
대중교통시설 실내공기질 특성평가



<https://www.incheon.go.kr/ecopia>

생활환경과

대중교통시설 실내공기질 특성평가

이재인*, 이주형, 이병옥, 정유진, 홍다은, 진용균, 유진, 이범열, 방준상, 곽완순, 권문주
인천광역시보건환경연구원 생활환경과

Evaluation of indoor air quality in public transport facility

Jae-In Lee*, Ju-Hyung Lee, Byeng-Ok Lee, Yu-Jin Jung, Da-Eun Hong, Yong-Gyun Jin, Jin Yoo, Boem-Yeol Lee, Joon-Sang Bang, Wan-Soon Kwack, Mun-Ju Kwon

Indoor Environment Division, Incheon Research Institute of Public Health and Environment

Abstract

The management of indoor air quality(IAQ) is important, because various pollutants exist in the indoor air and can affect the human body in a variety of ways. Especially, the importance of Indoor air quality in public transportation is increasing, since modern people spend most of their time in public transportation for the commuting. Consequently, the purpose of this study were to investigate pollution level of indoor air and to identify concentration characteristics for subway facilities in incheon.

The indoor air quality of cabin, platform and concourse was investigated for the incheon line1, incheon line2, airport railroad, suinbundang line, national railroad line1. The survey was conducted each in summer and winter, for rush hour and non-rush hour. Ther were investigated that PM-10, PM-2.5, CO₂, formaldehyde, total volatile organic compounds(TVOC), benzene, toluene, ethyl benzene, xylene, styrene, total airborne bacteria(TAB), fungi.

As a result of the this study, the average concentration of each pollutant was 0.1% to 52.5% of the guide lines for the indoor air quality. Since the cabin is relatively closed, the concentrations of CO₂, TVOC, and benzene were high. The concentration of CO₂, TVOC and toluene were also high for rush hour with many users. The concentrations of formaldehyde, VOCs, and microbial pollutants were high in summer, when the emission and generation of pollutants was active due to high indoor temperature. The purpose of this study is to provide basic data for indoor air quality management for public transportation facilities, by identifying the characteristics of indoor air quality pollutants. This study is also expected to be used as policy data for customized indoor air quality management in public transportation facilities.

Key words : IAQ(Indoor air quality), Public transport facility, Indoor air pollutants, PM-2.5, CO₂

I. 서론

현대사회를 살아가는 현대인은 하루 24시간 중 대부분을 직장, 가정 등과 같은 실내 공간에서 생활하고 있다. 실내 공간은 한정된 공기 순환으로 인하여 오염물질의 농도가 지속적으로 축적되어 증가하기 때문에 실내공기질 관리에 대한 관심은 점점 증대하고 있다(최현진, 2020).

또한 실내 환경은 다양한 오염원이 존재하고, 다양한 경로로 인체에 영향을 미칠 수 있어 각별한 관리가 필요하다. 실내 환경 오염물질은 빌딩 증후군(Sick Building Syndrome), 화학물질과민증(Multiple Chemical Sensitivity)을 포함하여 면역 및 기타 알레르기 반응, 암 및 유전자 독성, 호흡기계 질환과 같은 환경성 질환을 유발하므로, 실내 환경의 공기질에 대해 철저한 관리가 요구된다(김진용, 2014).

2012년 한국법제연구원에서 조사한 실내 거주시간 조사 결과에 따르면, 한국의 실내 거주시간은 21시간(87.6%)이고, 교통수단을 포함할 경우에는 22.8시간으로 하루 24시간의 약 94.9%를 실내에서 생활한다.

2020년 국토교통부에서 조사한 자료에 의하면, 수도권 내 대중교통 이용객수는 일평균 약 730만 명으로 수도권 인구의 약 28.1%가 대중교통을 이용한다. 하루 대중교통을 이용하는 시간은 평균 2시간 54분으로 많은 시간을 대중교통시설 실내에서 생활하게 된다.

이에 따라 실내공기질의 엄격한 법적 관리와 해당 시설을 관리하는 사업자의 철저한 실내공기 관리가 필요한 실정이다. 특히 많은 시민들이 장시간 이용하고 다양한 오염원이 존재하는 대중교통시설 내 실내공기질 관리의 더욱 중요하다.

현재 『실내공기질 관리법』으로 관리되는 시설은 다중이용시설, 신축공동주택, 대중교통차량으로 구분되어 있다. 일정규모 이상의 지

하역사와 철도역사의 대합실 등은 다중이용시설로 구분되어 유지기준과 권고기준으로 관리되고 있다. 다중이용시설 실내공기질의 유지기준 항목은 미세먼지(PM-10, PM-2.5), 이산화탄소 등 6종이고, 권고기준 항목은 이산화질소, 라돈 등 4종이다. 대중교통차량 객실 내 실내공기질은 미세먼지와 이산화탄소를 권고기준으로 관리하고 있다. 최근 대중교통 실내공기질 관리의 중요성이 증대함에 따라 2020년 4월 3일부터 미세먼지는 PM-10에서 PM-2.5로 변경되었으며, 측정주기도 2년 1회에서 연간 1회로 강화되었다.

기존 연구 동향을 살펴보면, 대중교통차량 실내공기질 실태조사 및 측정방법 개선에 대한 연구(환경부, 2015), 대중교통수단 내장재에서 방출되는 오염물질의 특성에 대한 연구(국립환경과학원, 2014), 지하철 전동차 객실 내부의 공기질을 조사한 연구(이경빈 등, 2014) 등 대중교통차량 객실 내 실내공기질 특성에 대한 연구는 활발히 이루어지고 있다. 위 연구에서는 주로 대중교통차량 객실 내 오염물질 특성에 대한 연구가 진행되었고, 조사 오염물질도 미세먼지, 이산화탄소, 휘발성유기화합물 등 조사항목이 제한적이었다.

이에 본 연구는 시민의 주요 교통수단인 관내 지하철의 시설에 대해 실내공기질 오염도를 조사하고 농도 특성을 파악하고자 조사지점과 조사항목을 확대하여 연구를 진행하였고, 조사지점은 차량객실 뿐만 아니라 승강장 및 대합실을 포함하였다. 또한 조사항목은 대중교통차량 실내공기질 권고기준 오염물질을 포함하여 폼알데하이드, 총부유세균 등 12항목을 조사하였다. 본 연구를 통해 대중교통시설의 실내공기질 관리기반을 구축하고, 실내공기질 개선을 위한 기초자료로 제공하고자 하였다.

II. 이론적 고찰

2.1. 실내공기오염물질의 정의 및 특성

실내 환경은 자연적 희석과정이 존재하는 외부 환경과는 달리 상대적으로 밀폐되어 있기 때문에, 다양한 오염원으로부터 발생된 오염물질이 누적되어 인체에 영향을 미친다(김진용, 2014). 미국 EPA는 실내 환경에서 노출되어지는 오염물질의 농도를 조사한 결과, 실외 환경보다 평균 2~5배, 최대 100배 이상 높다고 발표하였다(EPA, 2008; 김윤신, 2010).

2.1.1. 실내공기오염물질의 오염원

실내 공기의 오염은 외부 대기의 오염물질이 실내 환기 과정 등으로 실내로 유입되는 외부 요인과 인체활동, 생활용품, 사무용품, 건축 자재로부터 오염물질이 발생하는 내부요인으로 구분된다.

대중교통시설 내 실내 공기오염의 주요원인도 위와 마찬가지로 크게 이용객의 활동, 시설 내 건축자재, 외부 오염물질의 유입 등으로 나눌 수 있다.

대중교통시설 내 주요오염원을 오염물질별로 살펴보면, 대중교통시설 내 미세먼지는 외부 대기로부터 유입되기도 하지만 도시철도 운행 과정에서 브레이크 패드, 레일 등의 마찰로부터 생성된 입자상물질이 대중교통시설로 유입된다(김종범 등, 2020; Jung et al., 2010).

실내 이산화탄소는 이용객의 호흡과정에서 생성되며, 실내 체적, 인원, 난방 및 환기 여부 등으로부터 크게 영향을 받기 때문에 실내오염의 주요 지표로 사용된다(서울시, 2014).

폼알데하이드와 휘발성유기화합물의 주요 오염원은 헤어 스프레이, 화장품, 의류 등 인체 활동으로부터의 발생과 합판, 단열재, 바닥재, 접착제, 페인트 등으로부터 발생하는

시설 내 건축 자재 요인이 있다(대한산업보건협회, 2005).

미생물성 오염물질인 부유세균과 곰팡이는 인체 활동이나 냉방장치, 가습기, 외부로부터 유입 등으로 발생된다(김진용, 2014).

2.1.2. 실내공기오염물질의 환경성 질환

미세먼지는 인체에 천식, 진폐증과 같은 호흡기 질환을 유발한다(대한산업보건협회, 2005; 공성용, 이희선, 2004). 도시철도 터널 내 미세먼지는 레일과 브레이크 패드 등에서 마찰로 발생하는 철(Fe), 구리(Cu) 등을 함유한 금속성 미세먼지로, 인체에 노출 시 중금속 중독을 발생시킨다(김종범 등, 2020; 공성용, 이희선, 2004).

이산화탄소는 고농도가 아니면 직접적인 인체 영향은 없지만, 실내 공기 중 약 4%이상 농도에서는 두통을 일으키고 약 5% 이상이면 호흡곤란을 초래한다(공성용, 이희선, 2004).

폼알데하이드는 자극성 냄새를 갖고 있는 화학물질로, 1 ppm 이하의 농도에서 반복 노출되면 눈, 코 및 호흡기도에 자극을 주고 장기간 노출되면 정서불안, 기억력 감퇴 등을 유발한다(공성용, 이희선, 2004).

휘발성유기화합물은 오염물질의 종류, 노출 농도, 기간 등 다르게 나타나지만, 주로 피로감, 두통, 현기증, 중추신경 억제 등의 환경성 질환을 유발한다(대한산업보건협회, 2005).

부유세균, 곰팡이 등 미생물성 오염물질은 전염성 질환, 알레르기 질환, 호흡기 질환 등을 유발한다(공성용, 이희선, 2004).

2.2. 국내 실내공기질 관리법

“실내공기질 관리법”은 다중이용시설, 신축공동주택, 대중교통차량의 실내공기질을 알맞게 유지하고 관리함으로써 그 시설을 이용하는 국민의 건강을 보호하고 환경상 위해의 예방을 목적으로 한다(최현진, 2020).

현재 다중이용시설의 실내공기질 관리는 유지기준과 권고기준을 별도로 마련하여 적용하고 있으며, 신축공동주택과 대중교통차량은 권고기준만을 설정하여 적용시키고 있다. 유지기준은 다중이용시설 소유자 등이 반드시 지켜야하는 관리기준으로, 위반 시 과태료 부과, 개선명령 등의 행정조치가 시행되고, 권고기준은 자율적 준수를 유도하는 기준으로, 위반 시 개선 권고가 이루어진다(최현진, 2020).

실내공기질 관리법에 의해 적용받는 다중이용시설은 일정 규모 이상의 지하역사, 철도역사의 대합실, 도서관, 어린이집 등이 해당되고, 신축공동주택은 100세대 이상 신축되는 아파트, 연립주택, 기숙사가 해당된다. 대중교통차량은 도시철도차량, 철도차량, 시외버스가 해당된다.

