

자동차 캐빈 공기질 제어를 위한 적정 입자청정횟수 평가

노광철^{1*} · 김태욱¹⁾ · 김상우¹⁾ · 황청하¹⁾ · 한방우²⁾

¹⁾에어랩 주식회사

²⁾한국기계연구원, 도시환경연구소

(투고 2024년 4월 11일, 수정 2024년 5월 10일, 게재확정 2024년 5월 12일)

Evaluation of proper particle cleaned air delivery per hour (PCH) for controlling indoor air quality in passenger car cabin

Kwang Chul Noh^{1*}, Tae Wook Kim¹⁾, Sang Woo Kim¹⁾, Cheong Ha Hwang¹⁾, Bangwoo Han²⁾

¹⁾*Air Lab, Inc.*

²⁾*Department of Urban Environment Research, Korea Institute of Machinery & Materials*

(Received April 11 2024; Revised May 10 2024; Accepted May 12 2024)

Abstract

In this study, an empirical study was conducted to investigate the clean air delivery rate (CADR) and the proper particle cleaned air delivery per hour (PCH) of the air cleaning device installed in passenger car cabin. Changes in internal particle concentration were measured in the cabins of the pick-up type engine-driven car and the electric vehicle depending on cabin air filters, ventilation modes, and blower settings. In the tested cars, PM_{2.5} collection efficiency of the HEPA filter was higher than that of the genuine filter. The PM_{2.5} collection efficiency of each cabin air filter was measured to be similar regardless of the blower setting of the tested cars. This means that the higher the blower setting, the higher the CADR and the PCH. The infiltration rate varies depending on the air tightness of the car. The cabin was more contaminated with particles under driving. From the CADRs measured inside the passenger car cabin, the recirculation mode of HVAC system is a more effective for managing ultrafine particles than the fresh air mode. From a few assumptions, the proper PCH was derived about 0.8 times/min (48 times/h). From this result and several experiments, the proper operation setting of air cleaning device installed inside cars can be found out to control indoor air quality. Also, an appropriate operation settings of HVAC system can be found with considering cooling and heating conditions for thermal comfort in passenger car cabin.

Keywords: air cleaning, car cabin, fine particles, indoor air quality, particle cleaning per hour

* Corresponding author.

Tel : +82-62-222-7617, Fax : +82-504-341-7697

E-mail : creative@c-airlab.com

1. 서론

한국인은 24시간 중에서 20.3 시간을 건물 등의 실내에서 거주하고 교통수단(자동차, 버스, 지하철 등) 등의 캐빈에서 머무르는 시간이 약 3시간으로 조사되었다(Choi et al., 2013). 한편, 미국 거주자들의 실내 거주 시간을 조사한 결과에 따르면, 24시간 중 건물 및 자동차 등의 실내에서 거주하는 시간이 22.8 시간이었고, 실외에서 보내는 시간은 약 1.2시간에 불과한 것으로 보고되었다(Robinson and Nelson, 1995).

차량 운전시 배출되는 공기오염물질로 인해 도로에서의 공기오염물질 농도는 일반 대기보다 높아지고, 이렇게 오염된 도로상의 공기가 차량 실내로 유입되기 때문에 캐빈 내부의 공기오염물질 농도는 증가된다(Fischer et al., 2000). 주택이나 일반 건물에 비해 자동차 캐빈에 머무르는 시간이 하루에 2시간 정도로 적지만, 고농도의 도로 오염물질에 노출되기 때문에 노출량은 적지 않은 수준일 것이다. 따라서 교통수단 캐빈 내부에서의 공기질 관리는 매우 중요하다.

자동차 캐빈 내부에서는 공기질뿐만 아니라 온열환경이나 열쾌적감을 적절하게 유지하는 것도 중요하다. Kristanto and Leephakpreeda (2017)는 자동차 캐빈에서 열쾌적감과 공기질을 적정하기 유지하기 수학적 모델링과 실험을 동시에 수행하였고 이 지표들이 에너지 소비량과 상충관계라고 설명하였다. Brusey et al. (2017)은 캐빈의 온도조절시스템은 열쾌적감보다 온도 제어를 목표로 하기 때문에 에너지 소비적인 경향성을 보인다고 보고하였다. 이를 해결하기 위하여 제어알고리즘을 제시하였고 이를 통하여 에너지소비량 절감과 열쾌적감을 향상시킬 수 있는 결과를 도출하였다. 자동차 실내는 도로의 오염상태와 운전조건, 환기 장치의 운전모드에 따라 공기질이 크게 달라질 수 있고 승객들이 빌딩증후군과 유사한 증후군을 겪을 수 있다(Tong et al., 2019). 또한 Barnes et al.의 연구(2018)에서는 51대의 차량 내부에서 $PM_{0.3}$, $PM_{2.5}$, TVOC, CO, CO_2 , 박테리아, 곰팡이 등을 조사하였다. $PM_{2.5}$ 는 주행 중 농도가 감소하였지만 $PM_{0.3}$ 은 감소하지 않았고, 24%의 차량 내부에서 TVOC의 권장치를 초과하였으며 CO_2 는 96% 차량에서 1,000 ppmv를

