

대중교통수단 객실 내 휘발성유기화합물류 거동 특성

곽윤경 · 이정훈 · 전보일 · 양호형 · 김호현*†

평택대학교 생활 및 산업 환경R&D센터, *평택대학교 ICT융합학부 ICT환경융합전공

Study on the Movement of Volatile Organic Compounds in Public Transportation

Yoon-kyung Gwak, Jeong-Hun Lee, Bo-il Jeon, Ho-Hyeong Yang, and Ho-Hyun Kim*†

Life & Industry Environmental R&D Center in Pyeongtaek University

**Department of Information, Communication and Technology Convergence,*

ICT Environment Convergence, Pyeongtaek University

ABSTRACT

Objective: This study is aimed at investigating indoor air quality on public transportation (subway, train, and bus) according to changes in season and time.

Methods: We evaluated TVOC and HCHO on public transportation based on the un-controlled parameters of the Ministry of Environment. We also measured temperature and humidity since they affect the concentration of TVOC and HCHO. For public transportation classification, subway lines were classified into Lines 1 to 4. Additionally, trains were classified as ITX and KTX.

Results: When comparing summer and winter on public transportation, the concentrations of TVOC and HCHO did not show any particular tendency. However, the concentrations of TVOC and HCHO during traffic congestion was higher than levels during times of non-congestion on most public transportation. In summer and winter, the measurement results for temperature and humidity showed a normal range, so temperature and humidity did not affect the concentrations of TVOC and HCHO. In the case of TVOC, TVOC concentrations on new trains were found to be relatively higher than on older ones, but there was no statistically correlation.

Conclusions: A survey was conducted on the indoor air quality on public transportation. This study also analyzed data based on TVOC and HCHO for designing policies and managing indoor air quality.

Key words: HCHO, indoor air quality, public transportation, TVOC

I. 서론

국민 소득수준의 향상과 산업구조의 다양화, 신속성 및 정확성을 요구하는 현대 사회 경제 구조의 변혁으로 차량은 다양한 목적으로 사용되고 있으며,¹⁾ 이에 따라 시민들의 출퇴근 및 이동 수단인 대중교통의 수송 부담률은 2003년 36.8%에서 2016년 42.8%

로 지난 10여 년간 6.0% 증가하였다.²⁾

대중교통수단은 특성상 좁은 밀폐 공간에 많은 인원을 수송할 뿐만 아니라 장거리 운행이 많으며 대기오염 등과 같은 다양한 직·간접적 노출 매체 등에 의해 오염물질이 차량 내 쉽게 축적되기 때문에 이용자의 건강에 부정적인 영향을 끼칠 수 있다.^{3,4)} 특히 차량 내장재 및 접착제 등에서 발생하는 휘발

†Corresponding author: Department of Information, Communication and Technology Convergence, ICT Environment Convergence, Pyeongtaek University, 3825 Seodong-daero, Pyeongtaek-si, Gyeonggi-do, 17869, Korea, Tel +82-31-659-8092, E-mail: ho4sh@ptu.ac.kr

Received: 16 August 2019, Revised: 31 March 2020, Accepted: 31 March 2020

성유기화합물(TVOC)과 포름알데히드(HCHO)의 경우, 눈, 코, 목의 자극 및 두통, 현기증 등의 증상을 유발하기도 한다.^{5,6,7)} 최근에는 자동차의 실내공기오염 즉 「새 차 증후군」이라는 단어가 생겨날 만큼 이동 수단이 새로운 실내공기 오염 공간으로 주목받고 있다.^{8,9)} Kim 등(1994)에 따르면 서울시 일부 지역에서 운행되고 있는 대중교통수단 내 실내 공기질 조사 결과 미세먼지(PM₁₀) 농도는 지하철에서 134.6 µg/m³, 좌석버스에서는 96.5 µg/m³로 나타났다. 이산화탄소(CO₂) 농도의 경우, 좌석버스 2,511.1 ppm, 지하철 1,986.9 ppm으로 조사되었다.¹⁾ 또한 환경부(2006)에서 대중교통을 대상으로 차량 내 미세먼지를 조사한 결과 다중이용시설 기준(500 µg/m³)과 비교하였을 때 초과율이 지하철에서 50.9%로 가장 높게 나타났으며, 버스 19.3%, 열차 12.5% 순으로 조사되었다.¹⁰⁾

환경부에서는 대중교통차량을 이용하는 국민의 건강을 보호하고 환경상의 위해를 예방하고자 「실내공기질 관리를 위한 대중교통차량의 제작·운영 관리지침」에 따라 도시철도와 철도 및 시외버스에 대하여 객실 내 미세먼지(PM₁₀) 및 이산화탄소(CO₂) 농도를 권고기준으로 설정하여 관리하고 있지만, TVOC와 HCHO는 신규 제작 자동차의 경우에만 관리되어지고 있다.^{11,12)}

이러한 관점에서 대중교통수단 내 오염물질의 농도에 대한 조사와 원인 규명에 대한 다양한 조사가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 대중교통수단별(도시철도, 철도, 버스) 차량 내 법적 미규제 물질인 TVOC와 HCHO의 농도를 측정하고, 시간(혼잡시간대, 비혼잡시간대) 및 계절(하계, 동계)에 따른 농도 분포를 살펴 대중교통 실내공기질 정책 수립을 위한 기초 자료를 제공하는데 목적이 있다.

