



IoT 기반 시내버스 실내공기질 노출 특성

김호현*

평택대학교 ICT융합학부 ICT환경융합전공

Exposure Characteristics of Indoor Air Pollutants in Some Local Pubic Buses

Ho-Hyun Kim*

Department of Information, Communication and Technology Convergence, ICT Environment Convergence, Pyeongtaek University

ABSTRACT

Background: Air pollution is increasing together with industrialization and urbanization. In order to reduce air pollution, public transportation is recommended rather than private cars, and the number of passengers using public transportation is increasing accordingly. This study observes the concentration of indoor pollutants in city buses over time. Through this means, we intend to suggest a plan to manage the indoor air quality in city buses.

Objectives: The concentration of indoor pollution in public transportation was investigated from April 2021 to January 2022. Based on this, we evaluated the exposure to indoor pollutants.

Methods: Six city bus lines in an industrial city were selected for the research, and indoor pollution was measured through IoT (Internet of Things)-based sensor-type measuring devices. The concentration of pollutants was measured every minute, and statistical data were constructed based on the measurement results.

Results: In all the city buses studied, the average concentration of pollutants were below the guidelines. However, some measurement results showed cases of exceeding the guidelines. As a result of the analysis by time zone, there were more cases in which pollutants exceeded the standard value during rush hour compared to at other times. A risk assessment for PM₁₀ was performed by evaluating the excess mortality risk from exposure and the risk from inhalation exposure.

Conclusions: All measured indoor pollutants in the city buses did not exceed the guidelines. Also, the risk assessment results were found to be within the level of safety. However, if a city bus is used for a long time, there is a possibility that there may be an impact on the human body due to inhalation exposure, so additional management is required.

Key words: City bus, indoor air quality, industrial complex, public transportation

Received January 28, 2022

Revised February 14, 2022

Accepted February 17, 2022

Highlights:

- Indoor air quality (IAQ) in public transportation is increasingly important. Six lines of city bus in Dangjin, Chungcheongnamdo were recruited to measure IAQ using IoT-based device. Most samples did not exceed the guideline, but further studies are required.

*Corresponding author:

Department of Information, Communication and Technology Convergence, ICT Environment Convergence, Pyeongtaek University, 3825 Seodong-daero, Pyeongtaek 17869, Republic of Korea
Tel: +82-31-659-8308
Fax: +82-31-685-8885
E-mail: ho4sh@ptu.ac.kr

1. 서 론

현대 사회에서 산업화 및 도시화가 진행되면서 녹지가 점차 감소하였으며, 화석연료 사용의 증가로 대기오염이 점차 심해

지고 있다. 대기오염도 저감을 위한 정책 중 하나로 자동차에서 발생하는 배출가스를 줄이고 있으며, 이를 위해 대중교통 이용을 권장하고 있다. 이에 따라 대중교통을 이용하는 승객도 증가하고 있다.¹⁾ 환경부는 대중교통을 이용하는 사람들의 건강을



위해 실내공기질 관리법을 통해 대중교통수단 중 도시철도, 시외버스, 고속철도차량을 다중이용시설로 지정하여 관리하고 있다. 실내공기질 관리법상 다중이용시설 미세먼지(PM₁₀), 초미세먼지(PM_{2.5}), 이산화탄소(CO₂) 등의 오염원에 대한 기준을 마련하였으며, 대중교통차량의 경우 초미세먼지와 이산화탄소에 대해 권고기준을 마련하여 관리하고 있다. 미세먼지의 경우 실내공간에서 이용자의 호흡을 통해 체내로 유입되며, 체내 유입된 미세먼지는 장기 노출 시 인체 조직, 심혈관, 호흡기관 등에 각종 질환을 유발하며,²⁾ 2013년 1군 발암물질로 규정되었다.³⁾ 특히 취약계층의 경우 단기노출만으로도 심혈관계 및 호흡계 등에 영향을 받을 수 있다.⁴⁾ 이산화탄소는 실내공간에서 농도 1,000 ppm 이상이면 인체에 어지러움, 피로감을 느끼게 하고, 농도 1,500 ppm 이상에서는 목구멍 자극, 코 염증, 졸음 등을 유발한다.⁵⁾ 이에 따라 World Health Organization (WHO)에서는 미세먼지, 이산화탄소 등 실내공기질과 관련한 물질에 대해 가이드라인을 제공하고 있다.⁶⁾ 국내의 경우 환경부에서 대중교통차량의 공기질 관리를 위해 계절별로 적정 온·습도를 유지하도록 권장하고, 차량 내 냉·난방 및 환기 필터를 주기적으로 청소 및 교체하도록 권장하고 있다.⁷⁾