초과하는 것으로 나타났다. 자동차 캐빈에서의 공기질이 운전자의 인지기능에 영향을 미친다는 연구결과도 있다(Hofman, J. and Manna, V.P., 2000). 이 연구에서는 환기 모드 세팅에 따라 CO_2 가 2,000 ppmv를 초과할 수 있고 내부순환 모드에서는 $PM_{2.5}$, PM_{10} 이 각각 44-59%, 53-64% 감소할 수 있기 때문에 센서를 통한 자동제어의 중요성을 설명하였다.

이상의 연구들에서 제시한 바와 같이 자동차 캐빈에서의 공기질 관리가 매우 중요하다. 특히 환기 모드(외기도입과 내부순환)에 따라 $PM_{2.5}$ 와 CO_2 와 같이 실내 오염물질 간 상충관계(trade-off)가 형성될 수도 있다. 그리고 자동차 차종별로 침기량이 다르고 제조사에서 공조 블로어의 스피드 변화에 따른 풍량정보를 제공하지 않고 있다(Lesage et al., 2021). 이러한 이유로 자동차 캐빈 내부 공기질 관리를 위한 풍량과 캐빈 에어 필터 성능에 대한 정량화에 어려움이 많다.

본 연구에서는 자동차에 부착된 공기정화장치가 캐빈 내부의 입자농도를 제어할 수 있는지에 대한 기초적인 실증 연구를 수행하였다. 내연기관차와 전기차 2종에 대해 캐빈 에어필터와 환기모드, 블로어 풍량을 바꾸어 가면서 내부 입자농도의 변화를 살펴보고 공기정화장치의 청정화능력을 분석하여 적정 입자청정횟수를 도출하는데 사용하였다.

2. 입자청정횟수

2.1 자동차 캐빈 공기정화 원리

그림 1은 자동차 캐빈에서 실내공기질 제어를 위한 공기흐름의 개략도를 보여준다. 신선 외기도입은 차량 앞부분에서 이루어지며 에어필터를 거치면서 필터의 성능에 따라 일정량의 입자가 제거된 후 캐빈 실내로 보내진다. 이러한 방법은 이산화탄소, TVOC와 같은 내부 발생 가스상 오염물질을 감소하는데 효과적이다. 또 다른 방법으로 내부순환 모드로 전환하여 실내에 있는 입자를 제거하는 방법이다. 이 방법은 캐빈 내부 냉난방을 유지하고 입자상 물질을 빠르게 제거하는데 유효하지만, 이산화탄소와 TVOC와 같은 내부 발생 오염물질 농도를 악화시키게 된다. 이와 같이 자동차 공조 장치는 운전 모드에 따라 환기장치와 공기청정기 역할

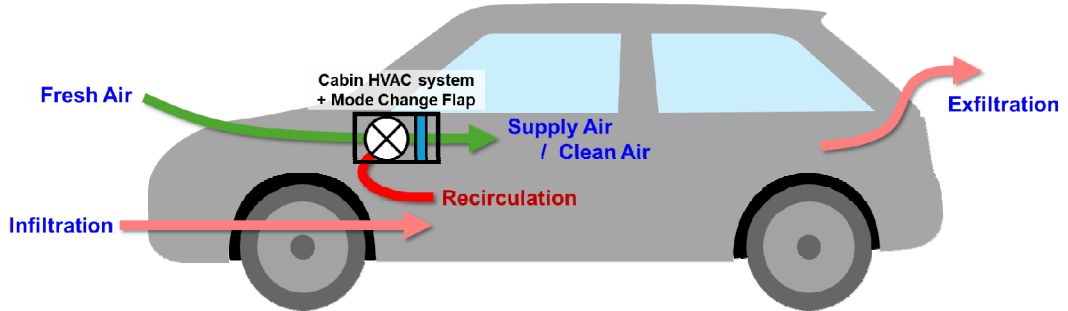


Figure 1 Overview of the air circulation for controlling indoor air quality in car cabin

을 수행하고 있으며, 외기도입 모드는 환기장치, 내부 순환 모드는 공기청정기의 역할과 비슷하다고 볼 수 있다. 미세먼지가 이슈가 부각되면서 자동차용 공기청정기가 개발되어 판매되고 있다.