II. 연구방법

1. 연구대상 및 조사기간

본 연구에서는 현재 환경부에서 제정한 「실내공기질 관리를 위한 대중교통차량의 제작·운영 관리지침」 제8조 별표 1의 관리 대상 대중교통차량으로 지정된 도시철도차량, 철도차량 및 고속형 시외버스를 연구 대상으로 구분하였다. 도시철도의 경우 서

울 지하철 1~4호선으로 선정하였으며, 철도의 경우에는 KTX와 ITX로 선정하였다. 고속버스의 경우는 노선에 따라서 사전 협조를 통해 섭외를 진행하였다. 대중교통별 조사는 2014년 하계측정을 시작으로 2015년 동계에 걸쳐 진행하였다.

또한, 측정은 혼잡시간대와 비혼잡시간대로 나누어 진행하였으며 버스 중 시외버스, 열차의 경우 혼잡시와 비혼잡시를 주중과 주말의 개념으로 구분하였다. 지하철의 경우에는 출근 및 퇴근 시간인 주중 오전 7:30~9:30 또는 오후 18:00~20:00를 혼잡시간대로 구분하고 이외의 시간을 비혼잡시간대로 구분하여 진행하였다.

2. 대중교통 차량별 시료 측정 방법 및 분석

2.1. 측정 물질 선정

본 연구에서는 다중이용시설 중 지하역사, 철도역사의 대합실, 여객자동차터미널의 대합실이 적용받고 있는 「실내공기질 관리법 시행규칙」 별표 3의 실내공기질 권고기준(제4조 관련)으로 관리되고 있는 오염물질인 TVOC와 HCHO를 대상으로 하였다. 또한, TVOC와 HCHO의 농도에 영향을 줄 수 있는 온도 및 습도를 추가 확인하였다.

2.2. 시료 채취 및 객실 내 지점

측정지점은 대중교통차량 내 실내 공기질을 대표할 수 있다고 판단되는 지점인 곳에 직접적인 발생원이 없고, 천정으로부터 30 cm 이상 떨어지며 바닥면으로부터 1 m 이상의 높이, 각 출입문으로 1 m 이상 떨어진 곳을 중앙점으로 선정하였다.

지하철은 혼잡 시간대와 외기의 영향을 최소화 할 수 있는 휠체어석이 있는 곳을 지정하였다. 철도(KTX, ITX)의 경우에는 출발할 때는 승객이 모두 착석을 하고 정차역에서는 출입문 쪽에 하차하려는 승객이 미리 대기하는 경우가 많기 때문에 광산란법 측정 장비에 영향을 끼칠 수 있다. 이로 인하여 순간적인 농도 변화를 유발할 가능성이 크기 때문에 유동 승객의 움직임의 영향을 최소화 할 수 있는 가운데 지점을 지정하여 측정하였다. 버스 측정의 경우에도 외기의 영향을 최소화 할 수 있도록 승·하차 출입문에서 멀리 떨어진 곳으로 측정 지점을 선정하였다.

2.3. 측정방법과 분석

총휘발성유기화합물(TVOC)은 고체흡착관을 사용한 고체흡착열탈착법을 이용하여 분석하였다. GC/MS QP 2010 Ultra (Shimadzu, Japan)를 사용하여 진행하였고, Personal air sampler (SIBATA Minipump ΣMP-30, Japan)에 Tenax-TA tube (Supelco, USA)를 연결하여 1.0 L/min의 유량으로 30분간 시료를 포집하여 분석하였다.

폼알데하이드는 2,4-DNPH 카트리지와 액체 크로마토그래프를 이용하여 분석하였다. HPLC LC-20AT (Shimadzu, Japan)를 사용하여 진행하였고, Personal air sampler (SIBATA Minipump ΣMP-100H, Japan)를 사용하여 350 mg의 DNPH-silica (1.0 mg DNPH)를 충전한 DNPH-silica cartridge (Supelco, USA)에 오존의 간섭작용을 최소화하기 위하여 고순도의 요오드칼륨(Potassium iodide)으로 충전된 오존스크러버(ozone scrubber)를 DNPH-silica cartridge 앞에 직렬로 연결하였다. 1.5 m 높이에서 0.5 L/min의 유량으로 30분간 시료를 포집하고, 자외선흡수법에 의한 고성능 액체 크로마토그래프에 의해 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

TVOC는 온도 및 습도에 민감하게 반응하는 물질로 온도와 습도에 따라 TVOC 농도가 증가 또한 감소의 영향을 받을 수 있다. 본 연구의 경우, 온도 및 습도를 함께 측정하여 TVOC 농도 분포에 영향을 끼치는지 살펴보았다. 지하철, KTX, ITX, 고속버스의 온도와 습도 측정 시 하계의 온도 범위는 23~26°C로 조사되었으며, ANSI/ASHRAE에서 권장하는 여름철 실내 온도 범위인 24~27°C와 비슷한 수준을 보였다. 또한, 습도는 59~67%로 조사되었으며, ANSI/ASHRAE에서 권장하는 여름철 실내 습도 범위인 50% 보다 높게 조사되었다. 또한, 동계의 온도 범위는 18~22°C로 측정되었으며 ANSI/ASHRAE에서 권장하는 겨울철 실내 습도 범위인 20~24°C보다 낮게 조사되었다. 또한, 습도는 22~37%로 낮게 측정되었다. 측정 시 온도와 습도는 하계와 동계 모두 TVOC 농도에 이상적인 영향을 줄 수준은 아니었으며 특이 사항이 관찰되지 않았다.

1. 지하철(도시철도)

1.1. TVOC

지하철의 TVOC 평균 농도를 혼잡시간대와 비혼잡시간대를 나누어 비교한 결과, 하계에는 혼잡시간대에 625.75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 비혼잡시간대에 632.17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었다. 또한, 동계에는 혼잡시간대에 374.65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 비혼잡시간대에 356.71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었으며, 동계보다는 하계의 농도 수준이 높은 것으로 나타났다. 본 연구에서는 혼잡시간대와 비혼잡시간대 농도의 큰 차이는 나타나지 않았다.