현대인은 생활 특성상 실내에 머무르는 시간이 많으며,⁸⁾ 대중교통을 이용하는 것도 실내공간에 있는 것과 같다. 2019년 국토교통부 조사에 따르면 수도권에서 대중교통을 이용하여 출근하는 경우에 약 1시간 27분을 대중교통에서 머무르게 된다고 조사되었다.⁹⁾ 또한, 대중교통수송분담률은 2008년 기준 42.2%, 2019년 기준 43.5%로 상당량 차지하고 있으며,¹⁰⁾ 서울특별시의 경우 일일 이용객이 2019년에는 약 1,040만명, 2020년에는 약 770만명으로 대중교통을 이용하는 승객이 많은 것으로 나타났다.¹¹⁾

대중교통수단 중 시내버스의 경우 주로 유동인구가 많고, 교통량이 많은 지역을 위주로 운행하며, 대중교통을 이용하는 승객은 교통체증이 심한 출·퇴근 시간에 주로 이용하기 때문에 교통체증으로 인한 자동차 배기가스의 차량 내 유입으로 인한 차량 내 공기질이 우려되는 실정이다.¹²⁾ 또한, 국내 운행되는 버스 50,444대 중 시내버스는 35,297대, 시외 및 고속버스는 7,661대로 운행되는 시내버스가 더 많음에도 불구하고,¹³⁾ 『실

내공기질 관리법』상 관리되고 있는 대중교통은 도시철도, 시외 및 고속버스이며, 시내버스는 관리대상에서 제외되어 있다. 본 연구를 통해 시내버스에 IoT (Internet of Things) 센서형 실내공기질 측정기기를 설치하여 장기간의 데이터 수집 및 분석하고자 한다. IoT 센서는 실내공기질 실시간 모니터링이 가능하며, 이를 통한 장기간의 데이터 수집에 적합하다.¹⁴⁾ IoT 센서를 통해 실내오염물질 중 PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂, 온도, 습도를 측정하고, 장기간의 데이터 수집을 통해 시간대별 월별 농도를 파악한다. 이를 기반으로 위해성평가를 수행하여 시간대별, 월별, 노선별 시내버스 이용특성에 따른 위해성을 분석한다. 본 연구에서는 산업도시를 운행하는 시내버스의 공기질 분석을 진행하고, 추후 대도시, 농공지역을 운행하는 시내버스의 실내공기질 데이터를 확보하여 종합 분석을 진행하려 한다. 이를 통해 시내버스 이용특성별 노출 정도를 분석하고, 이용특성에 따른 노출 관리방안을 제시하여 시내버스의 실내공기질 관리 강화를 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

II. 연구 방법

1. 연구 대상 및 기간

연구대상 지역은 산업단지과 주거밀집지역이 구분되는 당진시로 선정하였고, 해당 지역을 운행하는 시내버스 6대를 섭외하여 진행하였다(Table 1). 시내버스 내 센서형 측정기기를 설치하여 버스 운행 상황에서의 데이터를 수집하였으며, 2021년 4월부터 2022년 1월까지 약 10개월간의 실내공기질 데이터를 1분 단위로 수집하였다.

2. 실험방법

2.1. 측정물질선정

『실내공기질 관리법』상 다중이용시설 실내공기질 유지 및 관리기준물질 중 센서로 측정 가능한 물질인 PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂를 측정하였고, 추가적으로 쾌적성과 관련된 온도, 습도를 추가하여 총 5개 항목을 대상으로 모니터링하였다.

Table 1. Bus and route information

Bus	Bus route	Notes
A	Hanjin Substation ↔ Dangjin Health Center	Running in an industrial complex
B	Hapdeok Bus Terminal ↔ Dangjin Health Center	
C	Dangjin Hillstate APT ↔ Haengjeong-ri Parking Lot	Village bus
D	Seongmun Embankment ↔ Dangjin Health Center	Electric bus
E	Sapgyocheon Intercity Bus Terminal ↔ Dangjin Health Center	Running in an industrial complex
F	Dangjin Bus Terminal ↔ Handa-ri	Low-floor bus

2.2. 측정기기

측정기기가 버스 운행에 영향을 주지 않고, 이용객에게 불편을 주지 않는 위치로 시내버스 운전석 대시보드에 설치하였다. 선정된 시내버스 6대에 IoT 센서형 측정기기를 설치하였으며, 센서를 통해 PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂, 온도, 습도를 측정하였다. 본 연구에 사용된 센서형 측정기기는 환경부 1등급 인증을 받은 장비이며, 상세사항은 Table 2와 같다.