2.2 공기정화장치 정확성능 평가지표

공기정화장치의 정확성능은 청정화능력(clean air delivery rate, CADR)으로 표현된다(Noh and Oh, 2015; Noh, 2015; Noh and Yook, 2016). 청정화 능력은 공기정화장치가 특정 오염물질을 제거하고 대상공간으로 공급하는 청정 풍량을 의미한다. 단위는 m³/min, m³/hour 이다. 본 연구에서는 PM_{2.5}를 대상으로 청정화능력을 측정하였다.

환기장치와 공기청정기의 청정화능력은 입자의 질량 보존방정식으로부터 유도할 수 있으며 자세한 유도 방법은 논문(Noh and Yook, 2016)을 참고한다. 환기장치의 청정화능력은 필터효율과 풍량, 실내외농도비, 공기순환효율의 함수이고 공기청정기의 청정화능력은 필터효율, 풍량, 공기순환효율의 함수이다. 여기서 공기순환효율이란, 공기정화장치에 의해 토출된 공기가 배출 또는 재유입될 때까지의 공기흐름의 정도를 나타낸다. 대상공간의 크기에 맞게 적정 용량으로 설치된 공기청정기는 0.7~0.9의 공기순환효율을 갖는다(Noh and Oh, 2015; Kim et al., 2012). 그러나, 자동차 캐빈 내부는 청정공기 유입부와 배출부의 위치, 시트 배치, 운전자, 승객들로 인하여 공기순환효율이 매우 낮을 것으로 판단된다.

실내 공간에서 공기정화장치의 청정화능력을 체계적

로 나눈 값을 공기청정횟수(clean air delivery per hour)라고 한다(Noh, 2022; Noh, 2022). 공기청정 횟수는 대상 오염물질별로 다르게 표현될 수 있다. 미세먼지를 대상 오염물질로 규정한다면 입자청정횟수 (particle cleaned air delivery per hour, PCH)로 쓸 수 있고 가스상 오염물질을 대상으로 한다면 가스청정횟수(chemical cleaned air delivery per hour, CCH)로 표현된다.

유사한 개념인 환기횟수(air changes per hour, ACH)는 외기 공급량을 실제적으로 나눈 값이다. 환기횟수는 오염물질의 필터링 효과를 고려하지 않지만, 공기청정횟수는 오염물질의 제거효과를 포함하고 있다. 식 (1)과 (2)는 환기횟수와 입자청정횟수의 식을 보여준다.

$$\text{Air Changes per Hour} = \frac{\text{Ventilation flow rate}}{\text{Space volume}} [1/h] \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Particle Cleaned air delivery per Hour} \\ = \frac{\text{Clean air delivery rate}}{\text{Space volume}} [1/h] \quad (2) \end{aligned}$$

본 연구에서는 자동차 캐빈에서 공기정화장치의 청정화능력을 측정, 분석하였고 이를 통해 입자청정횟수를 도출하였다.

3. 실험방법

3.1 실험 조건

본 연구에 사용한 자동차는 2종으로 픽업형 내연기관차와 세단형 전기차이다. 내연기관차와 전기차의 캐

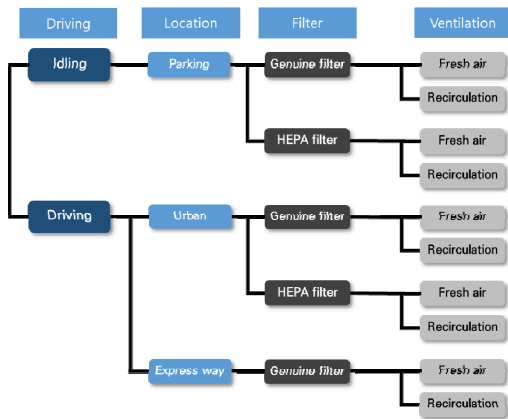


Figure 2 Test conditions for investigating indoor air quality in car cabin

빈 내부 체적은 각각 약 4 m³, 3.23 m³ 으로 내연기관차는 실측값이고 전기차는 제원이다.

캐빈 내부에서 공기정화장치의 청정화능력, 입자청정횟수 등을 측정하기 위하여 그림 2와 같은 다양한 조건에서 실험을 수행하였다. 이는 자동차가 실제 겪는 다양한 상황을 반영한 것이다. 공회전과 주행, 도심주행(60 km/h 이하)과 고속주행(60 km/h 이상)은 도로 조건을 반영한 것이다. 캐빈 에어필터는 순정필터(genuine filter)와 HEPA 필터를 사용하였다. 환기모드는 외기도입(fresh air)과 내부순환(recirculation)으로 구분하였다. 블로어 풍량 세팅은 2단, 4단, 6단, 8단으로 구분하였으며 이는 자동차 캐빈 블로어의 풍량을 정확하게 측정하기 어렵기 때문이다.



Figure 3 Measurement location

3.2 캐빈 내부 입자농도 측정방법

그림 2에 제시된 최종 단의 실험 조건에서 최소 3회 이상의 실험을 수행하였으며 평균값으로 결과를 도출하였다.

