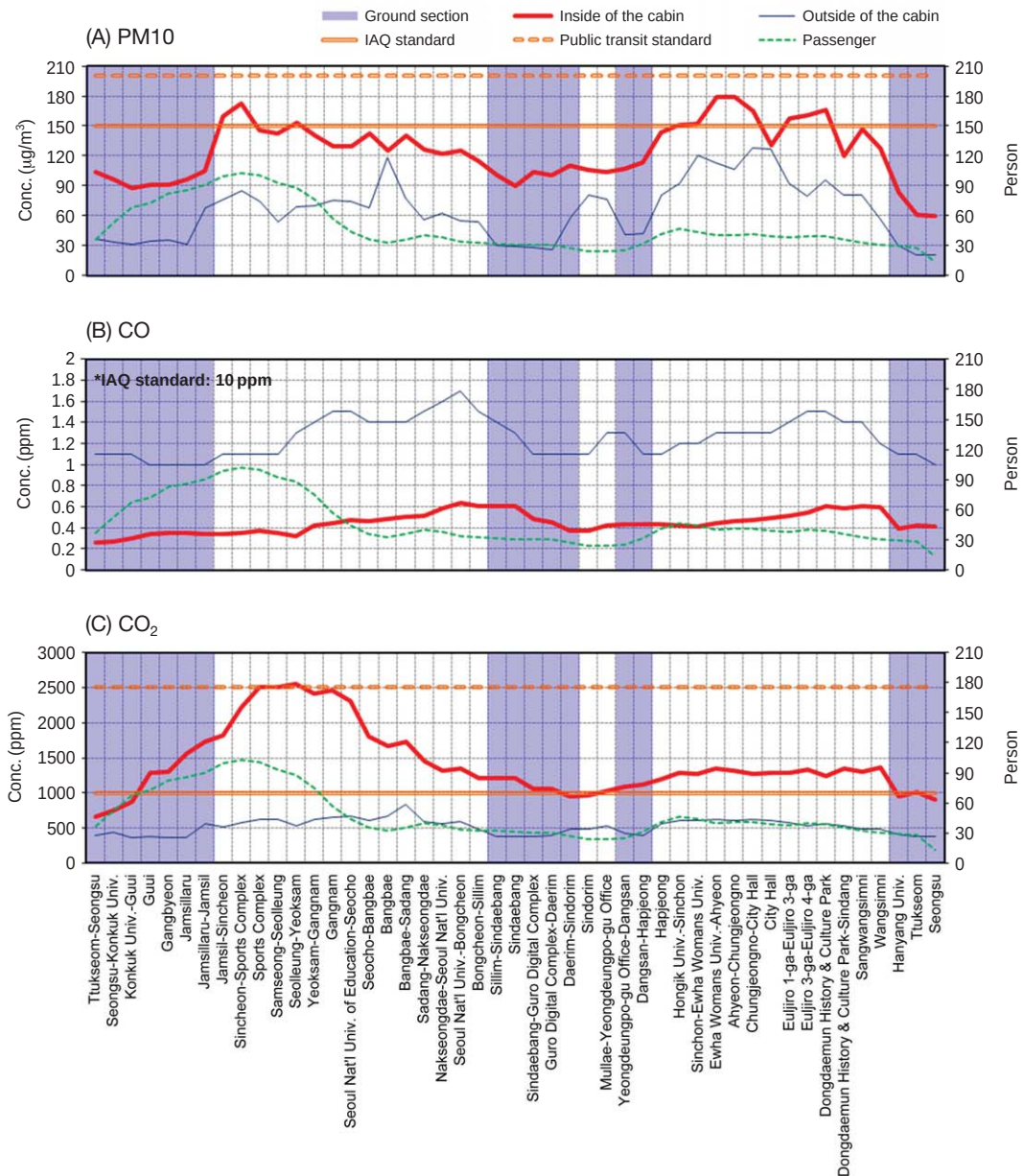


Fig. 4. Result of (A) PM₁₀, (B) CO, (C) CO₂ measurement in the subway cabin.

측정결과 중 전동차 객실 내부에서 PM10과 CO₂는 실내공기질 및 도시철도 공기질 권고기준치를 초과하는 구간이 존재하였고, NO₂의 경우는 실내공기질 기준치를 항상 초과하였다. 그리고 PM10, CO₂, NO₂는 전동차 객실 내부와 외부 농도 차이의 평균

값은 PM10의 경우 59.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, CO₂의 경우 902.4 ppm, NO₂의 경우 0.07 ppm으로 전동차 객실 내부의 농도가 전동차 객실 외부보다 높은 값을 나타내었다.