3. 노출량 및 위해성 평가 방법

인체 위해성 평가는 국립환경과학원 행정규칙 『실내공기 중 오염물질의 위해성평가를 위한 절차와 방법 등에 관한 지침』에 따라 평가하였다. 오염농도, 호흡률, 체중, 노출 빈도, 노출 기간 등을 고려하여 일일평균노출량(average daily dose, ADD)을 계산한다. 여기에 기대수명을 고려하여 식 (1)과 같이 평생 평균일일노출량(Lifetime average daily dose, LADD)을 계산한다. 미세먼지는 발암물질로 규정되어 있어 식 (2)와 같이 위해도를 계산하여야 한다. 미세먼지의 경우 용량-반응 평가를 통한 발암위해도에 대한 자료가 없어 PM₁₀의 단위사망률 기여도인 0.39%를 발암위해도값에 적용하여 PM₁₀ 노출로 인한 초과사망률을 평가하였다.¹⁵⁾ 추가적으로 국립환경과학원 행정규칙 『실내공기 중 오염물질의 위해성평가를 위한 절차와 방법 등에 관한 지침』의 PM₁₀의 흡입노출참고농도(Reference

concentration, RfC) 100 µg/m³을 적용하여 식 (3)을 통해 비발암성 물질에 대한 독성위험값(Hazard quotient, HQ)을 계산하여 두 평가를 비교하였다.

$$LADD (mg/kg/day) = C_{IA} \times \frac{IR_{kj} \times ET_{kj} \times EF_{kj} \times ED_{kj}}{BW_i \times AT} \quad (1)$$

LADD: Lifetime average daily dose (mg/kg/day)

CI_A: Concentration of PM₁₀ in indoor air at public transport (mg/m³)

IR_{kj}: Inhalation rate for scenario, k and public transport, j (m³/day)

ET_{kj}: Exposure time for scenario, k and public transport, j (hrs/day)

EF_{kj}: Exposure frequency for scenario, k and public transport, j (days/yr)

ED_{kj}: Exposure durations for scenario, k and public transport, j (yrs)

BW_i: Body weight at age, i (kg)

AT: Averaging time for lifetime (days)

$$ECR = LADD (mg/kg/day) \times Stop\ factor (mg/kg/day)^{-1} \quad (2)$$

$$HQ = \frac{LADD (mg/kg/day)}{RfC (mg/m^3)} \quad (3)$$

본 연구에 사용된 노출계수를 Table 3에 나타내었다. 일평균 호흡률, 몸무게, 평균수명은 국립환경과학원의 ‘한국인의 노출계수 핸드북’의 권고치를 적용하였다.¹⁶⁾ 노출 빈도의 경우 일평균 버스 이용시간인 1시간을 적용하였으며, 노출 빈도는 국토교통부의 대중교통 현황조사에서 1주간 버스 이용횟수 5.37회를 1년간 이용횟수로 환산하여 적용하였다.¹⁷⁾ 노출 기간은 설문을 통해 대중교통을 이용하는 연령대를 적용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 실내오염물질 측정결과

시내버스의 미세먼지를 측정된 결과를 Table 4에 나타내었다. 데이터는 1분 단위로 측정된 모든 시내버스의 PM₁₀ 평균 농도는 42 µg/m³으로 2019년 『실내공기질 관리법』상 대중교통

Table 2. Detailed specifications of indoor air quality measurement equipments

Compose	Type	Detection ranges
PM ₁₀	Light scattering	LOD~1,000 µg/m ³
PM _{2.5}	Light scattering	LOD~1,000 µg/m ³
CO ₂	NIDR	0~5,000 ppm
Temperature	BandGap	-40~120°C
Humidity	Capacitive	0~100%RH
Power	12 V/1 A	12 V/1 A

*PM₁₀, PM_{2.5} LOD=1 µg/m³.

Table 3. Exposure factors for users of public transportation

Exposure factors	
Inhalation rate (m ³ /day) ^a	14.6
Exposure time (hr/day) ^b	1
Exposure frequency (day/yr) ^c	280
Exposure duration (yr) ^d	60
Body weight (kg) ^e	64.5
Average life span (yr) ^f	82.7

a, e, f: NIER, Korean Exposure Factors Handbook 2019.

b, c: Public transportation status survey 2020.

d: Value adopted from questionnaire Survey.

Table 4. Level of PM₁₀ in the test buses (µg/m³)

Bus line	Mean±SD	Min	Median	Max
All	42±51	1	25	417
A	42±41	2	29	379
B	38±39	1	25	392
C	32±35	2	21	372
D	33±30	1	22	245
E	61±76	2	30	417
F	39±40	1	25	357

*PM₁₀ Guideline of indoor air quality in public transportation (2019)=200 µg/m³.

차량(도시철도, 시외버스, 고속버스)의 권고기준인 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비해 절반 이하의 낮은 농도로 나타났다. 노선별 PM_{10} 평균 농도는 A 버스는 $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$, B 버스는 $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$, C 버스는 $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$, D 버스는 $33 \mu\text{g}/\text{m}^3$, E 버스는 $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$, F 버스는 $39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 노선 내 산업단지가 있는 E 버스가 가장 높게 나타났고, 주거지역을 운행하는 마을버스인 C 버스가 가장 낮게 나타났다.

$\text{PM}_{2.5}$ 의 측정결과는 Table 5와 같다. 측정된 모든 시내버스의 $\text{PM}_{2.5}$ 평균 농도는 $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 『실내공기질 관리법』상 대중교통차량 권고기준인 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 절반 수준으로 나타났다. 버스별 $\text{PM}_{2.5}$ 평균농도는 A 버스는 $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$, B 버스는 $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$, C 버스는 $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, D 버스는 $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$, E 버스는 $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$, F 버스는 $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. PM_{10} 의 측정결과와 같이 노선 내 산업단지가 있는 E 버스가 가장 높게 나타났고, 주거지역을 운행하는 마을버스인 C 버스가 가장 낮게 나타났다.