측정항목은 PM_{2.5}만을 이용하여 결과를 도출하였다. 이를 위한 측정장치로 2종의 광학식입자계수기(optical particle counter)를 사용하였고 GRIMM사의 1.109와 에어랩의 Airwatch이다.

그림 3은 입자농도 측정 위치를 보여주고 있다. 캐빈 내부에서 입자농도의 변화를 측정하는 위치는 시트 2열 중앙부이다. 여기서 측정된 결과를 캐빈 내부 농도로 가정하였다. 캐빈 공기정화장치의 집진효율은 외기도입 모드에서 캐빈 외기 도입부의 농도와 캐빈 내부 토출구에서의 농도를 이용하여 측정하였다. 2대의 광학식 입자계수기로 동시에 측정한 결과를 사용하여 공기정화장치의 집진효율을 계산하였다.

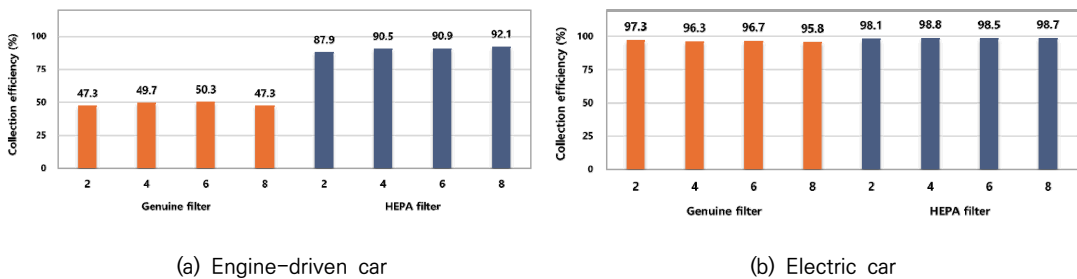


Figure 4 Collection efficiency of PM_{2.5} in the fresh air ventilation mode of cabin HVAC system with different air filters

4. 실험결과

4.1 캐빈 공기정화장치 집진효율

그림 4는 외기도입 모드에서 측정된 캐빈 공기정화장치의 집진효율을 보여준다. 순정필터에 비해 HEPA 필터가 채용된 캐빈 공기정화장치의 집진효율이 높은 것으로 나타났다. HEPA 필터를 적용했음에도 불구하고

99.95% 이상의 HEPA 등급 성능이 나오지 않는 것은 에어필터 또는 에어필터 체결부의 누설이 존재하기 때문이다. 풍량 세팅에 관계없이 캐빈 공기정화장치의 집진효율은 유사한 값을 보였으며 이는 실험에 사용한 대기 입자에 0.5 μm 보다 큰 입자들이 다수 포함되어 있기 때문으로 판단된다. 내부순환 모드에서 측정된 집진효율도 외기도입 모드와 비슷한 값을 보여주었다.

Table 1 Clean air delivery rate of PM2.5 for the fresh air mode of the engine-driven car [unit : m^3/min]

Filter	Genuine filter				HEPA filter			
	2	4	6	8	2	4	6	8
Blower Setting	2	4	6	8	2	4	6	8
Idling	0.15	0.16	0.17	0.25	0.88	0.88	1.86	2.48
Driving	-0.11	-0.07	0.10	0.14	0.43	0.83	0.82	1.37
Infiltration	0.26	0.23	0.07	0.11	0.45	0.05	1.04	1.11

Table 2 Clean air delivery rate of PM2.5 for the recirculation mode of the engine-driven car [unit : m^3/min]

Filter	Genuine filter				HEPA filter			
	2	4	6	8	2	4	6	8
Blower Setting	2	4	6	8	2	4	6	8
Idling	0.70	0.73	0.84	0.90	2.51	3.10	4.84	5.07
Driving	0.58	0.80	0.90	0.93	3.50	3.92	5.52	6.85
Infiltration	0.12	-0.07	-0.06	-0.03	-0.99	-0.82	-0.68	-1.78

Table 3 Clean air delivery rate of PM2.5 for the fresh air mode of the electric car [unit : m^3/min]

Filter	Genuine filter				HEPA filter			
	2	4	6	8	2	4	6	8
Blower Setting	2	4	6	8	2	4	6	8
Idling	1.83	3.75	4.00	4.00	2.65	3.89	4.22	4.63
Driving	4.16	4.91	4.59	4.09	3.17	5.58	5.33	6.34
Infiltration	-2.33	-1.16	-0.59	-0.09	-0.52	-1.69	-1.11	-1.71

Table 4 Clean air delivery rate of PM2.5 for the recirculation mode of the electric car [unit : m^3/min]