그림 4, 5를 보면 전동차가 성수~성수까지 1회 순환하는 동안 각 오염물질별 전동차 객실 내부와 외

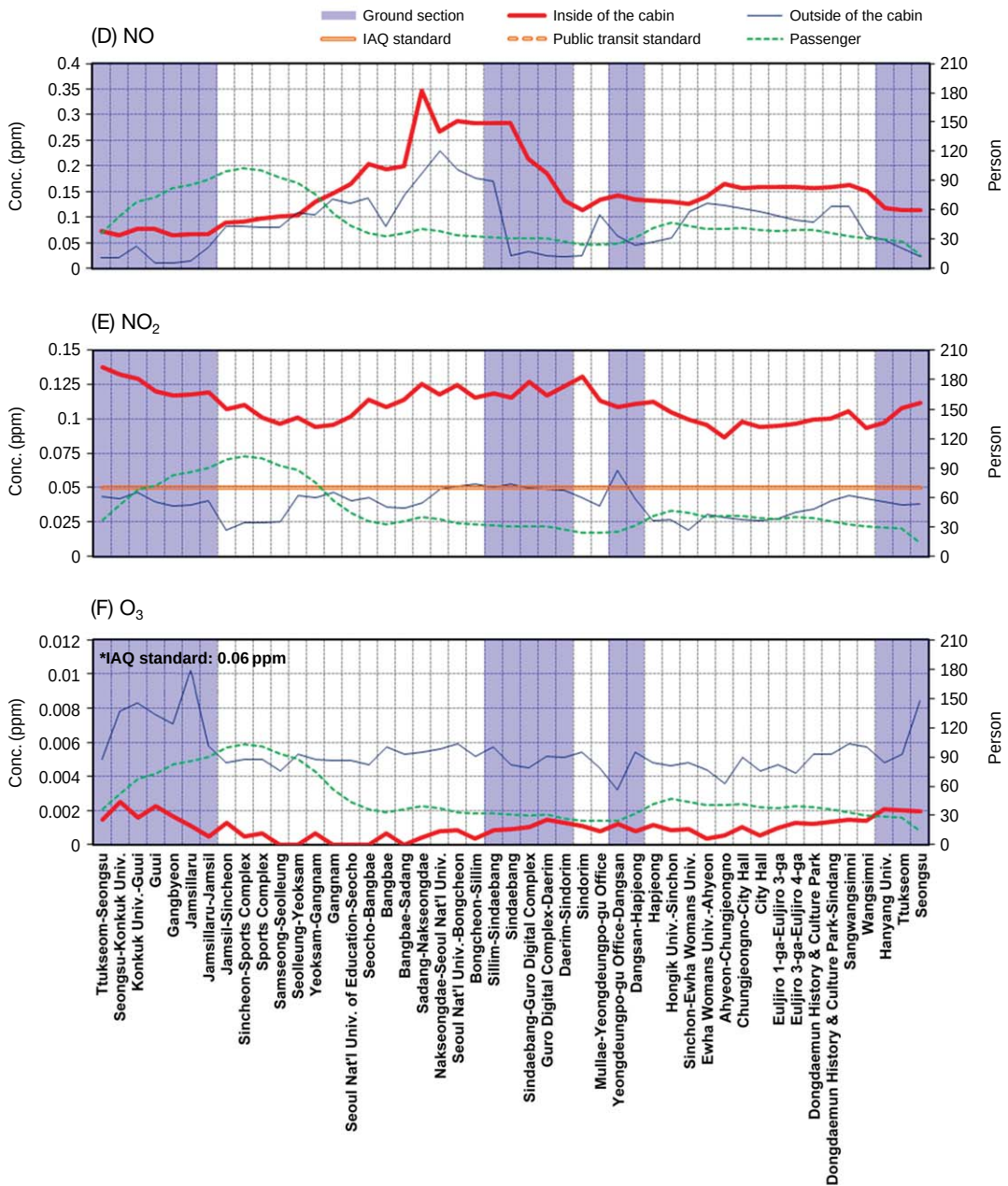


Fig. 5. Result of (D) NO, (E) NO₂, (F) O₃ measurement in the subway cabin.

부의 농도는 계속 변하고 있으며, 전동차가 지상구간에 있는지 지하구간에 있는지에 따라서 농도 변화의 양상이 달라졌다. 이를 좀 더 자세히 살펴보고자 전동차가 지상구간 및 지하구간에 있을 때, 각 오염물

질별 전동차 객실 내부와 외부의 평균 농도를 표 6에 정리하였다.

여기에서 전동차 객실 외부의 PM₁₀ 지상구간 평균 농도는 34.91 µg/m³이고, 측정된 날(2013년 1월

Table 5. Average concentrations of PM10, CO, CO₂, NO, NO₂, O₃ inside of the cabin and outside of the cabin.

Average concentration		
PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Inside	124.68
	Outside	65.34
CO (ppm)	Inside	0.45
	Outside	1.26
CO ₂ (ppm)	Inside	1423.37
	Outside	520.96
NO (ppm)	Inside	0.152
	Outside	0.086
NO ₂ (ppm)	Inside	0.110
	Outside	0.039
O ₃ (ppm)	Inside	0.001
	Outside	0.005

21일) 중 9:00부터 11:00의 서울시 도시대기측정망의 PM10 평균 농도는 $31.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 측정값이 비슷하게 나온 것으로 보아 측정이 제대로 되었다고 판단된다.