CO_2 의 측정결과는 Table 6과 같다. 측정된 모든 시내버스의 CO_2 평균농도는 1,182 ppm으로 『실내공기질 관리법』상 대중교통차량 권고기준인 2,000 ppm의 절반 수준으로 나타났다. 버스별 CO_2 평균 농도는 A 버스는 504 ppm, B 버스는 529 ppm, C 버스는 1,060 ppm, D 버스는 1,595 ppm, E 버스는 1,862 ppm, F 버스는 1,535 ppm으로 나타났다. PM_{10} 의 측정

Table 5. Level of $\text{PM}_{2.5}$ in the test buses ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Bus line	Mean±SD	Min	Median	Max
All	23±29	1	13	271
A	22±23	2	15	226
B	21±22	1	13	250
C	17±19	2	11	222
D	18±16	1	12	135
E	34±44	2	16	271
F	21±22	1	13	213

* $\text{PM}_{2.5}$ Guideline of indoor air quality in public transportation= $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Table 6. Level of CO_2 in the test buses (ppm)

Bus line	Mean±SD	Min	Median	Max
All	1,182±724	8	1,126	5,001
A	504±350	118	399	4,032
B	529±346	8	441	5,001
C	1,060±422	404	939	5,001
D	1,595±653	559	1,818	4,283
E	1,862±704	852	1,646	5,001
F	1,535±480	816	1,424	5,001

* CO_2 Guideline of indoor air quality in public transportation=2,000 ppm (at non-rush hour).

결과와 같이 노선 내 산업단지가 있는 E 버스가 가장 높게 나타났고, 주거지역을 운행하는 마을버스인 C 버스가 가장 낮게 나타났다. CO_2 의 농도가 높게 나타난 버스에서 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도 또한 높게 나타난 것으로 보아 차량 내의 승객의 CO_2 농도 상승의 주요 원인인 차량 내 승객의 혼잡도로 인하여 PM_{10} 와 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도 또한 높은 경향을 보인 것으로 판단된다. 하지만 선행연구사례를 보면 국내 $\text{PM}_{2.5}$ 의 생성요인으로 산업단지 운영으로 배출되는 NO_x 와 SO_x 의 영향이 매우 크며,¹⁸⁾ 산업단지 지역 및 인근 지역까지 영향을 주는 것으로 나타났다.¹⁹⁾ 연구대상 지역의 산업단지의 경우 정유공장과 같은 대규모 석유화학 관련 산업체가 위치하여²⁰⁾ 대기오염물질의 농도가 높게 관측되고 있다.²¹⁾ 본 연구에서 산업단지를 운행하는 시내버스의 실내 오염물질이 높게 나타나 산업단지에서 발생하는 오염물질이 산업단지 부근을 운행하는 시내버스의 실내공기질에 영향을 미쳤을 가능성도 있어 이에 대한 추가적인 조사가 필요해 보인다.

2. 시간대별 미세먼지 기준초과사례 분석 결과

오염물질별로 기준치를 초과한 사례는 PM_{10} 의 경우 약 2.4%, $\text{PM}_{2.5}$ 의 경우 약 10.2%, CO_2 의 경우 11.9%로 나타났다 (Table 7). PM_{10} 의 기준초과사례가 다른 오염물질에 비해 현저하게 낮게 나타났다. 현재 『실내공기질 관리법』상 대중교통차량의 미세먼지 관리기준은 $\text{PM}_{2.5}$ 를 기준으로 하며, 기준치는 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. 이는 일반 다중이용시설 유지기준과 같다. 하지만 법 개정 이전 2019년에는 미세먼지의 기준이 PM_{10} 이었으며, 기준치는 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 일반 다중이용시설 유지기준인 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비해 기준치가 높다. PM_{10} 의 기준치를 일반 다중이용시설의 유지기준인 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 맞추어 분석해 보면 전체 데이터의 8.3%가 기준초과사례로 나타나 다른 오염물질과 유사한 농도초과비율을 보인다.