다중이용시설 실내공기질 관리 오염물질 중 유지기준으로 관리되는 오염물질은 PM-10, PM-2.5, 이산화탄소, 폼알데하이드, 총부유세균, 일산화탄소이고, 권고기준 오염물질은 이산화질소, 라돈, 총휘발성유기화합물, 곰팡이이다. 신축공동주택의 권고기준 오염물질은 폼알데하이드, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌, 라돈이다.

대중교통차량의 권고기준 오염물질은 미세먼지와 이산화탄소이다. 2020년 4월 3일부터 미세먼지는 PM-10에서 초미세먼지인 PM-2.5로 변경되었으며, 기준은 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 관리되고 있다. 이산화탄소는 혼잡시간대와 비혼잡시간대로 구분되어 관리되고, 혼잡시간대(07:30~09:30 또는 18:00~20:00)는 2,500 ppm 이하, 비혼잡시간대(혼잡시간대 외의 시간대)는 2,000 ppm 이하로 구분하여 관리하고 있다.

Table 1. Guideline of indoor air quality for public transportation.

Pollutants	Guideline	
	Rush hour	Non-Rush hour
PM-2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	50	
CO ₂ (ppm)	2,500	2,000

Table 2. Sources and environmental diseases of indoor air pollutants.

Pollutants	Sources	Environmental diseases
PM-10, PM-2.5	Inflow from outdoor air, Friction with break pad and railroad	asthma, pneumoconiosis
CO ₂	Breath	headache, dyspnea
HCHO	Insulator, Cosmetic, Cloth	mucosa stimulation, mental unease, hypomnesia
VOCs	Paint, Glue, Hair spray	fatigability, headache, dizziness, orthostatic hypotension
Bacteria, Fungi	Inflow from outdoor air, physical activity, Air conditioner, humidifier	infectious disease, allergy, respiratory disease

III. 조사대상 및 방법

3.1. 조사 대상

본 연구는 인천시 관내 운행구간 도시철도인 인천1호선, 인천2호선, 수인선, 국철1호선, 공항철도 5개 노선의 차량객실, 승강장, 대합실을 조사대상으로 선정하였다(Table 3).

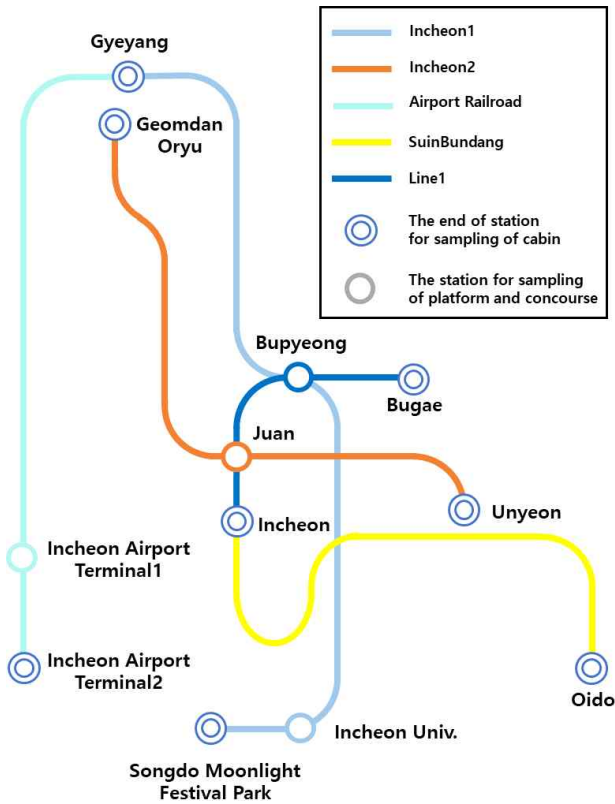


Fig. 1. Sampling point for public transportation in Incheon.

3.2. 조사 방법

3.2.1. 조사 지점 및 시간대

차량객실의 오염도 조사는 해당노선의 관내 구역인 출발역에서 도착역까지 왕복으로 시료 채취를 하였다(Table 3). 또한 각 노선별로 이용객이 많고 오염도를 대표할 수 있는 역사의 승강장과 대합실의 조사 지점으로 선정하였고(Table 3), 차량객실 오염도 조사와 동시에 진행하였다. 오염도 조사기간은 노선별로 겨울철(2월)과 여름철(7월)에 각 1회씩 실시하였고, 조사시간은 혼잡시간대(07:30~09:30)와 비혼잡시간대(12:00~15:00)로 구분하여 진행하였다(Table 4).

3.2.2. 분석항목

본 연구에서 조사항목은 『실내공기질 관리법』의 『대중교통차량 관리·운영 권고 기준』으로 규정된 오염물질인 초미세먼지(PM-2.5)와 이산화탄소뿐만 아니라, 동법 『다중이용시설·건축공동주택 실내공기질 유지기준·권고기준』으로 규정된 오염물질까지 확대하였다.

주요 조사항목은 미세먼지(PM-10), 초미세먼지(PM-2.5) 이산화탄소, 폼알데하이드, 총휘발성유기화합물(TVOC), 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌, 총부유세균, 부유곰팡이 12 항목이고, 환경요인 온·습도를 함께 측정하였다(Table 5).

Table 3. Information of sampling point and railway line in this study.

Railway line	Sampling point		Travel time (one-way)
	Cabin	Platform and Concourse	
Incheon1	Songdo Moonlight Festival Park ↔ Gyeyang	Incheon Univ.	56 m
Incheon2	Unyeon ↔ Geomdan Oryu	Juan	52 m
Airport Railroad	Incheon Airport Terminal2 ↔ Gyeyang	Incheon Airport Terminal1	38 m
SuinBundang	Incheon ↔ Oido	Incheon	30 m
Line1	Incheon ↔ Bugae	Bupyeong	23 m

Table 4. Sampling information in this study.

Sampling points	1) Cabin 2) Platform 3) Concourse
Sampling hours	1) Rush hour(07:30~09:30) 2) Non-Rush hour(12:00~15:00)
Sampling Season	1) Winter(February) 2) Summer(July)

Table 5. Target pollutants in this study.

Category	Pollutants
Pollutants regulated for public transportation	1) PM-2.5 2) CO ₂
Pollutants regulated for public station and newly-constructed apartment houses	3) PM-10 4) HCHO 5) TVOC 6) TAB 7) Fungi 8) Benzene 9) Toluene 10) Ethyl benzene 11) Xylene 12) Styrene
Environmental factor	13) Temperature 14) Humidity

3.2.3. 시료채취 및 분석방법

미세먼지(PM-10)와 초미세먼지(PM-2.5), 이산화탄소의 시료채취 및 분석은 『실내공기질 관리를 위한 대중교통차량의 제작·운영 관리지침』의 『대중교통차량의 실내공기질 측정방법』에 준하여 실시하였고, 기타 오염물질은 『실내공기질 공정시험기준』에 준하여 분석하였다.

시료채취는 조사지점별로 실내공기질을 대표할 수 있는 곳을 선정하였고, 모든 오염물질 시료채취 높이는 1.2 m ~ 1.5 m 높이에 서 진행하였다.

(1) 미세먼지(PM-10), 초미세먼지(PM-2.5)

미세먼지와 초미세먼지는 『대중교통차량의 실내공기질 측정방법』으로 규정된 광산란법으로 자동연속 측정하였다. 측정장비는 『미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법』 제25조에 따라 성능인증을 받은 미세먼지 간이측정기 중 1등급 장비(US/8530, TSI)를 사용하여 1분 간격으로 데이터를 수집하였다.

(2) 이산화탄소(CO₂)

이산화탄소는 『대중교통차량의 실내공기질 측정방법』으로 규정된 비분산적외선법(NDIR, Non-Dispersive Infrared)의 원리로 공기 중 이산화탄소를 분석하는 자동연속 측정기기(IQ-610Xtra, Graywolf)를 이용하여 5분 간격으로 데이터를 수집하였다.

(4) 폼알데하이드(HCHO)

폼알데하이드는 실내공기질 공정시험기준(ES 02601.1c) 『2,4 DNPH 카트리지와 액체크로마토그래프법』에 따라 시료채취와 분석을 실시하였다.

오존의 간섭을 막기 위해 오존스크러버(Supelco, US)를 DNPH(Dinitrophenylhydrazine) 카트리지(Supelco, US) 전단에 결합 후 시료채취 펌프(MP-Σ100H, Sibata)를 이용하여 시료채취를 하였다. 시료채취 유량은 0.5 L/min으로 30분 동안 시료채취 하였고, 도시철도 운행 시간이 30분 미만인 노선은 운행 시간 동안 시료채취를 진행하였다.

시료채취 완료된 DNPH 카트리는 아세토나이트릴(Acetonitrile) 용매로 전처리 후 고성능액체크로마토그래피(Waters2695, Waters)를 이용하여 360 nm 파장에서 분석하였다.

(5) 총휘발성유기화합물(TVOC), 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌

휘발성유기화합물은 실내공기질 공정시험기준(ES 02602.1c) 『고체흡착관과 기체크로마토그래프-MS/FID법』에 따라 시료채취와 분석을 실시하였다.

고체흡착관 Tenax tube(Markes, US)를 시료채취 펌프(MP-Σ30H, Sibata)에 연결하여 시료채취를 하였다. 시료채취 유량은 0.1 L/min으로 30분 동안 시료채취 하였고, 도시철도 운행 시간이 30분 미만인 노선은 운행 시간 동안 시료채취를 진행하였다.

시료채취 완료된 고체흡착관은 자동열탈착장치(Unity-xr, Markes)가 부착된 GC/MS(Thermo Trace1310/ISQLT)를 이용하여 분석하였다.

(6) 총부유세균(TAB), 부유곰팡이(Fungi)

총부유세균(TAB, Total Airborne Bacteria)과 부유곰팡이(Fungi)는 실내공기질 공정시험기준(ES 02701.1c, ES 02702.1a) 『충돌법』에 따라 시료채취와 분석을 실시하였다.

총부유세균은 시료채취펌프(MAS100 400 holes, MERCK)를 이용하여 부유세균배지(TSA, Tryptic Soy Agar)에 공기 중 미생물을 충돌시켜 시료채취 하였다. 부유곰팡이는 같은 방법으로 부유곰팡이배지(PDA, Potato Dextrose Agar)를 이용하여 시료채취 하였다. 시료채취펌프 유속은 100 L/min이고, 총 공기채취량은 총부유세균 250 L, 부유곰팡이 200 L로 진행하였다.

시료채취 완료된 부유세균배지는 배양기(IR-150, Daihan)를 이용하여 35 °C에서 48 시간 동안 배양 후, 증식된 집락수를 계수하여 채취한 공기의 단위체적 당 집락수로 농도(CFU/m³)를 산출하였다. 부유곰팡이는 25 °C에서 5일 ~ 7일 동안 배양 후 같은 방법으로 농도를 평가하였다.