Namgung 등(2016)의 조사에 따르면 지하철 승강장의 TVOC의 농도는 대합실이 평균 1.3배 높게 나타났다으며, 이는 대합실 내 위치한 지하도상가 등의 매장 인테리어로 인한 목재 및 접착제 사용이 TVOC 농도의 증가에 영향을 주는 것으로 나타났다.¹³⁾ 또한 지하철역사 냉방 가동 중 발생하는 유해물질 조사 보고서에 따르면 지하철 TVOC 농도 조사 결과 toluene, ethyl benzene, m-xylene, trimethylbenzene 모두 전반적으로 일반 대기농도보다는 높은 농도로 검출되었다. 이는 닫힌 공간의 특성 및 외부 공기의 영향에 의한 것으로 판단된다고 보고되었다.¹⁴⁾

기준치를 초과한 지하철에 대해서는 주로 연식이 2008~2010년식인 것으로 조사되었고, 측정년도가 2015년임을 감안하였을 때 신규 제작 차량의 내장재에서 발생하는 각종 TVOC 방출 등의 영향이 작용한 것으로 판단된다.

1.2. HCHO

지하철의 HCHO 평균 농도가 혼잡시간대에 12.58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 비혼잡시간대에 9.61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 혼잡시간대의 농도가 높은 것으로 조사되었다. 각 노선별 계절에 따른 HCHO 농도를 비교한 결과는 대부분 하계의 농도보다 동계의 농도가 조금 더 높게 나타났다. 환경부(2006) 보고서에 따르면 버스, 지하철, 열차를 대상으로 HCHO를 조사한 결과 가장 높은 농도 수준을 보인 운송 수단인 지하철로 나타났다. 반면, 계절적 차이(가을/겨울)와 혼잡시간대(혼잡시간대, 비혼잡시간대) 조사 결과를 비교하였을 경우, 통계적으로 유의하지 않는 것으로 조사되었다.¹⁰⁾ Sakong 등(2009)의 조사에 따르면 새 차 내 HCHO 방출량 조사 결과 기존 차량보다 신규 제작 차량에서 높게

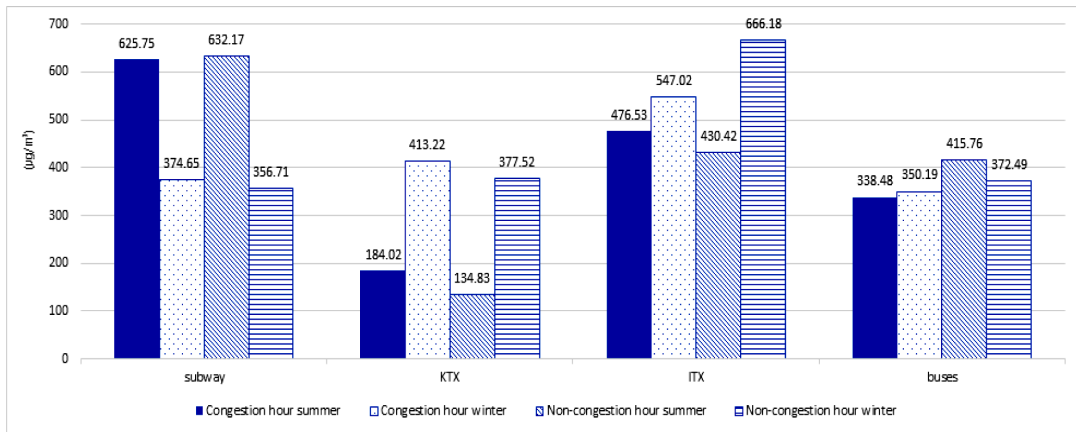


Fig. 1. Average concentration of TVOC in public transportation on congestion level

측정되었으며 운행하는 운전자의 경우 주의 집중력, 인지능이 저하되었다. 또한, 창문을 의도적으로 개방하였을 경우 개방하지 않았을 경우보다 농도가 소폭 감소하였다.³⁾ 이처럼 HCHO는 물질의 특성상 대부분 차량의 내장재에서 발생하나, 본 연구에서는 농도 분포가 비교적 낮게 나타났으며, 이는 문의 개폐 여부에 따른 영향이 작용한 것으로 판단된다.

2. 열차(철도)

2.1. TVOC

2.1.1. KTX

KTX의 TVOC 평균 농도를 혼잡시간대와 비혼잡시간대를 나누어 비교한 결과, 하계에는 혼잡시간대에 184.02 µg/m³, 비혼잡시간대에 134.83 µg/m³로 조사되었다. 또한, 동계에는 혼잡시간대에 413.22 µg/m³, 비혼잡시간대에 377.52 µg/m³로 조사되었다. 특히, 동계의 혼잡시간대와 비혼잡시간대 TVOC 평균 농도가 하계에 비해 높게 조사되었다. Lee 등(2019)의 조사에 따르면 동계의 경우 혼잡시간대와 비혼잡시간대 KTX의 TVOC 농도가 증가하여 다중이용시설의 실내공기질 권고기준 500 µg/m³을 초과하는 사례가 2건(혼잡시간대 1건, 비혼잡시간대 1건)으로 조사되었다.¹⁵⁾ Park 등(2003)에 따르면 철도 배출가스의 TVOC 분석결과 benzene, chlorobenzene, tetrachloroethylene 등과 같은 물질이 엔진 출력의 증가에 따라 농도가 증가하는 양상을 보인 것으로 조사되었다. 또한, 공회전 시에도 TVOC 농도가 높게 조사되는 것으로 보아 철도 내 TVOC의 경우 외기 유입으로