미세먼지의 기준초과사례를 시간대별 비중을 분석한 결과, 전체 시내버스의 PM_{10} 기준초과사례 데이터를 보았을 때 8~12시, 16~19시의 시간대가 기준초과사례의 비중이 각각 높은 것으로 나타났다(Table 8). $\text{PM}_{2.5}$ 의 경우 기준초과사례 데이터를 보았을 때 8~10시, 17~19시의 시간대가 기준초과사례의 비중이 높은 것으로 PM_{10} 의 분석 결과와 유사하게 나타났다(Table 9). 기준초과사례 비중이 8시, 17시에 급증하고, 10시, 19시 이후에 급감하는 것으로 나타났다. 『실내공기질 관리법』에서는 대중교통차량의 이용객이 많은 혼잡시간대를 7시 30분부터 9

Table 7. Percentage of excess case of indoor pollutants concentration

Indoor pollutant	Percentage of excess case	Guideline
PM_{10}	2.4%	$200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (2019)
$\text{PM}_{2.5}$	10.2%	$50 \mu\text{g}/\text{m}^3$
CO_2	11.9%	2,000 ppm (at non-rush hour)

Table 8. Rate of excess case of PM₁₀ concentration by every hour (%)

Time	Bus line						
	A	B	C	D	E	F	All
6:00~6:59	0.2	0.3	0.8	N/C	1.1	N/C	0.9
7:00~7:59	4.2	0.9	2.9	N/C	6.6	3.1	5.6
8:00~8:59	1.6	6.8	2.6	N/C	7.8	5.4	7.0
9:00~9:59	1.2	5.0	2.7	N/C	8.7	3.2	7.4
10:00~10:59	8.6	5.4	1.3	N/C	10.0	3.6	8.8
11:00~11:59	6.8	7.6	1.3	N/C	6.9	7.7	6.6
12:00~12:59	8.0	13.4	1.5	N/C	8.0	13.7	8.4
13:00~13:59	6.9	5.9	3.3	52.0	6.2	2.0	5.9
14:00~14:59	4.8	3.8	2.1	N/C	5.4	2.1	4.9
15:00~15:59	6.4	8.2	8.2	48.0	4.7	2.0	5.2
16:00~16:59	5.9	5.7	12.5	N/C	6.8	7.9	7.0
17:00~17:59	9.4	5.6	10.0	N/C	9.2	8.3	8.9
18:00~18:59	14.4	11.0	20.9	N/C	6.1	14.9	8.1
19:00~19:59	11.7	12.7	20.8	N/C	6.6	19.4	8.7
20:00~20:59	7.4	6.1	8.1	N/C	4.5	6.0	5.1
21:00~21:59	2.3	1.8	0.9	N/C	1.3	0.5	1.3
22:00~22:59	N/C	N/C	N/C	N/C	0.1	N/C	0.1

*N/C: No excess case.

Table 9. Rate of excess case of PM_{2.5} concentration by every hour (%)

Time	Bus line						
	A	B	C	D	E	F	All
6:00~6:59	1.5	1.8	2.4	0.1	1.8	0.6	1.7
7:00~7:59	6.8	7.0	6.4	5.7	8.1	4.8	7.0
8:00~8:59	10.0	11.7	6.3	6.0	8.4	9.1	8.9
9:00~9:59	7.9	9.3	7.3	4.1	8.6	7.7	8.3
10:00~10:59	7.5	7.5	6.0	10.9	8.9	8.9	8.2
11:00~11:59	5.3	6.5	5.7	4.9	5.9	4.1	5.6
12:00~12:59	5.0	7.4	3.9	1.9	6.6	4.4	5.8
13:00~13:59	5.1	6.0	4.9	5.7	5.4	5.9	5.5
14:00~14:59	4.6	6.0	7.4	4.8	5.6	6.1	5.9
15:00~15:59	6.6	5.3	7.5	6.4	4.4	6.4	5.5
16:00~16:59	6.3	5.7	7.0	5.6	6.5	7.4	6.6
17:00~17:59	6.6	5.5	7.8	4.6	7.6	7.2	7.1
18:00~18:59	8.6	7.5	10.1	14.0	6.9	10.1	8.2
19:00~19:59	8.6	6.7	11.0	17.2	7.9	8.9	8.4
20:00~20:59	6.5	4.5	5.8	6.4	5.5	5.9	5.5
21:00~21:59	3.1	1.5	0.2	1.5	1.6	2.4	1.7
22:00~22:59	N/C	N/C	N/C	0.4	0.3	N/C	0.1

*N/C: No excess case.

시 30분까지, 또는 18시부터 20시까지로 규정하였으며, 이 시간대에 교통량 및 대중교통 이용객이 많음을 의미한다. 또한, 선행연구결과에서도 혼잡도에 따라 대중교통차량 내 오염물질의 농도가 높게 나타나는 경향을 보였다.²²⁾ 본 연구결과에서도 혼잡시간대에 오염물질의 기준초과사례의 비중이 높은 것은 해당 시간대의 교통량 및 시내버스 이용자의 증가에 따라 차량 내 오염물질 농도가 증가하여 기준초과사례의 비중이 높게 나타난 것으로 보이며, 혼잡시간대에 대한 실내공기질 관리가 필요하다. 노선별로 비교해보면 D 버스와 E 버스를 제외하고 18시와 19시에 기준초과사례의 비중이 높았으며, D 버스는 13시와 15시에 일부 기준초과사례가 있었다. 기준초과사례는 13시에 13건, 15시에 12건으로 수집된 총 데이터 693,036건에 비해 미미한 수준으로 나타났으며, 이 외의 시간대에서는 기준치 이하로 나타났다. 노선별로 기준초과 사례가 다른 것은, 선