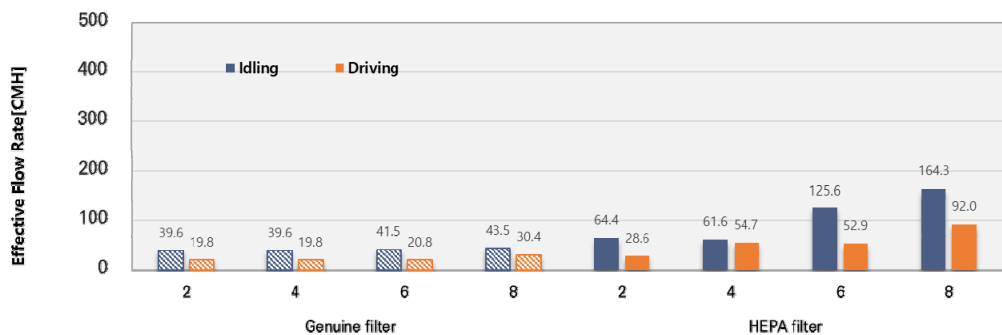
Filter	Genuine filter				HEPA filter			
	2	4	6	8	2	4	6	8
Blower Setting	2	4	6	8	2	4	6	8
Idling	2.51	3.83	4.10	4.25	2.60	4.30	5.28	6.36
Driving	3.36	4.65	5.45	5.94	4.00	4.74	6.18	7.06
Infiltration	-0.85	-0.82	-1.35	-1.69	-1.40	-0.44	-0.90	-0.70

4.2 공기정화장치 청정화능력

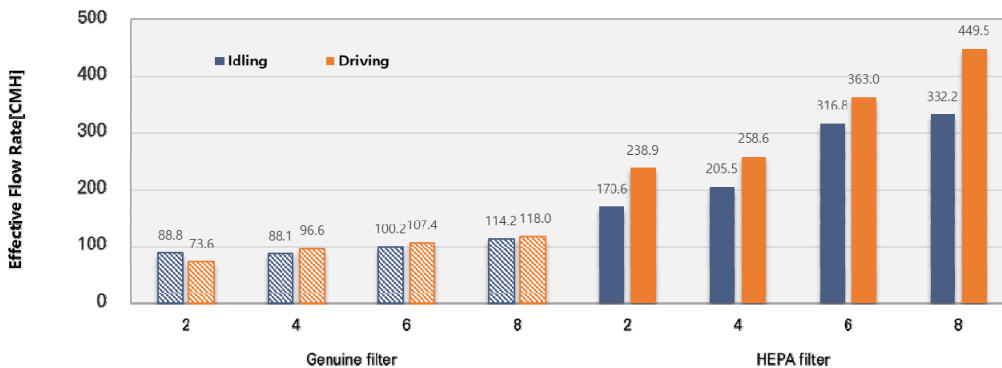
표 1과 2는 내연기관차에서 측정된 공기정화장치의 청정화능력이다. 청정화능력의 단위가 m^3/min 이기 때문에 $1 m^3/min$ 인 경우 분당 $1 m^3$ 의 초미세먼지 ($PM_{2.5}$)가 제거된 공기가 캐빈 내부로 공급된다는 의미이다. 청정화능력이 (-)값을 갖는 것은 캐빈 내부가 초미세먼지로 오염된다는 것을 의미한다. 침기량 (infiltration)은 정차상태(idling)의 청정화능력에서도 심주행상태(driving)에서의 청정화능력을 뺀 값으로 자동차의 주행으로 발생하는 침투하는 공기량을 의미한다. 침기량이 (+)값을 갖는 것은 침기가 되는 것을 의미하고 (-)값을 갖는 것은 캐빈 내부가 양압이 걸려 침기가 되지 않는 상태를 의미한다. 침기는 주로 캐빈 앞부분에 발생하고 캐빈필터 박스의 누설에 기인하는 것도 있다(Lesage et al., 2021).

대부분의 경우 블로어 세팅 값이 증가할수록 청정화 능력이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 그림 4에서 보는 바와 같이 공기정화장치의 집진효율이 비슷하고, 블로어 세팅 값이 커지면서 공급풍량이 증가하여 청정화 능력도 증가한 것이다(Noh and Yook, 2016). 그리고 HEPA 필터를 설치한 경우 순정필터에 비해 상대적으로 높은 청정화능력을 보여주었다.