인하여 차량 내 농도 변화에 영향을 끼칠 수 있다고 판단된다.¹⁶⁾

2.1.2. ITX

ITX의 TVOC 평균 농도를 혼잡시간대와 비혼잡시간대를 나누어 비교한 결과, 하계에는 혼잡시간대에 476.53 µg/m³, 비혼잡시간대에 430.42 µg/m³로 혼잡시간대에 농도가 더 높게 조사되었다. 또한, 동계에는 혼잡시간대에 547.02 µg/m³, 비혼잡시간대에 666.18 µg/m³로 조사되었다. 특히, 동계의 경우 혼잡시간대와 비혼잡시간대 TVOC의 농도가 하계에 비해 높게 측정되었다. Cho 등(2008)의 연구에서 철도 차량 내 사용된 내장재의 TVOC 방출 특성을 시간대별로 조사한 결과 초기에는 상대적으로 고농도의 TVOC가 방출되나 시간이 경과함에 따라 서서히 감소하는 경향을 보였다.¹⁷⁾ 또한 Cho 등(2012)의 연구에 따르면 부산 지역 일부 지하도상가의 실내공기질 측정 결과, 계절에 따른 실내의 농도비는 가을철에 benzene (8.0), toluene (8.8), m,p-Xylene (43.0), styrene (31.6)으로 나타났다. 또한, 가을철이 봄철에 비해 높게 조사되었는데 이는 외기 유입에 의한 영향보다는 실내 오염물질 방출량에 기인한 것으로 추측하였다.¹⁸⁾ 그러나 본 연구에서는 동계의 농도가 하계보다 높게 조사되었으며, 전체 초과 사례도 더 많이 나타났다. 이는 ITX 차량의 연식이 2012~2013년으로 KTX의 차량 연식(2004년)보다 신규로 제작된 차량이므로 차량 내에서 실내 오염물질이 더욱 많이 배출된 것으로 추측되며 이로 인하여 KTX의

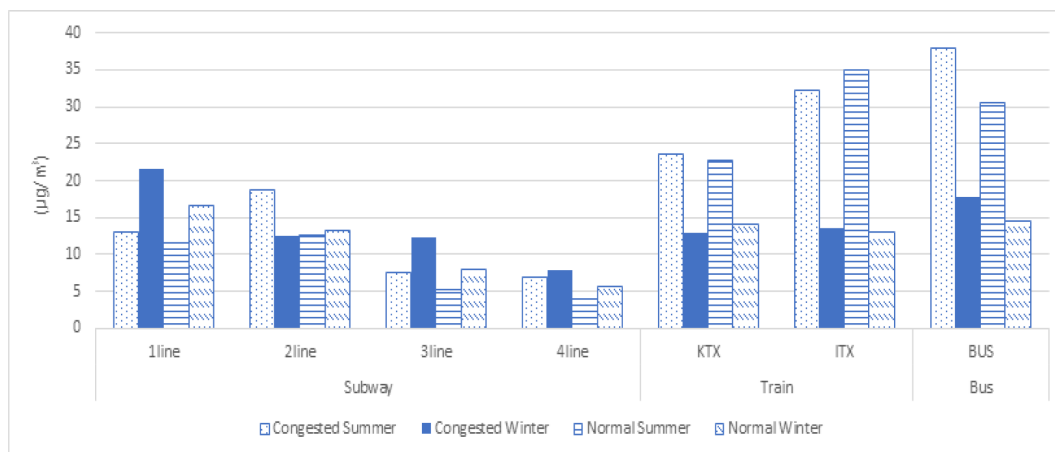


Fig. 2. Average concentration of HCHO in public transportation on congestion level

실내 TVOC 농도 분포에 비해 ITX의 TVOC 평균 농도 분포가 더 높게 조사된 것으로 판단된다.

2.2. HCHO

2.2.1. KTX

KTX 내 HCHO의 평균 농도는 혼잡시간대에 18.26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 비혼잡시간대에 18.48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 시간대별 농도 차가 크게 나타나지 않았으며 다중이용시설 기준치보다 낮은 농도 분포를 보였다. Cho 등(2012)의 연구에 따르면 부산 지하도상가 내 실내공기질 조사 결과 다중이용시설 실내공기질 유지기준 항목인 HCHO의 기준으로 대부분의 시설에서 만족하였다.¹⁸⁾ 또한, 2005년 환경부 조사에 따르면 발암물질인 HCHO의 경우 전국 14개 지하철 노선 중 서울 7, 8호선과 분당, 인천선을 제외한 10개 노선에서 다중이용시설 기준치(0.1 ppm)를 초과하였다. 서울 3, 4호선과 부산 1호선의 경우, 출·퇴근시 0.136~0.183 ppm의 농도 분포를 보였으며, 서울 6호선에는 여름철 평상시에도 기준치의 4배를 초과하는 수준인 0.400 ppm으로 조사되었다.¹⁹⁾ 반면, Cho 등(2006)의 연구에서는 연구 대상 중 KTX 객실 HCHO의 농도가 평균 13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 기준치를 초과하는 사례가 없었으며 매우 낮은 농도 수준을 보였다.²⁰⁾

2.2.2. ITX

ITX 내 HCHO의 평균 농도는 혼잡시간대에 22.93 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 비혼잡시간대에 23.95 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 시간에 따른