(7) 실내 온·습도

실내 온도와 습도는 온·습도 자동연속 측정기기(IQ-610Xtra, Graywolf)를 이용하여 오염물질 시료채취와 동일한 지점에서 1분 간격으로 데이터를 수집하였다.

(8) 통계분석

본 연구에서 조사한 오염물질과 환경인자간의 상관성을 파악하고, 조사항목간의 상관성을 파악하기 위하여 SPSS version 18.0을 이용하여 통계분석을 실시하였다. 상관성 분석은 피어슨상관분석(pearson correlation analysis)으로 평가하였고, 유의수준(p)은 0.05 이하로 유의성 여부를 판단하였다.

조사지점별, 시간대별, 계절별 오염물질 농도에 대해서 그룹 간 통계적 차이의 유의성을 파악하기 위하여 분산분석(ANOVA, Aanalysis of variance)을 실시하였다.

3.2.4. 대기자동측정망 미세먼지 농도 데이터

외부 미세먼지 농도에 따른 각 조사지점별 미세먼지 농도의 변화를 알아보기 위하여 한국환경공단 에어코리아(www.airkorea.or.kr)에서 제공하는 도시대기측정망의 PM-10, PM-2.5 농도자료를 이용하였다. 측정소 위치 선정은 본 연구의 승강장·대합실 조사역과 0.5 km ~ 5.9 km 거리의 인접한 측정소를 선정하였다.

IV. 결과 및 고찰

4.1. 대중교통차량 실내공기질 관리 오염물질 농도 분포

대중교통차량 실내공기질 권고기준으로 관리 되는 오염물질인 PM-2.5와 이산화탄소의 농도 분포를 분석하였다. (Fig. 2-3)은 차량객실 내 혼잡시간대와 비혼잡시간대의 PM-2.5와 이산화탄소 측정값을 농도 순으로 나열한 그래프이다.

차량객실 내 PM-2.5의 혼잡시간대의 평균 값은 $15.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 비혼잡시간대는 $13.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 대중교통차량 실내공기질의 PM-2.5 권고기준인 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이내로 조사되었다(Table 6). 혼잡시간대의 PM-2.5 농도는 권고기준의 30.0 %, 비혼잡시간대는 27.0 % 수준으로, 조사시간에 따른 PM-2.5의 농도차이는 미미한 것으로 조사되었다(Fig. 2). 혼잡시간대의 PM-2.5 데이터 823건과 비혼잡시간대의 데이터 821건은 모두 권고기준 이내로 조사되었다(Table 6).

차량객실 내 이산화탄소의 혼잡시간대 평균값은 1,028 ppm, 비혼잡시간대는 770 ppm으로 대중교통차량 실내공기질의 이산화탄소 권고기준인 혼잡시간대 2,500 ppm, 비혼잡시간대 2,000 ppm 이내로 조사되었다(Table 6). 혼잡시간대의 이산화탄소 농도는 권고기준의 41.1 %, 비혼잡시간대는 38.5 % 수준으로, 혼잡시간대의 이산화탄소 농도가 비혼잡시간대보다 높게 조사되었다(Fig. 3). 차량 내 이산화탄소의 주 오염원은 인체 호흡의 영향으로 이용객이 많은 혼잡시간대에 비혼잡시간대보다 약 1.3배 높은 농도를 보였다(Table 6). 혼잡시간대의 이산화탄소 데이터 614건 중 4건은 권고기준을 초과하였고(초과비율 0.65%), 비혼잡시간대의 데이터 636건은 모두 권고기준 이내로 조사되었다(Table 6).

환경부에서 발간한 『4차 실내공기질 관리 기본계획』에서 대중교통차량의 실내공기질 오염도 조사결과(16년 ~ 18년)를 살펴보면, 본 연구 결과와 같이 미세먼지는 혼잡도에 따른 농도

차이는 없었고, 이산화탄소 농도는 이용객이 밀집된 혼잡시간대의 이산화탄소 농도가 비혼잡시간대보다 약 35% 높게 나타났다.

Table 6. Average concentration of PM-2.5 and CO₂ in cabin.

		Rush hour	Non-Rush hour
PM-2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Ave.	15.0	13.5
	Max.	42	35
	Min.	4	3
	N	823(0)	821(0)
CO ₂ (ppm)	Ave.	1,028	770
	Max.	3,281	1,620
	Min.	190	226
	N	616(4)	636(0)

※ () : Number of data exceeded guideline

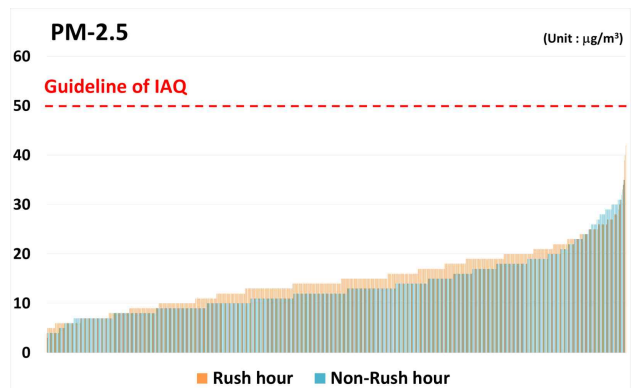


Fig. 2. Distribution of PM-2.5 concentration in cabin.

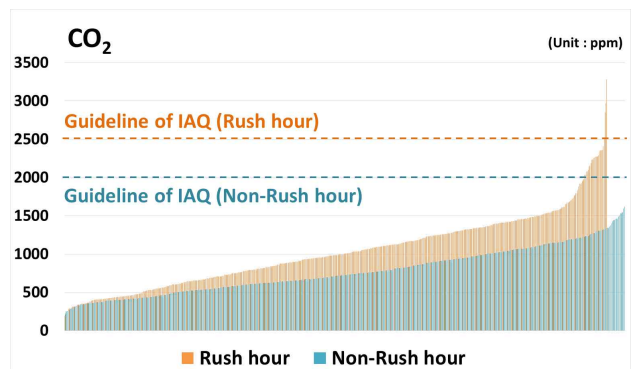


Fig. 3. Distribution of CO₂ concentration in cabin.

4.2. 5개 노선 평균 데이터 비교

각 노선별 오염물질 평균 데이터를 조사지점별, 시간대별, 계절별로 구분하여 (Table 12)에 나타내었다.

본 연구에서 조사된 각 오염물질의 평균 농도는 실내공기질 관리법상 유지기준, 권고기준의 0.1 % ~ 52.5 % 수준으로 조사되었다 (Table 12).

세부적으로 오염물질별 평균농도를 살펴보면, PM-10과 PM-2.5는 대중교통차량 실내공기질 권고기준의 각 27.5 %, 30.9 %, 이산화탄소는 52.5 % 수준으로 조사되었다 (Table 12). 폼알데하이드는 다중이용시설 실내공기질 유지기준의 6.1 %, TVOC는 다중이용시설 실내공기질 권고기준의 19.3 % 수준으로 조사되었다 (Table 12). 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌은 신축공동주택 실내공기질 권고기준의 0.1 % ~ 4.3 % 수준으로 조사되었다 (Table 12). 총부유세균은 다중이용시설 중 민감시설 실내공기질 유지기준의 11.3 %로 조사되었고, 부유곰팡이는 다중이용시설 중 민감시설 실내공기질 권고기준의 30.2 % 수준으로 조사되었다 (Table 12).

4.2.1. 조사지점별 농도 특성 파악

조사지점별 유의한 농도 차이를 보이는 오염물질은 이산화탄소($p < 0.01$), TVOC($p < 0.01$), 벤젠($p < 0.05$)으로 조사되었다 (Table 7).

이산화탄소와 TVOC는 조사지점별 가장 뚜렷한 농도차이를 보였고, 이산화탄소와 TVOC 등을 포함한 오염물질 7종이 차량객실에서 다른 조사지점보다 높게 나타났다 (Fig. 4-8). 이는 상대적으로 밀폐되어 있는 차량객실의 구조적 특성 때문에, 이용객과 주변 환경으로부터 방출된 오염물질이 희석되지 못하고 누적된 것으로 판단된다.

승강장과 대합실 간 농도 차이는 미미하고, 두 조사지점 간 뚜렷한 경향성은 나타나지 않았다 (Fig. 4-8).

Table 7. Average concentration of indoor air pollutants by sampling point

	Cabin	Platform	Concourse
PM-10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	27.2	25.2	29.9
PM-2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	14.2	14.9	17.3
CO ₂ (ppm)	897**	395**	387**
HCHO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	5.3	5.9	7.1
TVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	147.9**	71.9**	69.1**
Benzene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1.9*	0.9*	1.0*
Toluene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	12.0	10.7	9.2
Ethyl benzene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1.9	2.4	1.9
Xylene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	3.3	3.1	2.6
Styrene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.3	0.1	0.2
TAB (CFU/ m^3)	81	80	109
Fungi (CFU/ m^3)	159	153	141

※ p-value : ** < 0.01, * < 0.05, / numbers of data : 80.

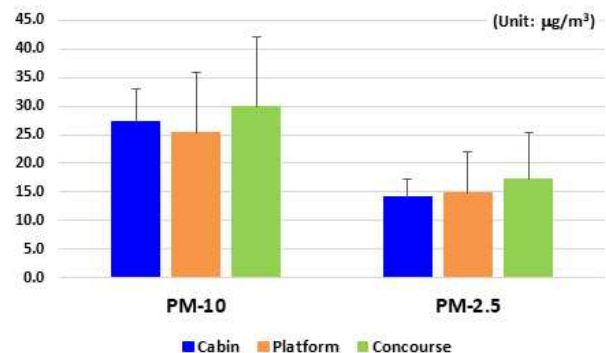


Fig. 4. Average concentration of PM-10 and PM-2.5 by sampling point.

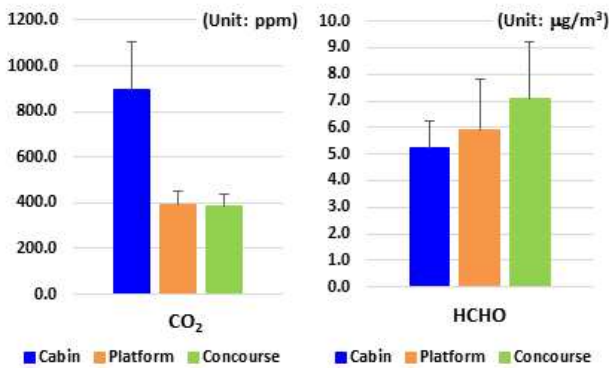


Fig. 5. Average concentration of CO₂ and HCHO by sampling point.

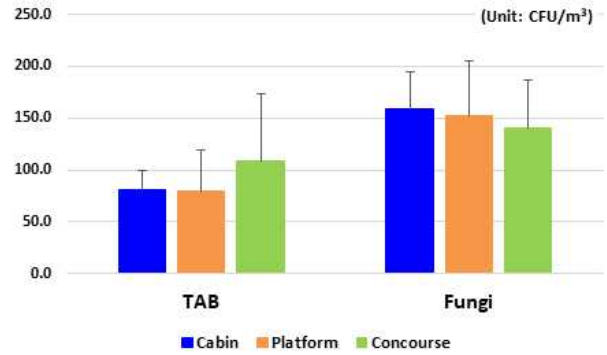


Fig. 8. Average concentration of TAB and Fungi by sampling point.