연구에서 사용한 내연기관차는 외기도입 모드보다 내부순환 모드에서 상대적으로 높은 청정화능력을 보여주었다. 그리고 외기도입 모드에서는 정차상태의 청정화능력보다 주행상태의 청정화능력이 낮게 나타났고 이는 주행에 의해 침기가 발생하기 때문이다. 그러나 내부순환 모드에서는 대부분의 실험조건에서 침기가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 실험차의 외기도입 모드가 침기량 증가에 큰 영향을 미치는

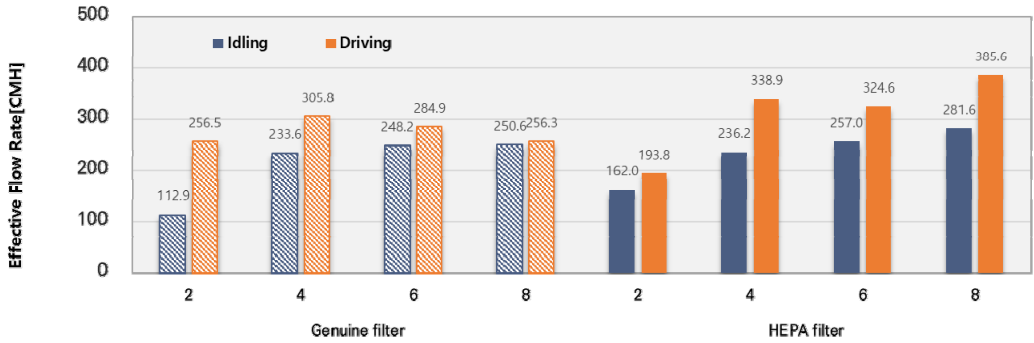


(a) Fresh air mode

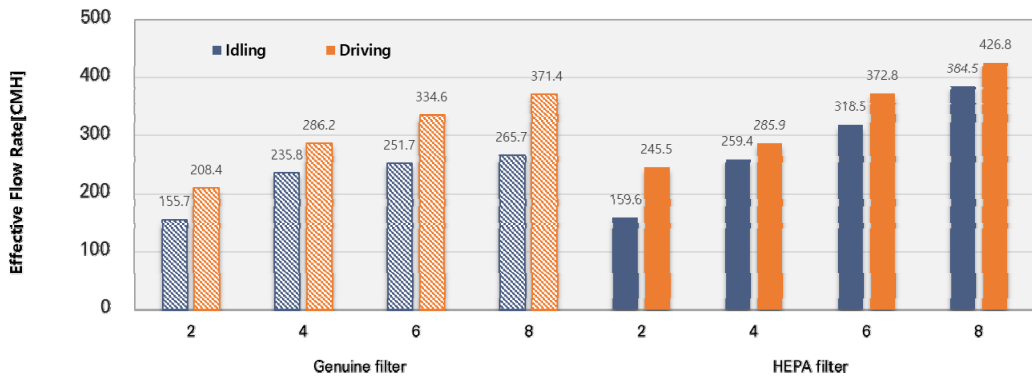


(b) Recirculation mode

Figure 5 Effective flow rates of the air cleaning device installed in the engine-driven car



(a) Fresh air mode



(b) Recirculation mode

Figure 6 Effective flow rates of the air cleaning device installed in the electric car

것으로서 판단되고 캐빈필터 박스에서 초미세먼지의 누설이 있을 것으로 추정된다.

표 3과 4는 전기차에서 측정된 공기정화장치의 청정화능력이다. 블로어 세팅값이 증가할수록 청정화능력은 증가하였다. 정차상태보다 주행상태에서 청정화능력이 높게 나타났는데 이는 칩기량이 거의 없고 주행에 의해 캐빈 공기흡입구로 유입되는 풍량이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 실험오차나 외기농도의 변화가 존재하는 것을 고려하더라도 공기정화장치의 청정화능력은 외기도입 모드보다 내부순환 모드에서 높게 나타났다.

연구에서 사용한 전기차의 공기정화장치 성능이 내연기관차에 비해 상대적으로 우수한 것으로 나타났다. 그러나, 이는 차종의 특성, 캐빈 내부의 구조와 체적, 차량 가격에 따른 기밀도의 차이, 적용된 필터의 종류 등에 기인한 것이기 때문에 단순 비교를 통한 오해는

없어야 한다.

4.3 유효풍량

자동차 캐빈에서 블로어 세팅에 따른 공급풍량을 측정하는 것은 매우 어려운 일이다. 그러나 청정화능력(CADR)에 관한 식(3)을 이용하여 초미세먼지를 제거하는데 기여한 유효풍량을 구할 수 있다.

$$CADR = \eta \times (\epsilon \times Q) \quad (3)$$

여기서, η 는 필터효율 [-], ϵ 은 공기순환효율 [-], Q 는 풍량 [m^3/min]이다. 유효풍량은 공기순환효율과 풍량의 곱으로 나타낼 수 있고, 측정된 청정화능력을 캐빈필터 효율로 나눈 값이다.