PM10의 경우, 전동차 객실 내부와 외부 모두 지상 구간보다 지하구간에서의 오염도가 높았다. 전동차 객실 내부의 PM10 농도는 전동차 객실이 지상구간을 지날 때 보다 지하구간을 지날 때 약 1.5배 높았으며, 특히 전동차 객실 외부의 PM10 농도는 지상구간보다 지하구간에서 2배가 훨씬 넘는 수준이었다.

CO의 경우, 전동차 객실 내부와 외부 모두 지상구간과 지하구간에서의 오염도가 거의 비슷했지만, 지하구간에서의 농도가 지상구간보다 약 1.2배 높았다.

CO₂의 경우, 전동차 객실 내부와 외부 모두 지상구간보다 지하구간에서의 오염도가 높았다.

이는 앞서 언급한 바와 같이, 지하 역사의 경우 구조적인 특성상 한번 유입된 오염물질이 다시 외부로 배출되기 어렵고, 지하구간에 비해서 지상구간에서의 환기가 더 잘되며, 희석효과가 크기 때문인 것으로 사료된다.

위의 3가지 물질(PM10, CO, CO₂)과 반대로 NO₂와 O₃의 경우, 전동차 객실 내부와 외부 모두 지상구간의 오염도가 지하구간보다 높았다. 이는 NO₂와 O₃이 지하구간에 비해서 빛이 존재하는 지상구간에서 광화학반응에 의해서 생성되는 부분도 있기 때문인 것으로 사료된다.

Table 6. Average concentrations of PM10, CO, CO₂, NO, NO₂, O₃ when the subway cabin is at the ground section and underground section.

		Average concentration of the ground section	Average concentration of the underground section
PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Inside	94.14	141.98
	Outside	34.91	82.58
CO (ppm)	Inside	0.40	0.48
	Outside	1.11	1.34
CO ₂ (ppm)	Inside	1101.55	1605.73
	Outside	405.23	586.53
NO (ppm)	Inside	0.130	0.164
	Outside	0.039	0.112
NO ₂ (ppm)	Inside	0.118	0.105
	Outside	0.045	0.035
O ₃ (ppm)	Inside	0.0015	0.0007
	Outside	0.0061	0.0050

4. 결과 분석 및 고찰

4.1 전동차 객실 내부와 외부 농도 비교

그림 6은 전동차 객실이 운행할 때 오염물질별 전동차 객실 내부와 외부의 농도를 비교하여 나타낸 것으로, 가로축은 전동차 객실 내부의 농도를, 세로축은 객실 외부의 농도를 나타낸 것이다.

실내공기질 연구중 실외오염물질의 실내로의 유입이 실내공기질에 어느 정도 영향을 미치는지 파악하는 것은 중요하며, 이를 통해 각종 실내 발생원으로부터 방출되는 오염물질이 실내공기질에 미치는 영향을 정량화 할 수 있다(Yocom, 1982). 따라서 실외에 발생원이 존재하는 오염물질의 실내유입율을 판단하는 자료로 실내·외 비(Indoor Outdoor ratio; I/O)가 이용되고 있다(Yocom, 1982; Alzona, 1979; Andersen, 1972).

이를 바탕으로 본 연구에서 측정한 데이터를 이용하여 전동차가 지상구간 및 지하구간에 있을 때, 오염물질별 평균 실내·외 비를 표 7에 정리하였다.

표 7에서 I/O가 1보다 큰 물질은 PM10, CO₂, NO, NO₂이었고, I/O가 1보다 작은 물질은 CO, O₃이었다. 즉, PM10, CO₂, NO, NO₂는 전동차 객실 외부보다 내부의 농도가 높았으며, CO, O₃는 전동차 객실 내부보다 외부의 농도가 높았다. 전동차가 운행하면서 출