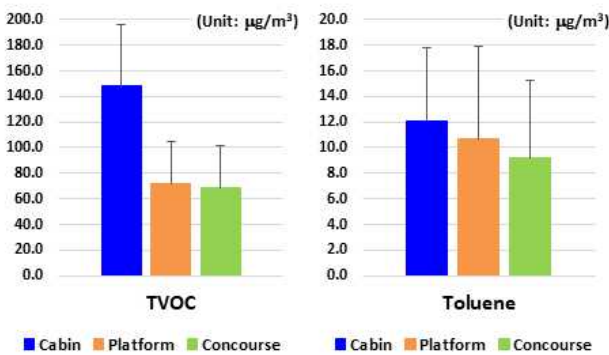


Fig. 6. Average concentration TVOC and Toluene by sampling point.

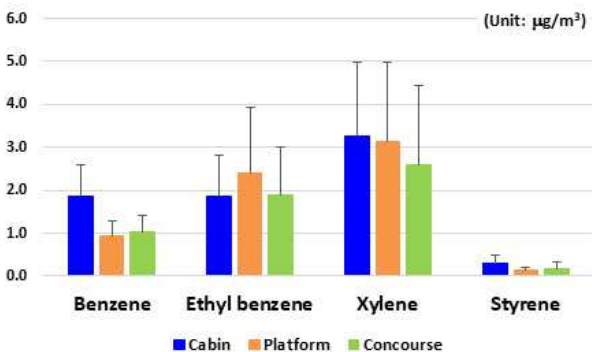


Fig. 7. Average concentration of VOCs (Benzene, Ethyl benzene, Xylene, Styrene) by sampling point.

4.2.2. 시간대별 농도 특성 파악

시간대별 유의한 농도 차이를 보이는 오염 물질은 이산화탄소($p < 0.05$), TVOC($p < 0.05$), 톨루엔($p < 0.05$)으로 조사되었다(Table 8).

이산화탄소와 TVOC 등을 포함한 오염물질 9종이 혼잡시간대에서 비혼잡시간대보다 높은 농도를 보였다(Fig. 9-13). 위 오염물질들의 오염원은 환경요인뿐만 아니라 인체 호흡이나 의복, 스프레이, 향수 등 이용객의 활동으로부터 발생되기 때문에 이용객이 많은 혼잡시간대에 높은 농도를 보인 것으로 판단된다.

조사 시간대별 대기자동측정망에서 측정된 외기 미세먼지 농도를 살펴보면, 본 연구의 시료채취 기간 동안 혼잡시간대 외기 PM-10의 평균 농도는 $29.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM-2.5는 $13.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 비혼잡시간대 외기 PM-10은 $36.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM-2.5는 $16.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 비혼잡시간대의 외기 미세먼지의 농도가 혼잡시간대보다 높은 것으로 조사되었다. 이로 인해 본 연구에서 조사된 대중교통 시설의 미세먼지 농도는 외기 미세먼지 농도의 영향을 받아 비혼잡시간대가 혼잡시간대보다 높게 나타난 것으로 판단된다(Fig. 9).

Table 8. Average concentration of indoor air pollutants by sampling hours.

	Rush hour	Non-Rush hour
PM-10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	26.6	28.2
PM-2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	14.3	16.0
CO ₂ (ppm)	707*	574*
HCHO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	5.7	6.4
TVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	107.1*	85.5*
Benzene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1.5	1.1
Toluene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	13.3*	7.9*
Ethyl benzene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2.1	2.0
Xylene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	3.2	2.8
Styrene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.2	0.2
TAB (CFU/ m^3)	105	75
Fungi (CFU/ m^3)	166	136

※ p-value : ** < 0.01, * < 0.05, / numbers of data : 80.

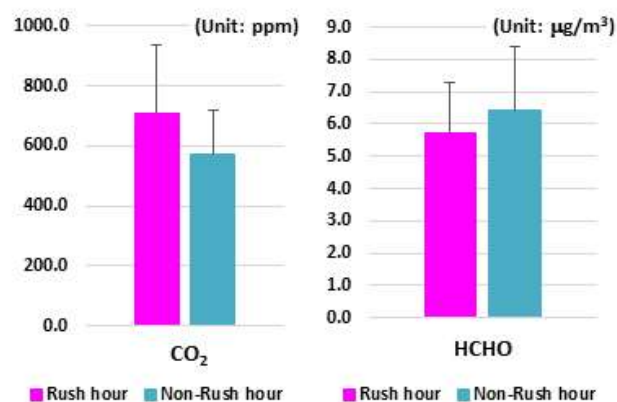


Fig. 10. Average concentration of CO₂ and HCHO by sampling hours.

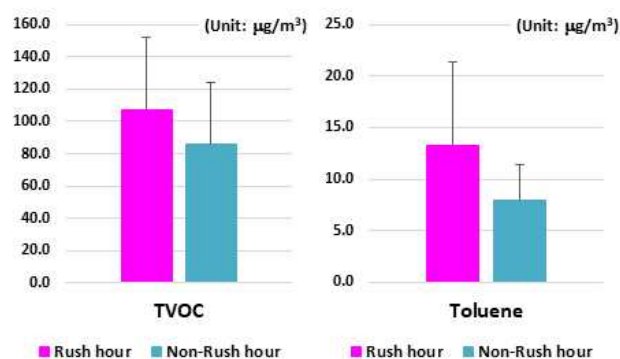


Fig. 11. Average concentration of TVOC and Toluene by sampling hours.

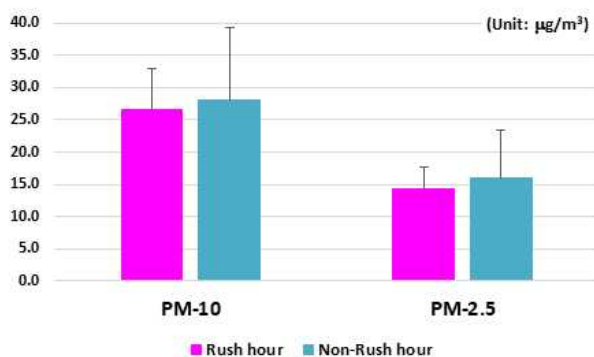


Fig. 9. Average concentration of PM-10 and PM-2.5 by sampling hours.

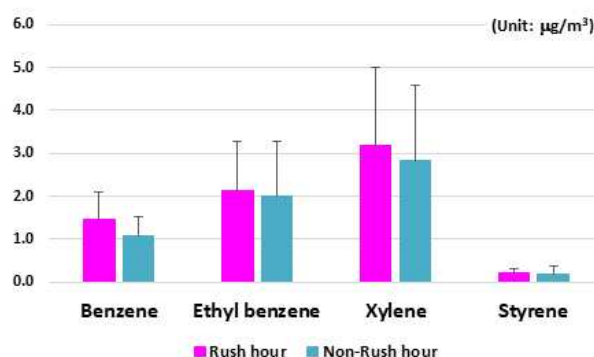


Fig. 12. Average concentration of VOCs (Benzene, Ethyl benzene, Xylene, Styrene) by sampling hours.

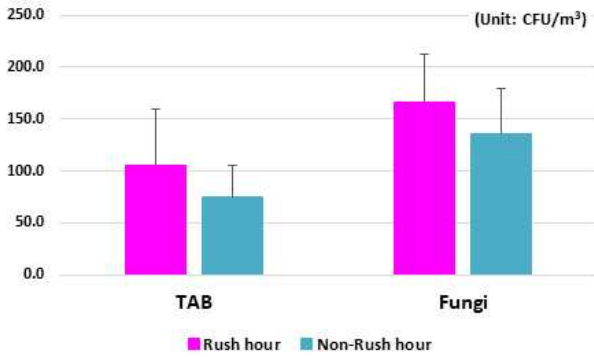


Fig. 13. Average concentration of TAB and Fungi by sampling hours.

4.2.3. 계절별 농도 특성 파악

계절별 유의한 농도 차이를 보이는 오염물질은 PM-2.5($p < 0.05$), 이산화탄소($p < 0.05$), 폼알데하이드($p < 0.01$), TVOC($p < 0.05$), 벤젠($p < 0.01$), 톨루엔($p < 0.01$), 에틸벤젠($p < 0.01$), 자일렌($p < 0.05$), 총부유세균($p < 0.01$)으로 조사되었다(Table 9).

폼알데하이드와 총부유세균 등을 포함한 오염물질 10종이 여름철에서 겨울철보다 높은 농도를 보였다(Table 9).

본 연구 겨울철 시료채취 기간의 외기 PM-10의 농도는 $29.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM-2.5는 $11.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 여름철 시료채취 기간의 외기 PM-10은 $38.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM-2.5는 $20.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 여름철의 외기 미세먼지 농도가 겨울철보다 높은 것으로 나타났다. 이로 인해 본 연구에서 조사된 대중교통시설의 미세먼지 농도는 외기 미세먼지 농도의 영향을 받아 여름철이 겨울철보다 높게 나타난 것으로 판단된다(Fig. 14).

폼알데하이드와 TVOC, VOCs, 총부유세균, 부유곰팡이는 온·습도 등 환경요인에 크게 영향을 받는 오염물질로 알려져 있다. 따라서 여름철에 더 높은 실내온도로 인해, 오염물질의 방출과 생성이 겨울철보다 활발하게 이루어져 여름철의 오염물질 농도가 겨울철보다 높게 나타난 것으로 판단된다(Fig. 15-18).

Table 9. Average concentration of indoor air pollutants by seasons.

	Winter	Summer
PM-10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	26.2	28.5
PM-2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	12.2*	18.1*
CO ₂ (ppm)	469*	732*
HCHO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	3.7**	8.4**
TVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	79.4*	113.3*
Benzene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1.7**	0.9**
Toluene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	4.6**	16.5**
Ethyl benzene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.9**	3.1**
Xylene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2.1*	3.9*
Styrene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.3	0.2
TAB (CFU/m ³)	55**	125**
Fungi (CFU/m ³)	143	159

※ p-value : ** < 0.01, * < 0.05, / numbers of data : 80

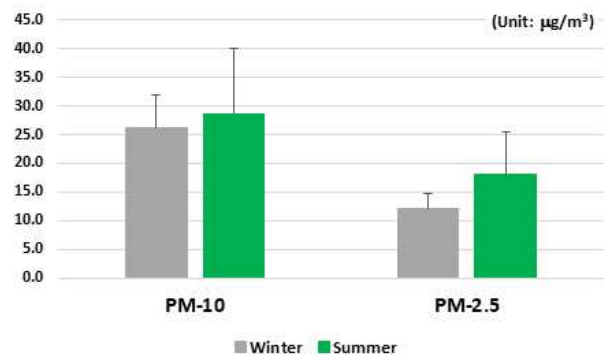


Fig. 14. Average concentration of PM-10 and PM-2.5 by seasons.