그림 5와 6은 내연기관차와 전기차의 유효풍량을 보

Table 5 Particle cleaned air delivery per hour for the fresh air mode of the engine-driven car [unit : m³/h]

Filter	Genuine filter				HEPA filter			
	2	4	6	8	2	4	6	8
Blower Setting	2	4	6	8	2	4	6	8
Idling	2.25	2.40	2.55	3.75	13.20	13.20	27.90	37.20
Driving	-	-	1.50	2.10	6.45	12.45	12.30	20.55

Table 6 Particle cleaned air delivery per hour for the recirculation mode of the engine-driven car [unit : m³/h]

Filter	Genuine filter				HEPA filter			
	2	4	6	8	2	4	6	8
Blower Setting	2	4	6	8	2	4	6	8
Idling	10.50	10.95	12.60	13.50	37.65	46.50	72.60	76.05
Driving	8.70	12.00	13.50	13.95	52.50	58.80	82.80	102.75

Table 7 Particle cleaned air delivery per hour for the fresh air mode of the electric car [unit : m³/h]

Filter	Genuine filter				HEPA filter			
	2	4	6	8	2	4	6	8
Blower Setting	2	4	6	8	2	4	6	8
Idling	33.99	69.66	74.30	74.30	49.23	72.26	78.39	86.01
Driving	77.28	91.21	85.26	75.98	58.89	103.65	99.01	117.77

Table 8 Particle cleaned air delivery per hour for the recirculation mode of the electric car [unit : m³/h]

Filter	Genuine filter				HEPA filter			
	2	4	6	8	2	4	6	8
Blower Setting	2	4	6	8	2	4	6	8
Idling	46.63	71.15	76.16	78.95	48.30	79.88	98.08	118.14
Driving	62.41	86.38	101.24	110.34	74.30	88.05	114.80	131.15

여준다. 대부분의 경우에 대해서 블로어 세팅이 높을수록 유효풍량이 증가하는 것을 볼 수 있다.

그림 5에서 보는 바와 같이 유효풍량은 주행상태보다 정차상태에서 높게 나타났다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 침기에 따른 영향으로 판단된다. 반대로 내부순환 모드에서는 정차상태에서의 유효풍량이 높게 나타났으며 HEPA 필터를 설치한 경우 매우 높은 값을 보여준다. 그리고 내연기관차 외기도입 모드의 유효풍량은 다른 경우들에 비해 상대적으로 낮게 측정되었다.

그림 6은 전기차의 유효풍량을 보여준다. 유효풍량은 대체로 순정필터보다 HEPA 필터가 높고 정차상태보다 주행상태에서 높은 값을 보였다. HEPA 필터를 설치한 경우 상대적으로 높은 유효풍량 값을 보였다.

4.4 입자청정횟수

표 5-8은 입자청정횟수이다. 이는 표 1-4의 청정화 능력에 단위 환산을 위해 60을 곱하고 캐빈 체적으로 나눈 값이다. 내연기관차의 경우 외기도입과 내부순환 모드에서 초미세먼지 제거능력이 큰 차이를 보이고 있다. 또한 HEPA 필터를 설치한 경우도 순정필터에 비해 높은 입자청정횟수를 보여준다. 전기차의 입자청정횟수는 내연기관차에 비해 매우 높은 값을 보여주었고 HEPA 필터를 설치하고 주행상태인 경우에 상대적으로 높은 값을 보였다.

자동차 캐빈에서의 적정 입자청정횟수 산정은 식(4)를 이용하여 대기조건과 캐빈 내부 목표농도, 목표농도 이하로 유지하기 위한 공기정화장치의 운전 시간으로 결정될 수 있다.

Table 9 In/out ratio with PCH and elapsed time

Elapsed time (min)	1	2	3	4	5	
PCH (/min)	0.2	0.82	0.67	0.55	0.45	0.37
	0.5	0.61	0.37	0.22	0.14	0.08
	0.8	0.45	0.20	0.09	0.04	0.02
	1	0.37	0.14	0.05	0.02	0.01
	2	0.14	0.02	0.00	0.00	0.00
	3	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00

$$\frac{C_{in}}{C_{out}} = \exp(-(PCH - ACH_{in,f}) \times t) \quad (4)$$

여기서, C_{in} 은 $PM_{2.5}$ 의 캐빈 내부 목표농도 ($\mu g/m^3$), C_{out} 은 대기조건($\mu g/m^3$), PCH 는 입자청정횟수(회/min), $ACH_{in,f}$ 는 침기횟수(회/min)이다.

표 9는 식(4)를 이용하여 목표 운전시간과 입자청정횟수를 변수로 계산한 실내외 농도비이다. 예를 들어, $PM_{2.5}$ 의 도로상 대기조건이 $50 \mu g/m^3$ 이고, 캐빈 내부 목표농도가 $10 \mu g/m^3$, 목표 운전시간이 2분이라면, 침기횟수를 포함한 적정 입자청정횟수는 약 0.8 회/min (48 회/h)이 된다.