행 연구에 따르면 도시내의 녹지, 도심, 산업특성 등 도시의 특성이 미세먼지의 농도에 영향을 미치며,²³⁾ 녹지 지역에서는 식생이 이동성 모래 및 미세먼지를 낮추는 효과가 있으며,²⁴⁾ 도시화가 진행된 지역에서의 미세먼지 농도가 높은 경향이 있는 것으로 나타났다.²⁵⁾ 시간대별 기준초과사례 비중이 버스별로 다르게 나타난 것은 각 버스가 운행하는 노선의 환경특성이 다르며, 버스의 운행지역, 운행 노선상의 오염원 및 녹지 유무 등에 따른 영향으로 오염물질의 기준초과사례가 노선별로 다르게 나타날 수 있으므로, 이에 대한 추가적인 분석이 필요하다.

3. 월별 미세먼지 기준초과사례 분석 결과

미세먼지의 기준초과사례를 월별로 분석한 결과 PM₁₀의 경우 11월에 36.3%로 기준초과사례 중 가장 많은 비중을 차지하였으며, 1월에 27.2%, 12월에 14.9%, 8월에 14.4%로 11~1월

Table 10. Rate of excess case of PM₁₀ concentration by month (%)

Year	Month	Bus line							
		A	B	C	D	E	F	All	
2021	4	0.1	N/C	N/C	100.0	0.7	N/C	0.7	
	5	0.1	0.8	0.1	N/C	0.5	N/C	0.4	
	6	N/C	0.7	N/C	N/C	0.4	0.1	0.4	
	7	N/C	1.1	0.1	N/C	5.1	0.6	4.0	
	8	15.9	0.7	N/C	N/C	17.7	0.1	14.4	
	9	N/C	0.1	N/C	N/C	0.1	0.3	0.1	
	10	6.5	2.8	2.7	N/C	0.8	4.3	1.5	
	11	77.3	81.7	89.2	N/C	24.4	54.1	36.3	
	12	N/C	5.3	5.2	N/C	16.8	24.3	14.9	
	2022	1	N/C	6.9	2.6	N/C	33.5	16.1	27.2

*N/C: No excess case.

Table 11. Rate of excess case of PM_{2.5} concentration by month (%)

Year	Month	Bus line							
		A	B	C	D	E	F	All	
2021	4	9.0	0.9	4.9	73.5	2.6	N/C	3.4	
	5	15.5	9.7	7.5	17.6	6.6	N/C	6.9	
	6	N/C	7.5	5.7	N/C	8.0	1.3	5.7	
	7	N/C	0.8	0.4	N/C	6.3	2.0	3.2	
	8	7.6	0.6	2.7	0.4	12.7	1.1	6.7	
	9	0.2	0.2	0.1	2.7	1.0	0.3	0.5	
	10	18.6	8.8	7.8	5.8	4.8	6.6	7.3	
	11	49.1	29.9	32.3	N/C	17.0	27.8	25.5	
	12	N/C	21.0	26.9	N/C	18.6	34.7	21.3	
	2022	1	N/C	20.7	11.8	N/C	22.5	26.3	19.4

*N/C: No excess case.

및 8월에 기준초과사례가 많이 나타났다(Table 10). PM_{2.5}의 경우 11월에 25.5%로 기준초과사례 중 가장 많은 비중을 차지하였으며, 12월에 21.3%, 1월에 19.4%로 기준초과사례가 많이 나타났다(Table 11). 본 연구의 대상 지역인 충청남도 북부권역에 5월, 11월, 12월, 1월에 미세먼지 주의보 및 경보발령이 많았으며,²⁶⁾ 11월, 12월, 1월에 기준초과사례의 비중이 높게 나타난 것은 외부의 미세먼지의 영향을 받아 기준초과사례가 많이 나타난 것으로 보인다. 선행연구결과에 따르면 차량의 공조장치 작동에 따라 차량 외부의 미세먼지가 내부로 유입되며,²⁷⁾ 에어컨을 작동하는 하계에 비해 추계의 미세먼지 농도가 높게 나타났다.²⁸⁾ 본 연구결과에서도 미세먼지 주의보 및 경보발령이 많았던 11월, 12월, 1월에 에어컨을 사용하지 않아 외부의 미세먼지가 차량 내부로 유입되어 기준초과사례가 많이 나타났고, 5월에는 에어컨 사용으로 외부의 미세먼지 농도가 높았음에도 기준초과사례가 적게 나타난 것으로 보인다.