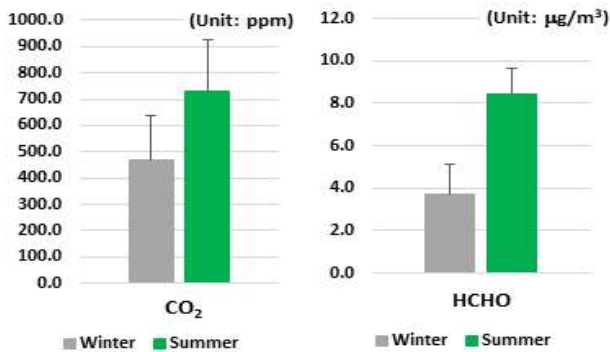


Fig. 15. Average concentration of CO₂ and HCHO by seasons.

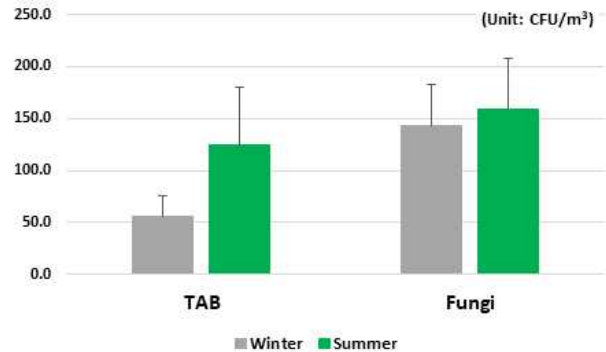


Fig. 18. Average concentration of TAB and Fungi by seasons.

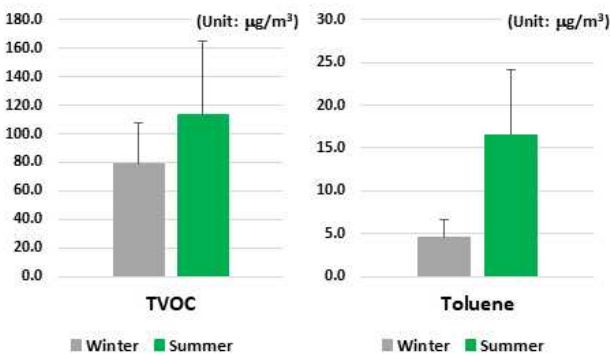


Fig. 16. Average concentration of TVOC and Toluene by seasons.

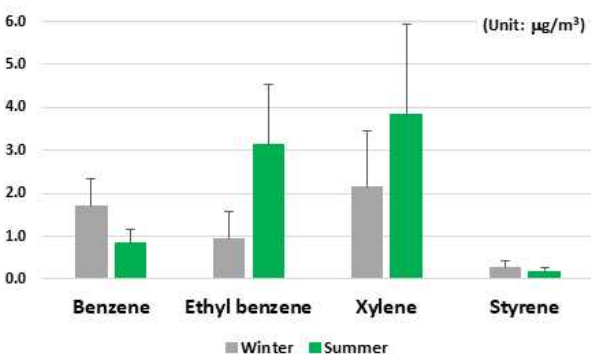


Fig. 17. Average concentration of VOCs (Benzene, Ethyl benzene, Xylene, Styrene) by seasons.

4.2.4 오염물질별 농도 특성 파악

(1) 미세먼지 (PM-10, PM2.5)

PM-10은 조사지점별, 시간대별, 계절별 유의한 농도차이가 없었고, PM-2.5는 계절별 유의한 농도차이를 보였다 (Table 7-9).

도시철도 시설 내 미세먼지 농도는 터널 내부 레일의 마찰 등으로 발생된 금속성 미세먼지 생성과 외부 대기로부터의 유입 등 복합적인 원인으로부터 영향을 받는다.

겨울철 낮은 외기 미세먼지 농도 (혼잡시간대 PM-10 27.4 µg/m³, PM-2.5 11.3 µg/m³, 비혼잡시간대 PM-10 30.8 µg/m³, PM-2.5 11.5 µg/m³)에서는 터널 내 높은 농도의 미세먼지가 차량객실로 유입되면서 차량객실의 미세먼지 농도가 승강장·대합실보다 높게 나타난 것으로 판단된다 (Fig. 19-20). 선행연구에서도 터널 내의 고농도 먼지가 전동차의 환기설비와 출입문 등을 통해 전동차 객실 내부에 유입되어 차량객실의 공기질에 영향을 미쳤다 (오미석 등, 2011; Park et al., 2004).

반대로 여름철 비혼잡시간대에 고농도 미세먼지 이벤트가 발생하여 (혼잡시간대 PM-10 32.1 µg/m³, PM-2.5 16.9 µg/m³, 비혼잡시간대 PM-10 48.2 µg/m³, PM-2.5 24.7 µg/m³), 외기 농도의 영향을 상대적으로 크게 받는 승강장·대합실이 차량객실보다 높은 농도를 보였다 (Fig. 19-20).

여름철 혼잡시간대와 비혼잡시간대의 미세먼지 농도 차이를 수치로 알아보기 위해 상대 표준편차(RSD, Relative Standard Deviation)를 조사한 결과, 승강장 71.4 %, 대합실 42.7 %로 높은 농도차이를 보였고, 차량객실은 9.9 %로 상대적으로 낮은 농도차이를 보였다. 위 결과를 종합하면, 고농도 미세먼지 이벤트 발생시 승강장과 대합실은 외기 미세먼지 농도에 크게 영향을 받고, 차량객실은 공기정화시스템 가동 등으로 인해 외기 미세먼지 농도의 영향을 적게 받는 것으로 판단된다.

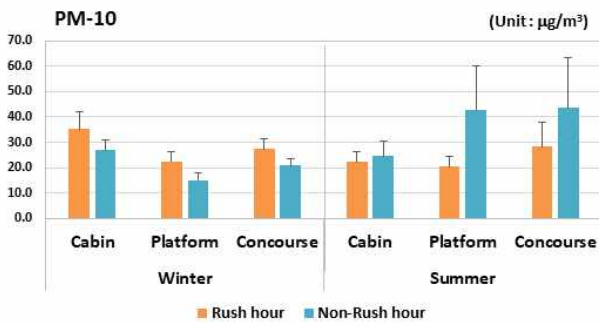


Fig. 19. Average concentration of PM-10 by sampling points and hours, seasons.

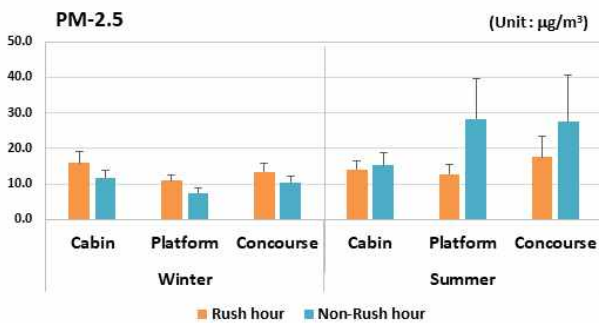


Fig. 20. Average concentration of PM-2.5 by sampling points and hours, seasons.

(2) 이산화탄소

이산화탄소는 조사지점별, 시간대별, 계절별 유의한 농도차이를 보였다(Table 7-9).

겨울철·여름철 조사 모두 차량객실이 승강장·대합실보다 1.9~2.7배 높은 농도를 보였

다(Fig. 21). 차량객실과 승강장·대합실 간 농도 차이 RSD는 80.0 % ~ 92.7 %로 높은 농도 차이를 보였고, 승강장과 대합실 간 RSD는 0.7 % ~ 4.4 %로 낮은 농도차이를 보였다. 혼잡시간대와 비혼잡시간대 간 RSD는 차량객실에서 20.5 % ~ 30.3 %로, 승강장(7.1 % ~ 7.6 %)·대합실 (2.1 % ~ 3.5 %) 보다 상대적으로 높은 농도 차이를 보였다.

위 결과를 바탕으로 이산화탄소의 농도 특성을 종합하면, 실내 이산화탄소의 주요 오염원은 사람의 호흡이기 때문에, 상대적으로 밀폐되어 있는 차량객실과 이용객이 많은 혼잡시간대에 높은 농도를 보이는 것으로 조사되었다(Fig. 21). 이와는 다르게 승강장·대합실은 상대적으로 외기의 유입이 원활하고 개방되어 있기 때문에 차량객실보다 이산화탄소의 농도가 낮고, 혼잡시간대와 비혼잡시간대의 이용객에 의한 농도차이가 미미한 것으로 조사되었다(Fig. 21).

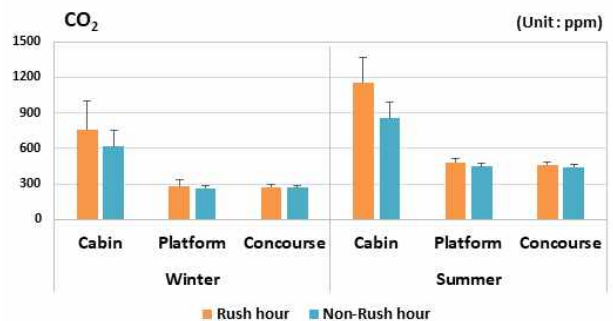


Fig. 21. Average concentration of CO₂ by sampling points and hours, seasons.

(3) 폼알데하이드

폼알데하이드는 계절별 유의한 농도차이를 보였다(Table 9).

폼알데하이드는 모든 조사지점에서 여름철이 겨울철보다 높은 농도를 보였다(Fig. 22). 이는 높은 온도에서 잘 휘발되는 휘발성유기화합물의 특성으로 인해 상대적으로 실내온도가 더 높은 여름철에서 높은 농도가 보인 것

으로 판단된다. 또한 겨울철에는 차량객실 난방으로 실내온도가 더 높은 차량객실에서 승강장·대합실보다 높은 농도를 보였다(Fig. 22). 반대로 여름철에는 차량객실 냉방으로 상대적으로 승강장·대합실보다 낮은 실내온도로 차량객실이 승강장·대합실보다 낮은 농도를 보였다(Fig. 22).

기존 연구에서 실내 환경에서의 폼알데하이드는 온도와 습도에 강한 의존성을 갖는 것으로 연구되었다(이윤규 등, 2003; 조현 등, 2006). 또한 공동주택 실내에서 폼알데하이드의 계절별 농도 변화를 살펴본 연구에서는, 온도와 습도가 높은 하절기의 폼알데하이드 농도가 동절기보다 높게 조사되었다(조완제 등, 2008). 본 연구에서도 폼알데하이드의 농도는 온도와 습도에 크게 의존하는 것으로 나타났다(Fig. 22), 폼알데하이드와 온도·습도 간의 상관계수는 0.630, 0.594로 높은 상관성을 보였다(Table 13).

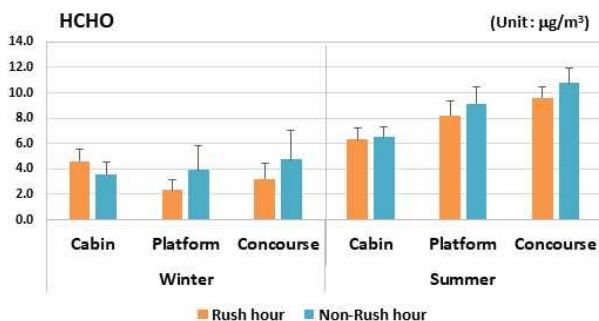


Fig. 22. Average concentration of HCHO by sampling points and hours, seasons.