농도 차가 크게 보이지 않은 것으로 보아 시간대별 HCHO 농도는 상관관계가 없는 것으로 판단된다. 계절에 따른 농도 변화의 경우, 동계에 비해 하계의 농도가 더 높게 조사되었고, 다중이용시설 실내 공기질 유지기준 항목 기준치와 비교하였을 때 초과 사례는 없는 것으로 조사되었다. Yeo 등(2002)의 연구에서 수도권 지역 HCHO의 계절 별 발생원 특성 조사 결과에 따르면 겨울에 비해 여름에 2차 발생원의 영향을 크게 받는 것으로 조사되었다.²¹⁾ HCHO의 경우, 신차의 내장 부품을 결합하기 위해 사용된 접착제, 시트, 케이스 등과 같은 차량 내장재에서 발생하며 운전자 및 탑승자의 눈, 코, 목 자극 및 두통, 피로감, 피부 질환 등의 건강에 악영향을 미치기 때문에 주의가 필요하다.²²⁾

3. 고속버스

3.1. TVOC

고속버스의 하계 TVOC 농도는 혼잡시간대에 338.48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 비혼잡시간대에 415.76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 비혼잡시간대의 농도가 높은 것으로 나타났다. 특히 동계의 경우 혼잡시간대 농도가 350.19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 하계에 비하여 높게 조사되었다. 주로 2011~2013년 식차량에서 높은 농도의 수준을 보였으며, 신규 차량 제작 시 천연 자재 사용 권고 및 bake-out 등의 저감 방안을 시행하는 것을 권장할 필요가 있다고 판단된다. Lee 등(2019)의 연구에 따르면 혼잡시간대와 비혼잡시간대를 포함하여 TVOC의 농도가 가장

Table 1. Concentration of benzene in public transportation ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Public transportation	N	Summer		Winter	
		Congested	Non-congested	Congested	Non-congested
Subway 1 line	5	6.06±2.39 (2.11~7.94)	6.10±2.55 (1.94~8.19)	3.41±1.14 (2.04~4.98)	2.81±0.44 (2.28~3.35)
Subway 2 line	5	6.23±2.38 (2.01~7.55)	6.25±2.55 (1.77~7.86)	3.37±0.37 (2.87~3.71)	5.09±3.48 (2.36~9.37)
Subway 3 line	5	5.92±2.13 (2.21~7.49)	6.73±2.56 (2.21~8.21)	2.99±0.38 (2.72~3.64)	3.48±1.12 (2.24~4.42)
Subway 4 line	5	4.87±1.66 (1.93~5.84)	5.04±1.65 (2.08~5.92)	3.04±0.74 (2.22~3.90)	3.18±0.64 (2.75~4.29)
KTX	20	2.72±0.64 (2.00~4.18)	2.70±0.63 (1.53~3.82)	5.04±1.46 (3.49~9.22)	5.66±1.71 (3.38~10.85)
ITX	11	3.10±0.37 (2.42~3.64)	3.04±0.45 (2.16~3.65)	7.95±1.89 (5.44~12.68)	7.27±2.16 (5.06~12.09)
Express bus	19	4.56±1.57 (1.60~7.66)	4.92±1.68 (2.27~8.33)	5.29±1.90 (1.66~9.36)	5.09±1.17 (2.46~6.91)

높게 나타난 계절은 비교적 환기량이 적은 겨울이고, 혼잡시간대 TVOC 농도가 비혼잡시간대에 비해 조금 더 높게 조사되었다.¹⁵⁾ An 등(2018)은 하계와 추계 동안 비혼잡시간대와 혼잡시간대를 구분하여 시외버스 내 TVOC 농도를 측정된 결과, 하계 비혼잡시간대에는 $137.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 혼잡시간대에는 $120.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었으며, 추계 비혼잡시간대에는 $153.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 혼잡시간대에는 $177.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 조사되었다.^{23,24)} 본 연구 결과에서는 고속버스 내 TVOC의 농도가 동계에 비해 하계에 높게 나타났는데 이는 계절적 영향에 의한 차량 실내 농도 상승 및 에어컨 작동 등으로 인한 밀폐 시간 증가 등에 의해 농도 변화에 영향을 끼친 것으로 판단된다.

3.2. HCHO

고속버스 내 HCHO 평균 농도는 혼잡시간대에 $27.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 비혼잡시간대에 $22.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 혼잡시간대와 비혼잡시간대의 HCHO가 비슷한 농도 수준을 보이기 때문에 시간대별 영향 요인이 작용하는 것으로 판단하기는 힘들다. 계절에 따른 농도 변화를 살펴보면 동계에 비해 하계의 농도가 더 높게 나타났고, 기준치 초과 사례는 단 한 건도 나타나지 않았다. 이는 하계의 경우 외부 온도가 동계에 비해 높아질 뿐만 아니라 에어컨 등과 같은 공조시스템 작동 등에 의한 요인이 작용하는 것으로 판단된다.

국립환경과학원의 연구 조사에 따르면 2005년 신축 아파트를 대상으로 실내공기질 측정 결과 여름철 온도와 습도가 올라가면 일시적으로 증가하는 현상을 확인했다²⁵⁾. 또한 Community-COST Concentration Committee (1990)는 영국의 일반 주택의 실내 포름알데히드 농도는 겨울에는 $34 \pm 28 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 여름에는 $57 \pm 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다.²⁶⁾