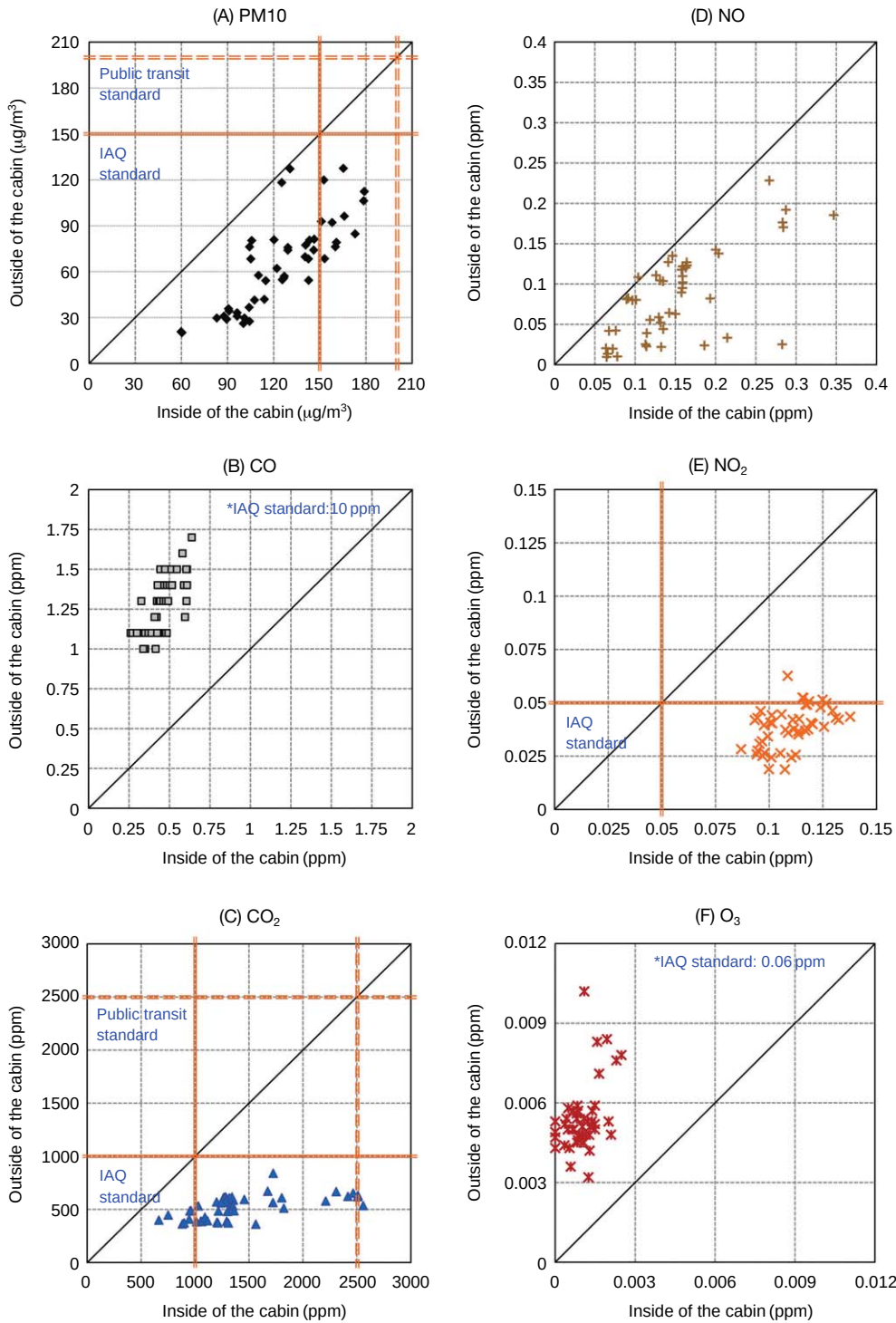


Fig. 6. Comparison of (A) PM10, (B) CO, (C) CO₂, (D) NO, (E) NO₂, (F) O₃ concentration between inside of the cabin and outside of the cabin.

Table 7. Indoor and Outdoor ratio of PM10, CO, CO₂, NO, NO₂, O₃ when the subway cabin is at the ground section and underground section.

	Indoor and Outdoor ratio (I/O)		
	Ground section	Underground section	
PM10	2.696	1.719	> 1
CO	0.361	0.356	< 1
CO ₂	2.718	2.738	> 1
NO	3.359	1.459	> 1
NO ₂	2.660	2.990	> 1
O ₃	0.238	0.142	< 1

입문이 열리고 닫히기 때문에 전동차 객실 내부와 외부의 공기가 서로 영향을 주고 받겠지만, 전동차 객실 내부의 농도가 외부보다 더 높은 것은 내부에 발생원이 있는 것으로 사료된다. 또한, 전동차 객실 외부의 농도가 더 높은 CO, O₃의 경우는 내부에서의 발생원은 없는 것으로 사료된다. 그래프 상에서 PM10, CO, NO, NO₂는 양의 비슷한 기울기를 갖고 있다. PM10, NO, NO₂는 전동차 객실 내부에 치우쳐 있고, CO는 전동차 객실 외부에 치우쳐져 있는 점에서는 차이가 있지만, 전동차 객실 내부와 외부가 서로 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 그러나 CO₂와 O₃의 기울기는 확연히 차이가 난다. 모두 양의 기울기를 갖고 있지만 CO₂의 경우는 내부 쪽으로 크게 치우쳐져 있어 외부와 관련 없이 내부가 변하고 있음을 나타낸다. 그리고 O₃의 경우는 외부 쪽으로 크게 치우쳐져 있어 내부와 관련 없이 외부가 변하는 값에 영향을 받고 있다.

본 측정 결과는 승객이 덜 붐비는 시간대 임에도 불구하고, 전동차 객실 내부의 농도가 외부보다 높은 물질들의 경우 기준치를 초과하는 시간이 많았다. 특히, NO₂의 경우 전동차 객실 내부의 농도가 실내공기질 권고기준치를 모든 구간에서 상회하였다. 이 물질에 대해서는 면밀히 살펴볼 필요성이 있다고 판단된다.