(4) TVOC 및 VOC 5종(벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌)

TVOC는 조사지점별, 시간대별, 계절별 유의한 농도차이를 보였다(Table 7-9). 벤젠은 조사지점별, 계절별, 톨루엔은 시간대별, 계절별 유의한 농도차이를 보였고, 에틸벤젠과 자일렌은 계절별 유의미한 농도차이를 보였다(Table 7-9).

TVOC와 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌은 폼알데하이드와 마찬가지로 실내온도가 높은 여름철이 겨울철보다 높은 농도를 보였다(Fig. 23, 25-27). 벤젠은 겨울철이 여름철보다 더 높은 농도를 보였고, 스티렌은 계절에 따른 뚜렷한 농도 특성이 나타나지 않았다(Fig. 24, 28)

여름철 농도를 살펴보면, 차량객실보다 승강장·대합실에서 높은 농도를 보였던 폼알데하이드와는 반대로, TVOC와 벤젠, 톨루엔은 차량객실에서 승강장·대합실보다 높은 농도를 보였다(Fig. 22-25). 에틸벤젠과 자일렌은 차량객실보다 승강장·대합실에서 높은 농도를 보였다(Fig. 26-28).

또한 VOCs는 여름철에 모든 조사지점에서 혼잡시간대가 비혼잡시간대보다 높은 농도를 보인 반면(Fig. 23-28), 폼알데하이드는 혼잡시간대와 비혼잡시간대의 농도차이가 거의 없었다(Fig. 22). 이를 통해 폼알데하이드와 VOCs의 오염원이 서로 다르고, 농도 변화의 특성이 상이하다는 것을 알 수 있었다.

위 결과를 종합하면, VOCs의 경우 온도 변화가 거의 없음에도 불구하고 혼잡도에 따라 농도차이가 크게 나타난 것으로 보아 이용객의 의복, 향수, 스프레이 등의 영향을 받은 것으로 판단된다.(Fig. 23-28). 반면 폼알데하이드는 혼잡도 보다 온·습도의 변화에 따라 농도의 변화가 크게 나타나는 것으로 보아 승강장 및 대합실의 내장재에서 방출되는 오염물질의 영향이 큰 것으로 판단된다.(Fig. 22).

오염물질 간 상관분석 결과, TVOC는 온도(0.096), 습도(0.242), 폼알데하이드(0.163)와 낮은 상관관계를 보였고, 톨루엔(0.598), 에틸벤젠(0.457), 자일렌(0.525)과 높은 상관관계를 보이고 있어(Table 13), 이를 통해 VOCs와 폼알데하이드의 발생원은 서로 다르고, 두 오염물질 간 화학적 특성도 서로 상이한 것으로 판단된다.

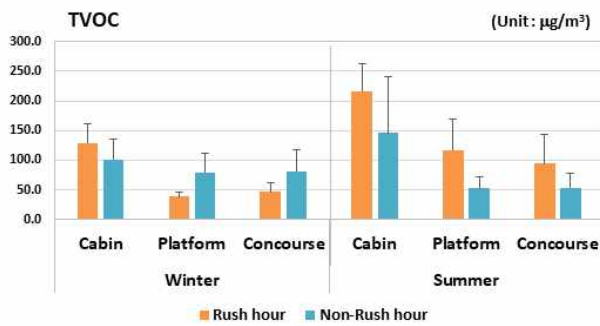


Fig. 23. Average concentration of TVOC by sampling points and hours, seasons.

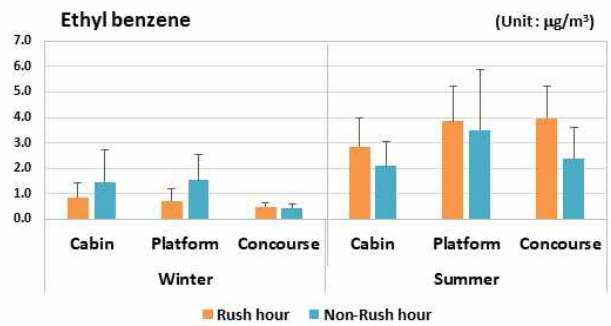


Fig. 26. Average concentration of Ethyl benzene by sampling points and hours, seasons.

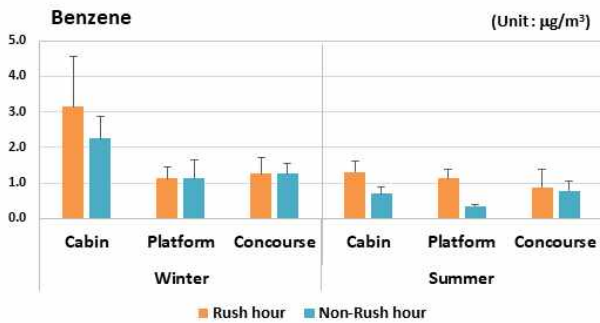


Fig. 24. Average concentration of Benzene by sampling points and hours, seasons.

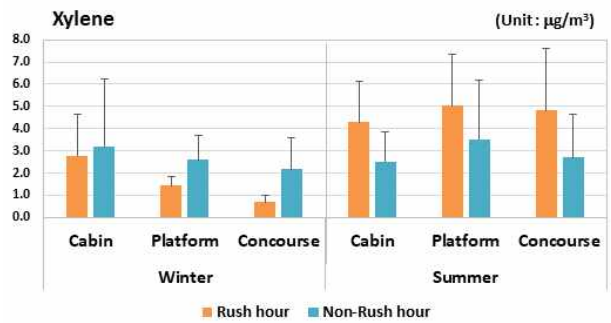


Fig. 27. Average concentration of Xylene by sampling points and hours, seasons.

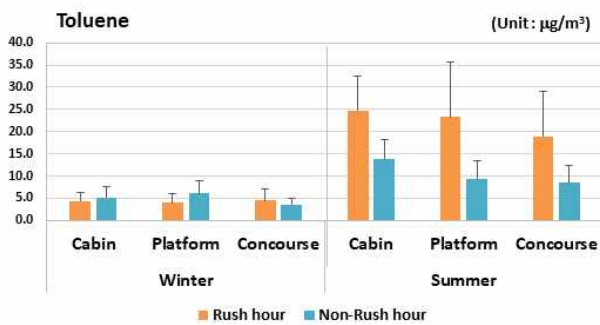


Fig. 25. Average concentration of Toluene by sampling points and hours, seasons.

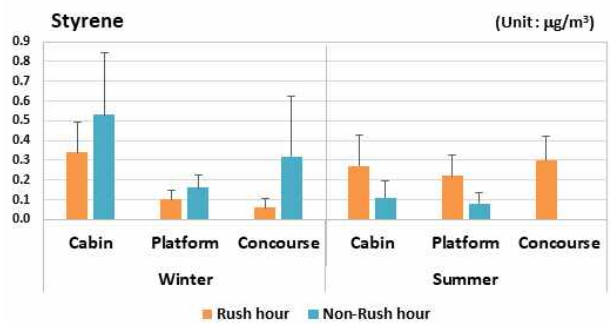


Fig. 28. Average concentration of Styrene by sampling points and hours, seasons.

(5) 총부유세균, 부유곰팡이

총부유세균은 계절적 유의한 농도차이를 보였고, 부유곰팡이는 조사지점별, 시간대별, 계절별 유의한 농도차이가 없었다(Table 7-9).

총부유세균은 여름철이 겨울철보다 높은 농도를 보였고, 겨울철 승강장을 제외한 모든 조사지점에서 혼잡시간대가 비혼잡시간대 보다 높은 농도를 보였다(Fig. 29). 미생물은 높은 온도 및 상대습도에서 번식이 왕성하게 일어나기 때문에(Ren et al., 2001), 여름철 총부유세균의 농도가 높게 나타난 것으로 판단된다. 총부유세균과 온도의 상관분석 결과, 상관계수 0.407로 높은 상관성을 보였다(Table 13). 계절에 따른 부유세균의 농도 변화를 연구한 선행연구에서도 실내 부유 세균의 농도는 온·습도가 높은 여름철이 겨울철보다 높은 농도를 보였다(Lee et al., 2006; 문현준 외, 2012). 또한 실내에서의 부유 미생물은 인체의 활동과 연관성이 있기 때문에, 이용객이 많은 혼잡시간대의 총부유세균 농도가 비혼잡시간대보다 높은 것으로 판단된다(Fig. 29).

반면 부유곰팡이는 뚜렷한 계절적 농도 차이는 보이지 않았지만, 시간대별 차이는 여름철 승강장을 제외한 모든 지점에서 총부유세균과 마찬가지로 이용객이 많은 혼잡시간대에서의 농도가 비혼잡시간대보다 높게 나타났다(Fig. 30).

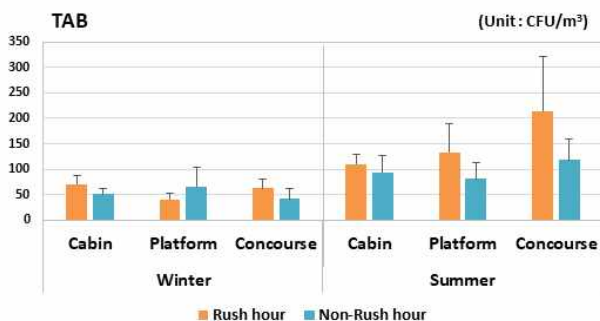


Fig. 29. Average concentration of TAB by sampling points and hours, seasons.

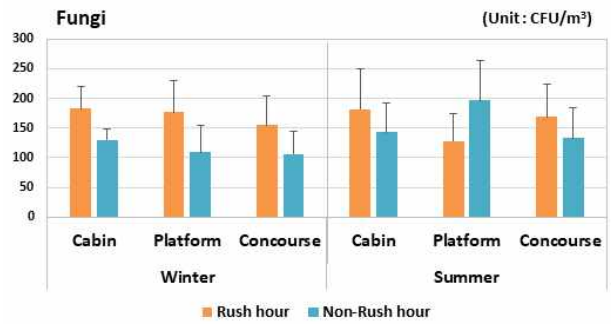


Fig. 30. Average concentration of Fungi by sampling points and hours, seasons.

4.3. 외기 미세먼지 농도에 따른 농도 특성 파악

외기 미세먼지 농도에 따른 대중교통시설 실내의 농도변화를 알아보기 위하여 자동대기 측정망에서 제공하는 미세먼지 농도를 이용하여 시계열 분석을 진행하였다(Fig. 31-35).

또한 외기 미세먼지 농도가 각 조사지점에 미치는 영향을 확인하기 위해 조사지점과 외기 미세먼지 농도 간의 상관분석을 진행하였다(Table 10-11).

4.3.1 조사지점별 미세먼지 시계열 분석

(Fig. 31-35)는 노선별 각 조사지점과 외기 미세먼지의 농도를 시계열 그래프로 나타낸 그림이다. 대부분 노선에서는 승강장과 대합실 간 미세먼지 농도 차이는 크게 없었고, 외부 대기와의 농도 변화와 비슷한 경향을 보였다(Fig. 31-35). 차량객실의 미세먼지 농도는 승강장·대합실과 비슷한 농도를 보이거나, 약간 높은 경향이 보였다(Fig. 31-35).