4. 위해성 평가 결과

PM₁₀에 대한 위해성 평가 결과를 Table 12, 13에 나타내었다. 연구대상 버스 이용자의 PM₁₀ 노출에 따른 초과사망 위험도는 연구대상 시내버스에서 혼잡한 시간과 혼잡하지 않은 시간 모두 10⁻⁶ 이하로 안전역 수준으로 나타났다. 연구대상 시내버스의 초과사망위험도는 2.49E-07로 나타났으며, 오후 혼잡 시간대인 18~19시보다 오전 혼잡시간대인 8~9시의 초과사망 위험도가 조금 더 높은 것으로 나타났다. 평균농도가 가장 높았던 E 버스에서 초과사망 위험도가 3.57E-07로 가장 높았으나, 안전역 수준으로 평가되었다. 연구대상 시내버스의 PM₁₀의 흡입노출독성위험도값은 0.225이며, 오전과 오후의 혼잡시간대에는 각각 0.251, 0.239로 나타났다. 연구대상 시내버스가 흡입노출독성위험도평가에서 모두 1 미만으로 안전역 수준으로 평가되었다. 다만, PM₁₀의 평균농도가 가장 높았던 E 버스에서 흡입노출독성위험도가 0.324로 나타났다. 하루 3시간 이상 이용한다고 가정하였을 때, 흡입노출독성위험도가 0.971

로 장시간 노출되는 운전자의 경우 흡입노출로 인한 영향이 있을 가능성이 있어 관리가 요구된다.

V. 결 론

본 연구에서는 산업도시에서 운행하는 대중교통차량 중 시내버스를 대상으로 2021년 4월부터 2022년 1월까지 실내공기질 실태조사를 진행하였다. 시내버스 내에 IoT 센서형 실내공기질 측정 장비를 설치하여 1분 단위로 모니터링하였다.

데이터 분석 결과 오염물질의 평균농도는 모두 기준치 이하였지만, 일부 기준초과사례가 있었다. 시간대별 미세먼지 기준초과사례를 분석한 결과 혼잡시간대에서 높게 나타났으며, 미세먼지 기준초과사례를 월별로 분석한 결과에서는 미세먼지 주의보 및 경보발령이 있는 시기에 기준초과사례가 많았으며, 에어컨 사용 시기에는 기준초과사례가 낮게 나타난 것으로 보인다. 버스 노선별로 기준초과사례가 다르게 나타난 것은 운행하는 버스의 환기여부, 승객의 혼잡도, 운행지역의 오염원 유무 등에 따른 영향으로 보인다. 장기간 측정결과를 바탕으로 버스의 실내공기질과 운행특성(혼잡도, 환기 여부 등) 및 운행지역의 환경특성 사이의 상관관계를 파악하기 위한 추가적인 보완을 통해 버스의 실내공기질 관리방안을 마련할 필요가 있다. 위해성평가 결과 PM₁₀ 노출에 따른 초과사망 위험도는 연구대상 대중교통에서 혼잡한 시간과 혼잡하지 않은 시간 모두 10⁻⁶ 이하로 안전역 수준으로 나타났다. 흡입노출독성위험도평가에서 모두 1 미만으로 안전역 수준으로 평가되었다. 다만, 장시간 노출 시에는 흡입노출로 인한 영향이 있을 가능성이 있어 관리가 요구된다. 본 연구는 장기간 측정을 위해 광산란 장비를 활용하였으며, 이에 따라 측정결과가 중량법 측정장비에 비해 신뢰도가 낮다는 한계점이 있다. 다만, 장기간 측정을 기반으로 한 위해성 평가 결과를 통해 위해성이 높게 나타나고 기준초과사례의 비중이 높은 시간대, 기간을 파악하여 대중교통차량 운행 시 실내공기질을 관리하는 방안을 보완해야 한다.

Table 12. Risk of mortality of PM₁₀ in public transportation

Bus line	Time to use public transportation		
	Mean	Rush hour (8~9)	Rush hour (18~19)
All	2.49E-07	2.77E-07	2.64E-07
A	2.46E-07	2.62E-07	2.62E-07
B	2.24E-07	2.59E-07	2.24E-07
C	1.87E-07	2.02E-07	2.14E-07
D	1.94E-07	2.05E-07	2.48E-07
E	3.57E-07	3.80E-07	3.61E-07
F	2.30E-07	2.55E-07	2.59E-07

Table 13. Hazard quotients (HQ) of PM₁₀ in public transportation

Bus line	Time windows to use public transportation		
	Mean	Rush hour (8:00~9:00)	Rush hour (18:00~19:00)
All	0.225	0.251	0.239
A	0.223	0.237	0.238
B	0.203	0.235	0.203
C	0.170	0.183	0.194
D	0.176	0.186	0.225
E	0.324	0.345	0.327
F	0.209	0.231	0.234

감사의 글

이 논문은 2020학년도 평택대학교 학술연구비의 지원에 의하여 연구되었습니다.