4.2 전동차 객실 내부의 농도와 승객수의 상관성

그림 7은 전동차 객실이 운행할 때 오염물질별 전동차 객실 내부의 농도 및 승객수를 비교하여 나타낸 것이다.

그림 7에서 가로축은 전동차 객실 내부의 승객수를, 세로축은 전동차 객실 내부의 농도를 나타낸 것이다. 이는 전동차 객실 내부의 승객수와 오염물질 농도의 상관성을 알 수 있는 그래프이다. 전동차 객실 내부의 승객수와 오염물질 농도를 비교해 본 결과, CO₂는 강한 양의 기울기, PM10은 약한 양의 기울기가 나왔고, 나머지 오염물질들은 음의 기울기가 나왔다. 양의 기울기가 나온 물질 중 CO₂는 사람의 호흡에 의해서도 발생하는 물질로 승객수가 적을수록 농도가 낮은 편이었고, 승객수가 많을수록 농도가 높은 편이었다. 따라서 CO₂는 승객수에 영향을 받아 강한 양의 기울기가 나온 것으로 추정된다. 그러나 PM10의 경우는 사람의 움직임에 의해서 발생하는 부분도 있지만, 사람이 호흡을 할 때나 입고 있는 옷에 의해서 어느 정도는 제거되는 부분도 있기 때문에 승객수에 크게 영향을 받지 않는 것으로 추측된다. 그리고 나머지 물질들은 승객수와 상관관계가 없는 것으로 나타났다.

4.3 전동차 객실 내부와 외부의 NO, NO₂ 비교 분석

일산화질소(NO)와 이산화질소(NO₂)의 합을 질소산화물(NO_x)이라고 한다. NO는 대기 중에서 쉽게 NO₂로 산화될 수 있고, NO₂는 NO보다 인체에 더욱 큰 피해를 주고 비교적 안정적이기 때문에 공기질의 규제에서는 NO₂를 대상으로 하고 있다(Seinfeld *et al.*, 2007).

본 연구에서 전동차 객실 내부에서 발생원을 알 수 없는 NO₂의 농도가 실내공기질 기준치를 초과하고, 실내공기오염에 있어 노출빈도와 기간이 상대적으로 중요한 NO₂(Spengler *et al.*, 1983)에 대하여 좀 더 면밀히 살펴보았다.

그림 8의 (A), (B)는 전동차 객실이 운행할 때 전동차 객실 내부와 외부의 질소산화물 농도를 비교하여 나타낸 그래프이다. 아래 회색 면 부분은 NO₂를, 그 위의 점 패턴이 있는 부분은 NO를 나타낸 것이다. 그리고 얇게 색칠해진 구간은 지상구간, 색이 없는 곳은 지하구간을 나타낸 것이다.

그래프를 살펴보면, 전동차 객실 내부와 외부 모두 NO₂의 농도는 안정적인 경향성을 보임을 알 수 있고, NO의 농도는 변화가 큼을 알 수 있다. 또한, NO의 경우 지상구간보다 지하구간에서의 농도가 높은