(Fig. 31)는 외기 미세먼지의 농도가 높아 질 때, 각 조사지점의 미세먼지농도의 변화를 보여 주고 있다. 여름철 외기의 미세먼지 농도가 높아 짐과 동시에 승강장과 대합실의 미세먼지 농도가 외기 미세먼지 농도의 수준으로 높아진 반면, 차량객실의 미세먼지 농도는 크게 상승하지 않았다(Fig. 31). 이 결과를 통해 승강장과 대합실의 실내공기질은 외기 농도에 의해 크게 영향을 받고, 차량객실은 환기시스템 가동 등으로 외기 농도에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

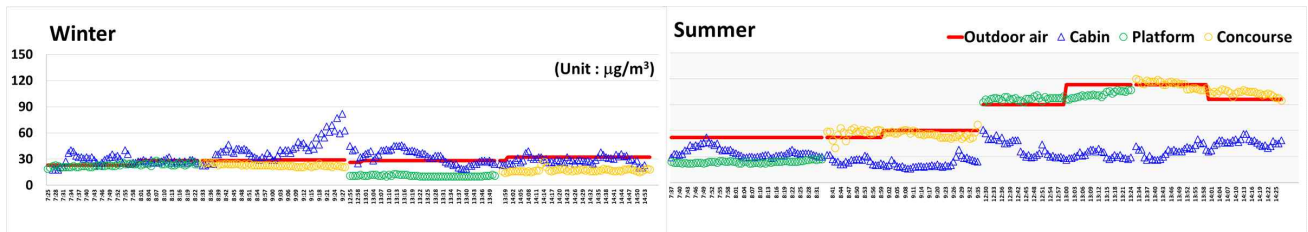


Fig. 31. Time series graph of PM-10 concentration of cabin, platform, concourse and outdoor air in A line.

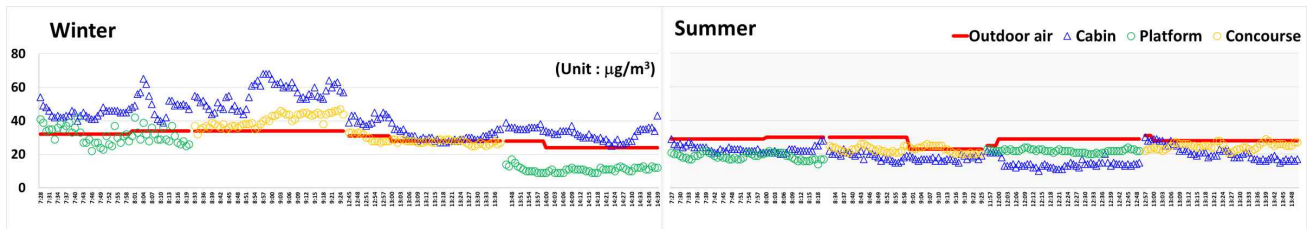


Fig. 32. Time series graph of PM-10 concentration of cabin, platform, concourse and outdoor air in B line.

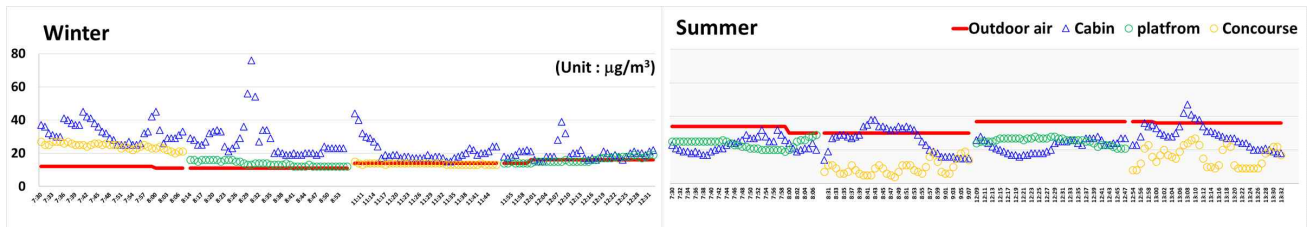


Fig. 33. Time series graph of PM-10 concentration of cabin, platform, concourse and outdoor air in C line.

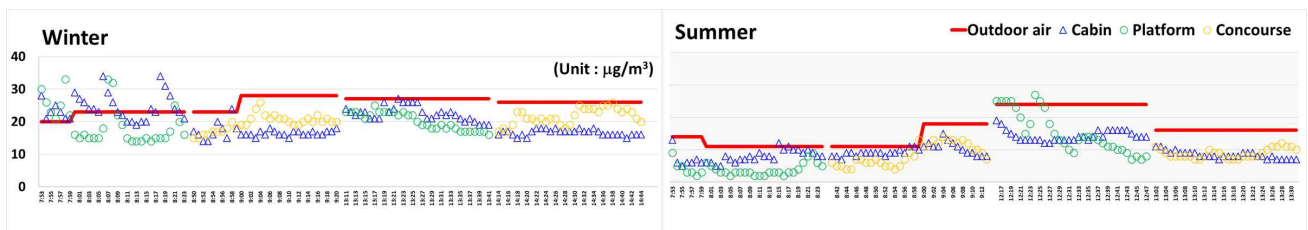


Fig. 34. Time series graph of PM-10 concentration of cabin, platform, concourse and outdoor air in D line.

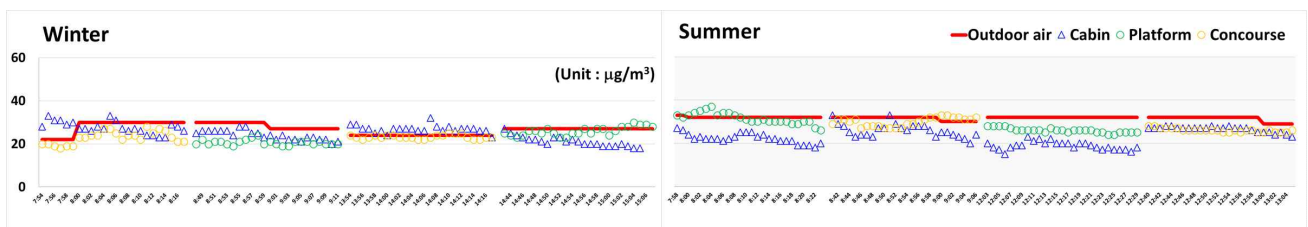


Fig. 35. Time series graph of PM-10 concentration of cabin, platform, concourse and outdoor air in E line.

4.3.2 외기 농도와 조사지점 간 상관분석

각 조사지점 미세먼지 농도와 대기 자동측정망으로부터 수집한 외기의 미세먼지 간 상관분석을 실시하였다(Table 10-11). PM-10의 외기 농도와 조사지점 농도 간 상관계수를 살펴보면, 차량객실과 0.297($p < 0.01$), 승강장과 0.901($p < 0.01$), 대합실과 0.912($p < 0.01$), 외기농도와 승강장·대합실은 높은 상관성을 보였고, 차량객실과는 낮은 상관성을 보였다(Table 10).

PM-2.5도 PM-10과 마찬가지로, 차량객실과는 0.597($p < 0.01$), 승강장과 0.885($p < 0.01$), 대합실과 0.915($p < 0.01$)로 외기 농도와 승강장·대합실 높은 상관관계를 보인 반면, 차량객실과는 낮은 상관성을 보였다(Table 11).

위 결과를 종합하면, 차량객실은 승강장과 대합실보다 상대적으로 밀폐되어 있고 자체 공기정화시스템 가동 등으로 인해 외기 미세먼지의 유입이 차단될 수 있고, 승강장과 대합실은 차량객실보다 상대적으로 외기가 직접적으로 유입될 수 있기 때문에 고농도 미세먼지 이벤트가 발생할 때 직접적으로 외기 농도에 영향을 받는 것으로 판단된다.

Table 10. Pearson correlation coefficient for PM-10 concentration of sapling points and outdoor air.

	Cabin	Platform	Concourse	Outdoor air
Cabin	1.000			
Platform	0.325**	1.000		
Concourse	0.391**	—	1.000	
Outdoor air	0.297**	0.901**	0.912**	1.000

* p-value : ** < 0.01, * < 0.05, / numbers of data : 1641.

Table 11. Pearson correlation coefficient for PM-2.5 concentration of sapling points and outdoor air.

	Cabin	Platform	Concourse	Outdoor air
Cabin	1.000			
Platform	0.484**	1.000		
Concourse	0.517**	—	1.000	
Outdoor air	0.597**	0.885**	0.915**	1.000

* p-value : ** < 0.01, * < 0.05, / numbers of data : 1641.

4.4. 국내외 대중교통차량 오염물질 저감 기술

국내외에서는 대중교통차량 객실 내 오염물질을 제거하고 쾌적한 실내 환경을 조성하기 위해 많은 기술이 개발되고 있다.

국내의 경우, A사에서 이중 정전필터와 이산화탄소 흡착제를 이용해 오염물질을 저감하는 지하철 객실 공기 정화장치를 개발하였고, P사에서는 광플라즈마 기술을 사용하여 높은 집진효율로 미세먼지를 제거하는 대기정화장치를 개발하여 상용화하고 있다. 또한 국토교통부에서는 터널 내 부유 미세먼지를 제거하는 전동차 부착형 미세먼지 제거장치와 초미세먼지 제거차량 시스템 개발 연구를 진행한 바 있다.

해외의 경우, 냉기 플라즈마 기술과 이온 및 오존 생성 등으로 미생물성 오염물질과 VOCs 등 다양한 오염물질을 제거하는 차량 내 공기질 개선장치가 개발되어 상용화되고 있다. H사에서는 주변 대기정보를 인식하여 다양한 종류의 필터를 상황에 맞게 선택적으로 사용하는 지능형 차량용 필터시스템을 개발하기도 하였다.

위 기술을 종합하여 볼 때, 다양한 실내 오염물질을 주변 환경에 맞게 선택적으로 제거하는 지능형 정화장치 설치와 터널 내 오염물질을 저감하는 노력을 동시에 진행하면 대중교통시설 실내 공기질 개선에 큰 효과를 볼 것으로 판단된다.

Table 12. Average concentration of pollutants by sampling points and hours, seasons and guideline of indoor air quality.