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

1. Korean Statistical Information Service (KOSIS). Number of Public Transportation Use_1 Week. Available: http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=116&tblId=DT_MLTM_5719 [accessed 25 January 2022].
2. Kim YS, Shin EB, Kim SD, Kim DS, Jeon JM. Measurements of carcinogenic air pollutants in Seoul metropolitan subway stations. *Korean J Environ Health Soc.* 1994; 20(1): 19-27.
3. International Agency for Research on Cancer (IARC). Outdoor Air Pollution a Leading Environmental Cause of Cancer Deaths. Lyon: IARC; 2013.
4. Bae HJ. Effects of short-term exposure to PM10 and PM2.5 on mortality in Seoul. *J Environ Health Sci.* 2014; 40(5): 346-354.
5. Cetin M, Sevik H. Measuring the impact of selected plants on indoor CO2 concentrations. *Pol J Environ Stud.* 2016; 25(3): 973-979.
6. World Health Organization (WHO). WHO Guidelines for Indoor Air Quality: Dampness and Mould. Copenhagen: WHO; 2009.
7. Ministry of Environment (ME). Operating Vehicle Indoor Air Quality Management Manual. Sejong: Ministry of Environment; 2018.
8. Klepeis NE, Nelson WC, Ott WR, Robinson JP, Tsang AM, Switzer P, et al. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *J Expo Anal Environ Epidemiol.* 2001; 11(3): 231-252.
9. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. Analysis of the Use of Public Transportation Based on Transportation Card Data. Sejong: Ministry of Land, Infrastructure and Transport; 2020.
10. Korean Statistical Information Service (KOSIS). The Share of Public Transportation. Available: <https://www.index.go.kr/unify/idx-info.do?idxCd=4259> [accessed 25 January 2022].
11. Seoul Metropolitan Government. Major Traffic Statistics. Available: <https://news.seoul.go.kr/traffic/archives/285> [accessed 25 January 2022].
12. Statistics Korea. Purpose of Public Transportation. Available: http://kosis.kr/statisticsList/statisticsListIndex.do?menuId=M_01_01&vwcd=MT_ZTITLE&parmTabId=M_01_01#SelectStatsBoxDiv [accessed 25 January 2022].
13. Korean Statistical Information Service (KOSIS). Bus Status by Bus Industry. Available: https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=116&tblId=DT_MLTM_5507&vw_cd=MT_ZTITLE&list_id=116_11669_001&seqNo=&lang_mode=ko&language=kor&obj_var_id=&itm_id=&conn_path=MT_ZTITLE [accessed 25 January 2022].
14. Marques G, Pitarma R. An indoor monitoring system for ambient assisted living based on internet of things architecture. *Int J Environ Res Public Health.* 2016; 13(11): 1152.
15. Pope CA 3rd, Thun MJ, Namboodiri MM, Dockery DW, Evans JS, Speizer FE, et al. Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of U.S. adults. *Am J Respir Crit Care Med.* 1995; 151(3 Pt 1): 669-674.
16. National Institute of Environmental Research (NIER). Korean Exposure Factor Handbook. Incheon: NIER; 2019.
17. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. Public Transportation Status Survey. Gimcheon: Korea Transportation Safety Authority; 2020.
18. Moon NK, Kim ST, Ha JS, Kim YM, Seo JH. Analysis System for Regional Environmental Status to Support Environmental Assessment: Source Apportionment Analysis of Air Pollutants from Major Industrial Complexes and Local Governments. Sejong: Korea Environment Institute; 2017.
19. Balakrishna G, Pervez S. Source apportionment of atmospheric dust fallout in an urban-industrial environment in India. *Aerosol Air Qual Res.* 2009; 9(3): 359-367.
20. Kang BW, Kim MJ, Baek KM, Seo YK, Lee HS, Kim JH, et al. A study on the concentration distribution of airborne heavy metals in major industrial complexes in Korea. *J Korean Soc Atmos Environ.* 2018; 34(2): 269-280.
21. National Institute of Environmental Research (NIER). Korea-US Study on Air Quality (KORUS-AQ). Incheon: NIER; 2017.
22. An SM, Lee JH, Yoon SW, Kim HH. Characteristics of indoor air pollutants in express buses. *J Odor Indoor Environ.* 2018; 17(3): 199-206.
23. Eum JI, Kim HK. The impacts of industrial characteristics of cities on fine dust levels. *J Environ Sci Int.* 2020; 29(5): 445-455.
24. Al-Dousari AM, Ahmed M, Al-Dousari N, Al-Awadhi S. Environmental and economic importance of native plants and green belts in controlling mobile sand and dust hazards. *Int J Environ Sci Technol.* 2019; 16(5): 2415-2426.
25. Thi AP, Shukurov IS, Van LP, Shukurova LI. Investigation of air dust and fine dust of an urbanizing environment. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng.* 2021; 1079: 042079.
26. Korea Environment Corporation. List of Fine Dust Warnings. Available: https://www.airkorea.or.kr/web/pmWarning?pMENU_NO=115 [accessed 26 January 2022].
27. Delfino RJ, Wu J. Contract No. 07-310. In-Vehicle Air Pollution Exposure Measurement and Modeling. Sacramento: California Air Resources Board; 2012.
28. Shin YC, Lee JH, Kim JR, Kim DH. A study on investigation of indoor air quality of public transportation system (express, intercity bus). *Korean J Odor Res Eng.* 2010; 9(2): 107-117.

<저자정보>

김호현(교수)