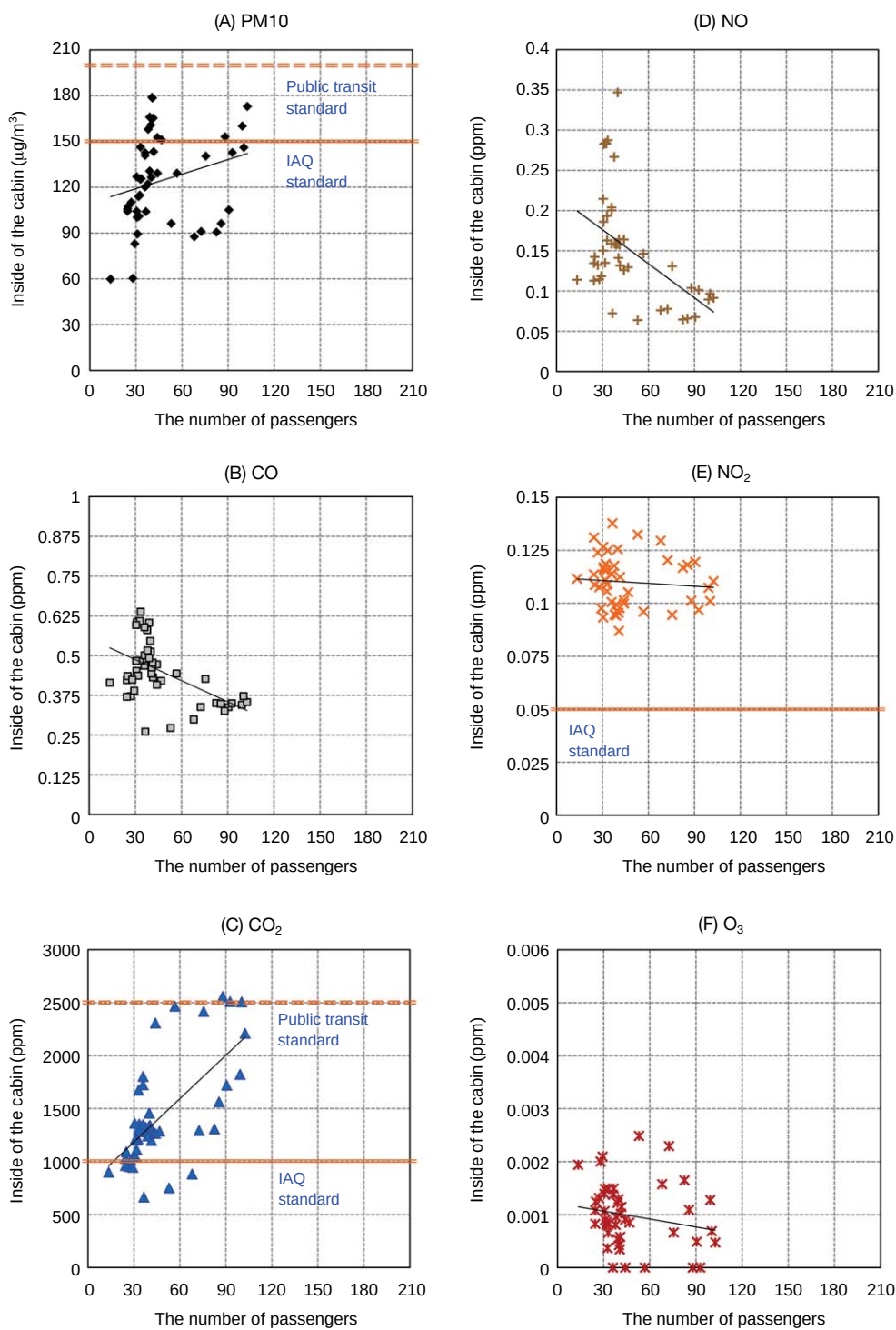


Fig. 7. Comparison between (A) PM10, (B) CO, (C) CO₂, (D) NO, (E) NO₂, (F) O₃ concentration inside of the cabin and the number of passengers.