4. TVOC 물질별 비교

4.1. Benzene

Benzene 농도를 Table 1에 제시하였다. Benzene 농도의 경우, 상대적으로 동계보다는 하계에 높은 농도 수준을 보였으며, 혼잡시간대와 비혼잡시간대에 따라 농도의 차이는 보이지 않았다. 모든 측정 대상의 동계와 하계, 혼잡시간대와 비혼잡시간대를 비교한 결과, ITX의 동계 혼잡시간대에 benzene 농도가 $7.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높게 나타났다. 본 연구의 모든 교통 수단의 benzene 농도의 경우 ‘신규제작 자동차 실내공기질 관리기준, 국토해양부, 2019’을 참고하여 비교하였을 때, benzene 농도 관리기준 $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 낮은 수준으로 조사되었다. 하지만 benzene의 경우 IARC (International Agency for Research on Cancer)에서 1급 발암물질로 지정된 물질이다.²⁷⁾ 뿐만 아니라 세계 보건기구(WHO)에서도 benzene에 대하여 안전 노출 한도가 없음을 설명했다.²⁸⁾

Table 2. Concentration of toluene in public transportation ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Public transportation	N	Summer		Winter	
		Congested	Non-congested	Congested	Non-congested
Subway 1 line	5	174.57±78.43 (53.63~256.57)	183.89±93.41 (63.72~284.90)	37.74±23.02 (14.55~75.04)	40.92±21.60 (23.49~73.38)
Subway 2 line	5	260.00±86.98 (127.90~366.22)	510.75±270.01 (139.64~803.68)	33.75±18.30 (18.46~60.01)	48.29±32.87 (20.46~105.37)
Subway 3 line	5	393.52±194.89 (120.94~617.15)	378.15±217.57 (140.47~692.90)	50.95±29.06 (13.25~92.68)	24.90±9.13 (11.62~33.60)
Subway 4 line	5	271.20±127.08 (89.07~446.76)	294.79±139.00 (85.37~449.99)	60.91±31.68 (21.92~101.90)	50.75±22.12 (30.37~88.23)
KTX	20	88.50±160.20 (14.30~733.06)	62.84±43.96 (3.82~168.49)	13.13±6.91 (6.64~29.98)	13.41±4.17 (7.10~23.09)
ITX	11	245.65±73.73 (154.68~358.47)	238.10±213.88 (131.69~869.80)	57.80±44.04 (16.07~164.06)	68.25±56.43 (19.41~181.60)
Express bus	19	125.88±74.08 (32.50~277.44)	136.04±112.77 (18.62~486.77)	111.44±59.98 (0.19~224.52)	120.49±84.82 (0.22~251.41)

Table 3. Concentration of ethyl benzene in public transportation ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Public transportation	N	Summer		Winter	
		Congested	Non-congested	Congested	Non-congested
Subway 1 line	5	24.22±13.42 (6.87~43.10)	24.50±11.23 (9.79~34.07)	4.93±2.32 (2.38~7.74)	6.38±4.98 (0.40~12.42)
Subway 2 line	5	44.59±16.04 (19.42~62.09)	54.92±17.56 (25.95~71.78)	6.31±4.22 (0.40~10.31)	4.94±5.85 (0.40~14.88)
Subway 3 line	5	45.84±18.32 (20.38~67.62)	49.87±33.93 (14.67~105.19)	4.27±2.37 (1.65~7.53)	2.95±1.63 (0.40~4.69)
Subway 4 line	5	24.15±2.52 (21.77~28.08)	20.23±2.64 (15.93~23.06)	4.77±1.74 (2.97~7.21)	3.29±2.19 (1.67~7.09)
KTX	20	13.32±25.77 (2.88~117.43)	8.06±5.30 (0.88~21.56)	2.74±1.54 (1.13~7.93)	2.40±0.79 (0.64~3.67)
ITX	11	27.63±9.64 (14.32~41.83)	25.88±11.12 (12.92~52.76)	12.60±10.14 (4.89~38.82)	21.59±17.10 (3.68~52.10)
Express bus	19	15.12±8.14 (4.11~28.11)	23.23±29.34 (3.57~137.62)	12.09±8.23 (0.36~34.98)	8.68±4.27 (0.40~14.23)

4.2. Toluene

Toluene 농도를 Table 2에 제시하였다. Toluene 농도의 경우, 측정대상 모두에서 동계보다는 하계에 높은 농도 수준을 보였으나 혼잡시간대와 비혼잡시간대를 비교하였을 경우, 뚜렷한 경향성은 보이지 않았다.

특히, 하계의 지하철 3호선에서 혼잡시간대에 TVOC 농도가 $393.52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었으며, 지하철 2호선 비혼잡시간대에 $510.75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 측정되어 다른 연구 대상들에 비하여 높은 농도 수준을 보였다. 이는 다

른 열차들(1994-2008년식)에 비하여 지하철 3호선(2009-2010년식)의 경우 출고일이 최근이기에 이와 같은 결과를 보였다고 사료된다. Yun 등(2007)의 연구에서 자동차 신차의 실내에 발생하는 휘발성유기 화합물 중 60일이 경과 되어도 기준치 이하로 저감되지 않는 물질로 toluene을 확인했다.²⁹⁾

4.3. Ethyl benzene

Table 3에 제시된 ethyl benzene 농도의 경우, 다

Table 4. Concentration of xylene in public transportation ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Public transportation	N	Summer		Winter	
		Congested	Non-congested	Congested	Non-congested
Subway 1 line	5	17.80±8.65 (3.52~25.56)	17.81±7.89 (6.77~24.90)	3.34±1.49 (1.58~4.64)	4.45±1.85 (2.69~6.65)
Subway 2 line	5	26.93±6.15 (16.66~31.95)	32.36±9.06 (16.19~37.36)	9.55±4.17 (6.38~15.69)	3.91±1.30 (2.01~5.23)
Subway 3 line	5	36.87±25.05 (19.21~81.02)	36.27±26.79 (12.93~79.61)	2.68±1.51 (0.97~4.70)	1.61±0.80 (0.76~2.88)
Subway 4 line	5	13.33±0.65 (12.19~13.85)	12.64±2.80 (8.14~15.30)	3.60±1.26 (2.07~5.49)	2.49±1.28 (1.43~4.34)
KTX	20	6.35±5.96 (1.99~25.12)	5.66±3.59 (0.63~14.38)	1.94±0.73 (1.12~3.63)	1.88±0.47 (0.66~2.65)
ITX	11	34.02±12.80 (17.04~52.02)	31.28±15.17 (12.82~51.43)	9.78±7.66 (3.94~27.59)	33.83±47.22 (2.94~158.41)
Express bus	19	14.70±10.84 (3.94~51.93)	23.04±21.87 (3.39~98.37)	9.46±4.87 (0.45~16.18)	7.78±3.91 (0.50~14.96)