	Indoor air quality guideline	Winter						Summer					
		Rush hour			Non-Rush hour			Rush hour			Non-Rush hour		
		Cabin	Platform	Concourse	Cabin	Platform	Concourse	Cabin	Platform	Concourse	Cabin	Platform	Concourse
PM-10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	100 ⁴⁾	35.1	22.6	27.3	27.0	15.1	20.8	22.2	20.3	28.2	24.5	42.9	43.4
PM-2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	50 ¹⁾	15.9	11.0	13.5	11.8	7.4	10.4	14.0	12.8	17.6	15.2	28.3	27.6
CO ₂ (ppm)	2,500 ²⁾ 2,000 ³⁾	759	284	272	618	263	266	1,158	480	460	853	447	444
HCHO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	100 ⁴⁾	4.6	2.4	3.2	3.6	3.9	4.7	6.3	8.2	9.6	6.5	9.1	10.8
TVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	500 ⁵⁾	129.1	38.4	47.1	100.8	78.9	81.6	216.2	117.1	94.5	145.6	53.0	53.2
Benzene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	30 ⁶⁾	3.2	1.1	1.3	2.3	1.1	1.3	1.3	1.1	0.9	0.7	0.3	0.8
Toluene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1,000 ⁶⁾	4.3	4.0	4.5	5.2	6.0	3.6	24.7	23.3	19.0	13.9	9.4	8.5
Ethyl benzene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	360 ⁶⁾	0.9	0.7	0.5	1.5	1.5	0.5	2.9	3.8	4.0	2.1	3.5	2.4
Xylene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	700 ⁶⁾	2.8	1.4	0.7	3.2	2.6	2.2	4.3	5.0	4.8	2.5	3.5	2.7
Styrene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	300 ⁶⁾	0.3	0.1	0.1	0.5	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.1	0.1	0.0
TAB (CFU/ m^3)	800 ⁴⁾	70	41	62	51	66	42	110	133	214	93	81	118
Fungi (CFU/ m^3)	500 ⁵⁾	183	176	155	130	109	106	182	128	169	143	196	133

1) Guideline of Indoor air quality for public transportation.

2) Guideline of Indoor air quality for public transportation for rush hours.

3) Guideline of Indoor air quality for public transportation for Non-rush hours.

4) Regulation standard of indoor air quality for public spaces.

5) Guideline of indoor air quality for public spaces.

6) Guideline of indoor air quality for Newly-constructed apartment houses.

Table 13. Pearson correlation coefficient for indoor air pollutants.

	PM-10	PM-2.5	CO ₂	HCHO	TVOC	Benzene	Toluen	Ethyl benzene	Xylene	Styrene	TAB	Fungi	Temper ature	Humidity
PM-10	1.000													
PM-2.5	.963**	1.000												
CO ₂	.074	.050	1.000											
HCHO	.245**	.368**	.138	1.000										
TVOC	.051	.059	.460**	.147	1.000									
Benzene	.166	.022	.318**	-.050	.163	1.000								
Toluen	.142	.233*	.252*	.311**	.598**	-.025	1.000							
Ethyl benzene	.426**	.486**	.175	.382**	.457**	.025	.604**	1.000						
Xylene	.278*	.272*	.204	.203	.525**	.171	.546**	.858**	1.000					
Styrene	.032	-.041	.191	-.049	.267*	.432**	.152	.350**	.510**	1.000				
TAB	-.088	-.020	.100	.474**	.009	-.197	.073	.051	-.048	-.075	1.000			
Fungi	.312**	.294**	.112	.111	.031	.000	.024	.016	.037	-.024	.106	1.000		
Temper ature	.076	.236*	.272*	.630**	.096	-.196	.365**	.357**	.158	-.056	.407**	.027	1.000	
Humidity	.158	.335**	.353**	.594**	.242*	-.156	.441**	.500**	.262*	-.093	.262*	.083	.771**	1.000

※ p-value : ** < 0.01, * < 0.05, / numbers of data : 80.

V. 결론

본 연구는 대중교통시설 중 많은 시민이 이용하는 도시철도의 차량객실, 승강장, 대합실을 대상으로 실내공기 오염도를 조사하였고, 조사지점별 시간대별, 계절별 농도특성을 파악하였다. 본 연구를 통하여 대중교통시설의 맞춤형 실내공기질관리 방안을 제언하고, 정책자료를 위한 기초자료로 제공하고자 하였다.

본 연구 결과의 요약은 다음과 같다.

1. 본 연구에서 조사된 각 오염물질의 평균 농도는 실내공기질 관리법상 유지기준, 권고기준의 0.1 % ~ 52.5 % 수준이었다. 대중교통차량 실내공기질 권고기준으로 관리되는 오염물질인 PM-2.5는 권고기준의 27.0 % ~ 30.0 %, 이산화탄소는 38.5 % ~ 41.1 % 수준이었다.
2. 조사지점별 유의한 농도 차이를 보이는 오염물질은 이산화탄소, TVOC, 벤젠으로, 차량객실의 오염물질 농도가 승강장과 대합실보다 높았다. 상대적으로 밀폐되어 있는 차량객실의 구조적 특성 때문에, 이용객과 객실 내장재로부터 생성된 오염물질이 희석되지 못하고 누적되어 위 오염물질을 포함한 7종이 차량객실에서 높았다.
3. 시간대별 유의한 농도 차이를 보이는 오염물질은 이산화탄소, TVOC, 톨루엔으로, 혼잡시간대의 오염물질 농도가 비혼잡시간대보다 높았다. 위 오염물질의 오염원은 환경요인뿐만 아니라 인체 호흡이나 의복, 스프레이, 향수 등 이용객의 활동으로부터 발생되기 때문에 이용객이 많은 혼잡시간대에 높은 농도를 보였다.
4. 계절별 유의한 농도 차이를 보이는 오염물질은 PM-2.5, 이산화탄소, 폼알데하이드, TVOC, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 총부유세균으로, 벤젠을 제외한 8종의 오염물질이 여름철에 겨울철보다 높은 농도를 보였다. 폼알데하이드와, VOCs, 미생물성 오염물질은 온·습도 등 환경요인에 크게 영향을 받는 오염물질로, 실내 온도가 높아져 오염물질의 방출과 생성이 활발하게 이루어지는 여름철에 높은 농도를 보였다.
5. 승강장과 대합실의 실내 미세먼지 농도는 외기 농도에 크게 영향을 받고, 차량객실은 환기시스템 가동 등으로 인해 외기 농도의 영향이 적은 것으로 조사되었다. 이산화탄소는 차량객실 내 이용객 수에 따라 크게 영향을 받고, 총부유세균은 실내 온도 변화의 영향이 큰 것으로 조사되었다. 폼알데하이드는 실내 온·습도와 높은 상관성을 보이는 것으로 보아, 내장재로부터 방출이 주요오염원으로 판단된다. VOCs의 주요 영향요인은 실내 온도뿐만 아니라, 시간대에 따른 농도 변화가 큰 것으로 보아 이용객의 수도 주요 영향요인으로 판단된다.

VI. 참고문헌

1. 공성용, 이희선, (2004), 실내공기질 관리 제도 발전방안에 관한 연구, 한국환경정책·평가연구원.
2. 국립환경과학원, (2014), 실내공기 오염원 관리기반 개선연구(Ⅱ)-대중교통수단 내 장재 방출 오염물질 특성 연구.
3. 국토교통부, (2019), 나노기술을 적용한 지하공간 오염물질 제거기술 개발.
4. 김운신, (2010), 실내환경과학특론, 신평출판사.
5. 김진용, (2014), 실내공기 오염으로 인한 건강영향, 한국환경산업기술원.
6. 한국환경산업기술원, (2019), 대중교통차량 미세먼지 저감장치 성능평가 기준 검토.
7. 대한산업보건협회, (2005), 실내 공기 관리.
8. 서울특별시, (2014), 실내공기질 관리 매뉴얼.
9. 서울기술연구원, (2020), 서울시 시내버스 공기청정시스템 효과검증 및 관리방안
10. 최현진, (2020), 실내공기질의 관리 및 개선을 위한 제도의 변천과 고찰, 공업화학 전망.
11. 환경부, (2015), 대중교통차량 실내공기질 실태조사 및 측정방법 개선 연구Ⅱ.
12. 환경부, 제4차 실내공기질 관리 기본계획.
13. Cho, H., Choi, J. M., Kim, W. J., (2006), Assessment of Indoor Volatile Organic Compounds (VOCs) and Emission Characteristics by Humidity Variation in New Apartments, Journal of The Korean Society of Living Environmental System, 13(4), 283-289.
14. EPA, (2008), Report on the Environment
15. Jo, W. J., Sohn, J. Y., (2008), An Investigation of Indoor Air Pollution Levels in New Apartments and Assessment of Seasonal Emission Characteristics, Journal of the Architectural Institute of Korea, 27(7), 231-238.
16. Jung, H. J., Kim, B. W., Ryu, J. Y., Maskey, S., Kim, J. C., Sohn, J. R., Ro, C. U., (2010), Source identification of particulate matter collected at underground subway stations in Seoul, Korea using quantitative single-particle analysis, Atmospheric
17. Kim, J. B., Lee, S. B., Woo, S. H., Kim, C. H., Lee, S. Y., Lee, J. I., Bae, G. N., (2020), Diurnal variation of PM10 concentration in the subway concourse and tunnel, Journal of Odor and Indoor Environment, 19(3), 1-10.
18. Kim, M. K., (2016), Seasonal Distributions of Total Airborne Bacteria in Indoor Air in University Facilities, Journal of Korea Society of Environmental Administration, 22(1), 1-8.
19. Lee, C. R., Kim, K. Y., Kim, C. N., Park, D. U., Roh, J. H., (2005), Investigation on Concentrations and Correlations of Airborne Microbes and Environmental Factors in the General Hospital, Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene, 15(1), 45-51
20. Lee, J. H., Jo, W. K., (2006), Characteristics of indoor and outdoor bioaerosols at Korean high-rise apartment buildings, Environmental Research, 101(1), 11-17.
21. Lee, K. B., Kim, J. S., Bae, S. J., Kim, S. D., (2014), Research Study on Indoor Air Quality (IAQ) inside of the Subway Cabin in Seoul Metropolitan City, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 30(2), 175-187.
22. Lee, Y. G., Han, K. W., (2003), A Study on the Analysis of Characteristic of Formaldehyde Concentration in Apartment Houses, Journal of the Architectural Institute of Korea, 19(10), 153-160.

23. Lehtonen, M., Reponen, T., Nevalainen, A., (1993), Everyday activities and variation of fungal spore concentrations in indoor air, *International Biodeterioration & Biodegradation*, 31(1), 25–39.
24. Moon, H. J., An, K. A., Choi, M. S., (2012), The Status and Causes of Indoor Airborne Micro-organisms Activities in Residential Buildings, *Journal of The Korean Society of Living Environmental System*, 19(6), 669–675.
25. Oh, M. S., Park, D. S., & Park, E. Y. (2011), A Study for Characteristics of PM 10 in the Subway Passenger Cabins. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 27(5), 523–533.
26. Park, D. S., Cho, Y. M., Lee, C. K., Park, B. H. (2004). Study on the air quality of railway tunnel. In *Proceeding of the 38th Meeting of KOSAE*, 363–364. *Korean Industrial Chemistry News*, 23(4), 13–19.
27. Park, M. J., Choi, J. S., Park, B. H., (2020), Technology Trends of Indoor Air quality for Public transportation,
28. Ren, P., Jankun, T. M., Belanger, K., Bracken, M. B., Leaderer, B. P., (2001), The relation between fungal propagules in indoor air and home characteristics, *Allergy*, 56(5), 419–424.
29. Sim, S. H., Kim, Y. S., (2006), Characterization and Assessment of Indoor Air Quality in Newly Constructed Apartments –Volatile organic compounds and formaldehyde, *Journal of Environmental Health Sciences*, 32(4), 275–281.