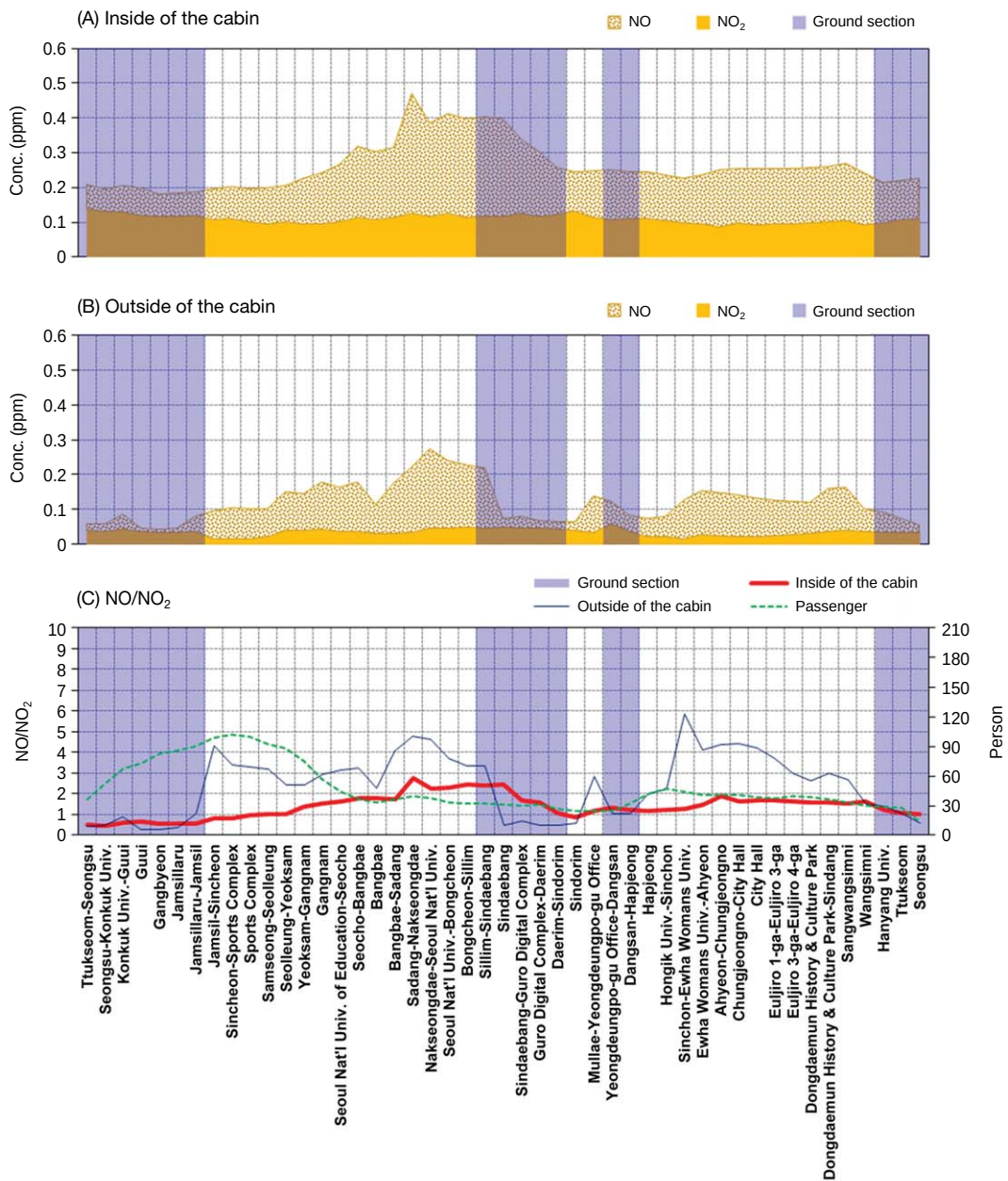


Fig. 8. (A) Result of NO, NO₂ measurement inside of the cabin subway line 2, (B) Result of NO, NO₂ measurement outside of the cabin subway line 2, (C) The ratio of NO and NO₂ in the subway cabin line 2.

경향성을 나타내었다. 구간별 평균 농도를 살펴보면, 전동차 객실 내부에서 지상구간 0.130 ppm, 지하구간 0.164 ppm을 나타내었다. 그리고 전동차 객실 외부에서 지상구간 0.039 ppm, 지하구간 0.112 ppm을 나타

내어 전동차 객실 외부의 경우 지하구간이 지상구간에 비해 약 3배 정도 높은 값을 보였다.

이를 바탕으로 NO와 NO₂의 비(NO/NO₂)를 전동차 객실 내부와 외부에 대해서 나타낸 그래프가 그

림 8의 (C)이다. 전동차 객실 내부의 경우 NO와 NO₂의 비가 0.48~2.76, 전동차 객실 외부의 경우 0.26~5.87의 변화 폭을 나타내었다. NO₂는 안정적임을 고려할 때, 전동차 객실 내부에 비해 객실 외부에서 NO의 변화 폭이 큼을 알 수 있다. Son *et al.* (2000)은 서울시 소재 일부 지하 역사를 대상으로 각 근무공간에서의 NO₂ 농도를 파악한 결과, 평균 및 표준편차는 역무실 27.87±7.15 ppb, 승강장 35.76±8.35 ppb, 터널 내부는 44.91±4.67 ppb 이었다. 이 결과들과 비교했을 때도 전동차 객실 내부의 NO₂ 농도가 높게 나타나서 전동차 객실이 운행되면서 NO, NO₂가 발생되는 것으로 추정된다.

특히, 그림 8의 (C)에서 전동차 객실 외부의 농도변화를 나타내는 얇은 실선을 살펴보면, 지상에서 지하(터널)로 들어갈 때 값이 높아져서 그 상태를 유지하다가 다시 지상으로 나오면 값이 떨어지는 것을 볼 수 있다. 지상구간보다 지하구간에서 상대적으로 NO의 NO₂로의 전환율은 낮다고 할 수 있다. 그러나 전동차 객실 내부 NO₂의 농도는 실내공기질 기준치를 항상 초과하고 있고, 공기의 순환 측면에서 NO의 농도는 지하구간이 지상구간보다 높으므로 지하 터널 및 전동차 객실에서 NO_x의 발생원(배출원) 파악과 대책이 시급히 요구된다.

5. 결 론

본 연구에서는 전동차가 운행중일 때, 전동차 객실 내부와 외부의 공기질을 동시에 측정 및 분석하여 실태를 파악하고, 효과적인 관리방안 수립을 위한 자료를 제공하고자 하였다. 서울의 대표적 성격을 매우 잘 나타낼 것으로 추정되는 2호선 순환선을 연구대상으로 선정하여, 운행중인 전동차를 대상으로 전동차 객실 내부와 외부의 공기질을 동시에 측정 및 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

연구결과에 의하면, 측정대상 오염물질 중 PM10, CO₂, NO₂는 전동차 객실 내부가 전동차 객실 외부(외기, 터널)보다 높았다. 실내·외 비(I/O)가 모두 1을 초과하여, 전동차 객실 내부에 오염물질의 발생원이 있음을 알 수 있다.

이 물질들 중 CO₂는 재차 인원의 수와 상관관계가 있는 것으로 나타났으나 PM10, NO₂는 높은 상관

관계는 없었다.