른 물질과 마찬가지로 동계보다는 하계에 높은 농도 수준을 보였다. 또한, 시간대별로 비혼잡시간대와 혼잡시간대로 구분하였을 경우 측정 농도가 뚜렷한 경향성을 보이지는 않았다. 특히, 하계의 지하철 2호선 혼잡시간대와 비혼잡시간대의 농도가 각각 44.59, 54.92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 다른 측정 대상에 비하여 높은 농도로 조사되었다. Lau 등(2003)의 연구에서 본 연구와 비슷한 조건의 냉방 시설이 작동하는 버스나 MTR 열차의 ethyl benzene 농도가 다른 교통수단보다 높게 측정된 것을 확인하였다.³⁰⁾

4.4. Xylene

Table 4에 제시된 xylene 농도의 경우, benzene, toluene, ethyl benzene과 마찬가지로 동계보다는 하계에 높은 농도 수준으로 측정되었다. 혼잡시간대와 비혼잡시간대를 비교하였을 경우, 시간대별 농도 차이에 뚜렷한 상관성이 없었으며 혼잡시간대와 비혼잡시간대의 농도는 비슷한 수준을 보였다. 하계의 ITX에서 가장 높은 농도 수준을 보였으며 혼잡시간대에는 34.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 비혼잡시간대에는 31.28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 측정되었다.

본 연구의 제한점으로는 2계절(하계/동계) 측정 데이터 값을 이용한 점, 대중교통수단별 개별 분석을 통한 오염원 발생에 대한 연관성을 분석하지 못한 점이다. 따라서 향후 이를 고려한 대중교통 내 실내

공기질의 다양한 실태조사가 검토되어야 할 것이라고 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서 조사한 대중교통차량은 하계, 동계 모두 계절 동안 서울 지하철 및 열차(KTX, ITX), 고속버스를 대상으로 혼잡시간대와 비혼잡시간대를 구분하여 측정을 진행하였다.

지하철의 TVOC의 경우, 대체적으로 하계의 농도가 동계에 비하여 평균적으로 높게 측정되었다. 또한, 비교적 최근에 출고된 차량(2008~2010년식)에서 다중이용시설 실내공기질 기준치 초과사례는 있었으나, 뚜렷한 경향성은 보이지 않았다. KTX의 경우, 동계와 하계 두 계절의 평균 농도를 비교하였을 때, 동계의 평균농도가 하계의 평균 농도 보다 높게 측정이 되었으나 동계나 하계의 평균 농도 모두 다중이용시설 실내공기질 기준치와 비교하였을 경우 초과 사례는 없었다. ITX의 경우, 동계의 TVOC 평균 농도가 하계보다 높게 측정이 되었으며, 비혼잡시간대 농도가 혼잡시간대의 농도보다 높게 조사되었다. 고속버스의 TVOC의 경우 비혼잡시간대의 농도가 혼잡시간대의 농도보다 높게 측정되었으며, 다중이용시설 실내공기질 기준치 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 비교하였을 때, 차량연식(2004~2013년)의 차량에서 초과 사례가

몇 건 있었으나, 뚜렷한 경향성은 보이지 않았다.

TVOC를 개별 물질로 비교한 결과, benzene, toluene, ethyl benzene, xylene 모두 동계보다는 하계에 비교적 높은 농도 수준을 보였으나, 혼잡시간대와 비혼잡시간대를 비교하였을 경우 시간대별 농도 차이의 경향성은 보이지는 않았다. 또한, '신규제작 자동차 실내공기질 관리기준'과 비교하였을 경우 모든 물질이 기준치보다 낮은 수준으로 조사되었다.

HCHO의 경우, 지하철에서는 하계보다는 동계에 HCHO의 농도가 높게 측정되었으며 기차와 버스에서는 동계보다는 하계에 HCHO 농도가 높게 조사되었으나 모든 조사 대상들은 다중이용시설 기준치에 비해 낮은 농도 수준을 보였다.