특히, NO₂의 경우 전동차 객실 내부의 농도가 실내공기질 권고기준치를 초과하며, 외부 대기 농도뿐만 아니라, Son *et al.* (2000)의 연구결과인 역무실 (27.87±7.15 ppb), 승강장 (35.76±8.35 ppb), 그리고 터널 내부 (44.91±4.67 ppb)보다도 높은 결과였다. 이는 전동차 객실 내부에서 발생원이 있는 것으로 추정된다. 따라서 이 물질의 배출원(발생원) 파악이 시급히 요구된다.

전동차 객실 내부의 오염물질에 대한 효과적인 저감대책을 마련하기 위해서는 우선적으로 오염물질의 발생원 및 이들의 영향을 정량적으로 평가하는 것이 중요하므로 이번 연구가 향후 지하 역사 전동차 객실과 관련된 공기질 개선 정책의 수립 방향에 의미 있는 결과를 제공할 것으로 기대된다. 또한, 이의 영향을 정량적으로 파악하기 위해서는 지속적인 정도관리를 통해 측정자료의 정확도를 향상시키고, 측정자료를 장기간 축적하여 서울지역 지하 역사 전동차 내부 오염물질 발생원 추정에 신뢰도를 높여 나가야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 서울시립대학교 연구년교수 연구비에 의하여 연구되었음.

References

- Alzona, J., B.-L. Cohen, H. Rudolph, H.-N. Jow, and J.-O. Frohliger (1979) Indoor-outdoor relationships for airborne particulate matter of outdoor origin, *Atmos. Environ.*, 13(1), 55-60.
- Andersen, I. (1972) Relationships between outdoor and indoor air pollution, *Atmos. Environ.*, 6, 275-278.
- Cho, Y.-M., D.-S. Park, S.-B. Kwon, J.-Y. Lee, and Y.-H. Hwang (2011) Study on the removal of carbon dioxide in the subway cabin using zeolite type carbon dioxide adsorbent, *Journal of the Korean Society for Railway*, 14(1), 1-5. (in Korean with English Abstract)
- Kim, S.-D. (2002) Air Quality of underground living space, *J. Korean Soc. Living Environ. Sys.*, 9(2), 129-135.

- Kim, S.-D., J.-R. Sohn, C.-M. Lee, C.-K. Kim, and S.-K. Park (2013) Final Report: A Study on the Planning for Improvement of the Second Air Quality of Underground Subway ('13~'17), Ministry of Environment.
- Kwon, S.-B., D.-S. Park, Y.-M. Cho, and J.-B. Kim (2010) Development of Air Cleaning System for Urban Railway Cabin, 2010 Spring Korean Society for Railway Conference, 309.
- Ministry of Environment (1996) Air Quality control Law for Underground Living Space.
- Ministry of Environment (2006) Guideline of Public Transportation for IAQ Management.
- Oh, M.-S., D.-S. Park, and E.-Y. Park (2011) A study for characteristics of PM10 in the subway passenger cabins, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 27(5), 523-533. (in Korean with English Abstract)
- Park, D.-S., M.-S. Oh, Y.-H. Yoon, E.-Y. Park, and K.-Y. Lee (2012) Source identification of PM10 pollution in subway passenger cabins using positive matrix factorization, Atmos. Environ., 49, 180-185.
- Park, D.-S., Y.-M. Cho, C.-K. Lee, and B.-H. Park (2004) Study on the air quality of railway tunnel, Proceeding of the 38th Meeting of KOSAE, 363-364.
- Park, D.-U. and K.-C. Ha (2008) Characteristics of PM10, PM2.5, CO₂ and CO monitored in interiors and platforms of subway train in Seoul, Korea, Environ. Int., 34, 629-634.
- Seinfeld, J.-H. and S.-N. Pandis (2007) Atmospheric Chemistry and Physics from Air Pollution to Climate Change, John Wiley & Sons Inc.
- Seoul Metropolitan Government (2012) Subway Passenger Transportation, <http://stat.seoul.go.kr/index.jsp>.
- So, J.-S. and S.-Y. Yoo (2008) A prediction of CO₂ concentration and measurement of indoor air quality in the EMU, Journal of the Korean Society for Railway, 11(4), 378-383. (in Korean with English Abstract)
- Son, B.-S., B.-K. Jang, J.-A. Park, and Y.-S. Kim (2000) Indoor and outdoor NO₂ concentrations at subway station and personal NO₂ exposure of subway station workers, Korean J. Sanitation, 15(4), 134-141. (in Korean with English Abstract)
- Spengler, J.-D., C.-P. Duffy, R. Letz, T.-W. Tibbitts, and B.-G. Ferris (1983) Nitrogen dioxide inside and outside 137 homes and implications for ambient air quality standards and health effect research, Environ. Sci. Technol., 17(3), 164-168.
- Xu, B., P. Cui, H. Xu, H. Chen, and Y. Lin (2013) Commuter exposure to particle matter and carbon dioxide inside high-speed rail carriages, Transportation Research Part D, 20, 1-6.
- Yocom, J.-E. (1982) Indoor-outdoor air quality relationships; a critical review, J. Air Poll. Cont. Assoc., 32(5), 500-520.