References

1. Kim YS, Hong SC, Jeon JM. An Investigation of Indoor Air Quality of Public Transportation System in Seoul City. *Kor J. Env. Hlth. Soc.* 1994; 20(1): 28-38.
2. Statistics KOREA Government Official Work Conference. Public transport distribution rate. Available: <http://index.go.kr/unify/idx-info.do?idxCd=4081> [accessed 12 April 2019].
3. Sakong K, Baek SO, Jeon MJ. Formaldehyde, Volatile Organic Compounds inside Newly Produced Vehicle and Neurobehavioral Performance of Vehicle Drivers. *J. Odor Indoor Environ.* 2009; 6(2): 111-122.
4. Oh YH, Nam IS, Kim SD, Kim DS, Park DS, Kim JH, et al. Health Risk Assessment for Heavy Metals in Particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5}) of Indoor Air in Subway Station. *J. Korean Soc. Living Environ. Sys.* 2013; 20(1): 29-36.
5. Kim YS, Kim MK. Indoor and Outdoor Formaldehyde Concentrations in Underground Environments. *Kor. J. Env. Hlth. Soc.* 1989; 15(2): 1-9.
6. Lee EH, Kim YS, Chung SH, Jang GH. Emission characteristics of vocs and hcho from test bags for vehicle interiors after pre-hear treatment. *Korean Journal of Odor Research and Engineering.* 2009; 8(1): 40-49.
7. Kim YS. A Study on Organic Solvent Exposure in Painting Operation of Automobile Manufacturing Industry. *Kor. J. Env. Hlth. Soc.* 1994; 20(4): 10-16.
8. Choi SY. A Study on the Volatile Organic Compounds Analysis Method for Visible Light-Responsive Photocatalyst Treated Vehicle Interior Materials. *Elastomers and composites.* 2013; 48(3): 221-224.
9. Yoo HC, Noh KH. The assessing the hvac system and measurements of indoor air quality of highway bus. *The Korean Solar Energy Society.* 2009; 263-268.
10. Ministry of Environment. Management and Survey of Indoor Air Quality in Transportation. Available: <http://library.me.go.kr/search/DetailView.ax?sid=1&cid=156806> [accessed 30 April 2019].
11. Korea Ministry of Government Legislation. Guidelines for Construction and Operation of Public Transport Vehicles for Indoor Air Quality Management. Available: <http://www.law.go.kr/LSW/adm-RulLInfoP.do?admRulSeq=2100000073832> [accessed 30 April 2019].
12. Hwang SH, Kim JO. Evaluation of Exposure Characteristics of Fine Dusts by Subway Lines. *J Environ Health Sci.* 2017; 43(1): 71-76.
13. Namgung HK, Song JH, Kim SY, Kim HM, Kwon SB. Characteristics of indoor air quality in the overground and underground railway stations. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society.* 2016; 17(5): 17-25.
14. Korean Federation for Environmental Movements. Survey report on harmful substances generated during air conditioner repair work in subway station. Available: <http://kfem.or.kr/?p=19933> [accessed 30 April 2019].
15. Lee JH, Yoon SY, An SM, Nam YH, Kim HH. Analising of total volatile organic compounds (TVOCs) exposure in public transportation during operation. *J. Odor Indoor Environ.* 2019; 18(1): 67-75.
16. Park DS, Bae SH, Jung WS, Lee DH, Kim DS. Characterization of Volatile Organic Compounds Exhausted from Railroad Diesel Rolling Stocks. *Proceeding of the 36th Meeting of KOSAE.* 2003. 382-383.
17. Cho YM, Park DS, Kwon SB, Park EY. Characterization of Volatile Organic Compounds Emission from Interior Materials of Railway Passenger Cabin. *The Korean Society for Railway.* 2008; 11(2): 182-187.
18. Cho EJ, Kwak J. Characterization of Indoor Air Quality in Underground Shopping Centers in Busan. *The Annual Report of Busan Metropolitan city Institute of Health & Environment.* 2012; 22(1): 124-141.
19. Maekyung media. Indoor air quality of Subway and KTX: Serious. Available: <https://www.mk.co.kr/news/>

- home/view/2005/09/336783/ [accessed 30 April 2019].
20. Jo YM, Park DS, Gwon SB, Park EY. Study on the Change of the Indoor Air Quality Inside KTX Passenger Cabin under Service. Proceeding of the 43rd Meeting of KOSAE(2006) Korean Society for Atmospheric Environment. 2006; 553-554.
 21. Yeo HG, Cho KC, Lim CS, Choi MH, Sunwoo Y. Characteristics of Seasonal Source Formaldehyde and Acetaldehyde in Metropolitan Areas. *J KOSAE*. 2002; 18(1): 11-23.
 22. Fedoruk MJ, Kerger BD. Measurement of volatile organic compounds inside automobiles. *Journal of Exposure Analysis Environmental Epidemiology*. 2003; 13(1): 31-41.
 23. 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.
 24. An SM, Lee JS, Shin IK, Kim HH. A study on the effect on indoor air quality by ventilation system operation in buses. *J. Odor Indoor Environ*. 2018; 17(4): 346-354.
 25. The Science Times. Apartment indoor air pollutant was increases in summer. Available: <https://www.sciencetimes.co.kr/?news=%EC%95%84%ED%8C%8C%ED%8A%B8-%EC%8B%A4%EB%82%B4%EA%B3%B5%EA%B8%B0-%EC%9C%A0%ED%95%B4%EB%AC%BC%EC%A7%88-%EC%97%AC%EB%A6%84%EC%97%94-%EC%A6%9D%EA%B0%80> [accessed 30 April 2019].
 26. Commission of the European Communities. Indoor Air Pollution by Formaldehyde in European countries (Report No. 7 EUR 13219 EN 1990). Available: http://www.inive.org/medias/eca/eca_report7.pdf [accessed 30 April 2019].
 27. International Agency for Research on Cancer (IARC). 2016. Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to human. Available: <https://monographs.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/08/14-002.pdf> [cited 2019 Feb 19]
 28. World Health Organization (WHO). Air quality guidelines for Europe, 2nd ed. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe. 2000; p.1-273.
 29. Yun JH, Yoo SE, Kim HJ, Kim SM. Analytical Studies on Volatile Organic Compounds from New Automotive Interior Parts. *Journal of Adhesion and Interface*. 2007; 8(1): 1-7.
 30. Lau WL, Chan LY. Commuter exposure to aromatic VOCs in public transportation modes in Hong Kong. *Sci Total Environ*. 2003; 308(1-3): 143-155.

<저자정보>

곽윤경(연구원), 이정훈(연구원), 전보일(연구원), 양호형(연구원), 김호현(교수)