이러한 기준을 근거로 연구에 사용한 내연기관차와 전기차의 초미세먼지 저감을 위한 공기정화장치의 운전조건을 설정한다면, 내연기관차의 경우 HEPA필터를 설치하고 내부순환 모드에서 블로어 세팅을 4단으로 가동하면 된다. 반면, 전기차의 경우 HEPA필터를 설치하고 외기도입 또는 내부순환 모드에서 블로어 세팅을 2단으로만 가동하면 조건을 만족시킬 수 있다.

서론에서 언급한 바와 같이 캐빈 내부에 있는 운전자와 동승자에서 발생하는 이산화탄소와 냄새, 내장재에서 발생하는 TVOC 등을 초미세먼지 저감과 함께 고려한다면, 내연기관차는 외기도입과 내부순환 모드를 번갈아서 조화롭게 사용해야 하지만, 전기차는 외기도입 모드 2단으로만 운전해도 될 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 자동차에 기본 장착된 공기정화장치의 청정화능력에 대한 실증 연구를 수행하였다. 내연기관차와 전기차 2종에 대해 캐빈 에어필터와 환기모드, 블로어 풍량을 바꾸어 가면서 내부 입자농도의 변화를 살펴보고 이를 통해 공기정화장치의 청정화능력과 적정 입자청정횟수를 도출하였다. 실험 대상차 모두에서 순정필터에 비해 HEPA 필터의 집진효율이 높게 나타났다. 특이한 것은 자동차의 블로어 세팅에 관계없이 에어필터의 효율은 거의 유사하게 측정되었다. 이로 인해 블로어 세팅값이 높아질수록 청정화능력과 입자청정횟수가 높게 나타났다. 자동차의 기밀도에 따라 침기량이 달라지게 되고 이로 인해 운전상태에서 캐빈 내부가 입자로 오염될 수 있음을 확인하였다. 캐빈 내부에서 측정된 청정화능력으로부터 외부도입 모드에 비해 내부순환 모드가 초미세먼지 관리에 더 효과적인 방법인 것을 알 수 있었다. $PM_{2.5}$ 의 도로상 대기조건이 $50 \mu g/m^3$ 이고, 캐빈 내부 목표농도가 $10 \mu g/m^3$, 목표 운전시간이 2분으로 가정하여 침기횟수를 포함한 적정 입자청정횟수를 계산하면 약 0.8 회/min (48 회/h)이 된다. 그리고 실내공간에서 가스상 오염물질 저감을 위한 인당 필요환기량 기준이 약 $25 m^3/h$ 이기 때문에 내연기관차와 전기차의 4인 기준 적정 가스청정횟수는 각각 25 회/h, 31 회/h가 된다. 이로부터 캐빈 내부 초미세먼지와 가스상 오염물질을 관리하기 위해서는 연구에 사용한 내연기관차는 외기도입과 내부순환 모드를 번갈아서 사용해야 하지만, 전기차는 외기도입 모드 2단으로만 운전해도 된다는 것을 알 수 있었다. 차종에 따라 달라지겠지만, 본 연구와 같은 몇 가지 실험을 통하여 자동차 공기정화장치의 운전 모드를 설정할 수 있고 이를 캐빈 냉난방과 함께 고려한다면 자동차 HVAC의 적정 운전 방안을 도출할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 산업통산자원부 알키미스트 과제인 “대기미세먼지 대응 상호협력 공기정화 자동차(과제번호 : 20007027)”의 지원을 받아 수행되었고 이에 감사드립니다.

References

- Choi, I.W., Lee, J.S., Kim, D.G., Ryu, H.R., Kim, T.H., Lee, S.M., Lee, J.Y., Choi, Y.H., Kim, H.J. (2013). A Study Characteristic on Indoor Air Quality and Health Risk Assessment in Medical Facility, *J. Korean Soc. Indoor Environ.*, 10(2), 115-128.
- Fischer, P.H., Hoek, G., Reeuwijk, V., Briggs, D.J., Lebert, E., Wijnen, J.H., Kingham, S. and Elliott, P.E.(2000). "Traffic-related Differences in Outdoor and Volatile Organic Ccompounds in Amsterdam", *Atmospheric Environment*, Vol. 34, pp. 3713-3722.
- Hofman, J. and Manna, V.P. (2000). The Air Quality Paradigm inside Car Microenvironments: Balancing between PM2.5 and CO₂ Offsets, *IEEE SENSORS*.
- Kim, H.J., Han, B., Kim, Y.J., Yoon, Y.H., Oda, T. (2012). Efficient test method for evaluation gas removal performance of room air cleaning devices using FTIR measurement and CADR calculation. *Build. Environ.*, Vol. 47, pp. 385-393.
- Kristanto D. and Leephakpreeda T. (2017) Energy Conversion for Thermal Comfort and Air Quality Within Car Cabin, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, Vol. 187, 012037.
- Lesage M., Chalet D., Migaud J. (2021) Experimental analysis and quantification of air infiltration into a passenger car cabin, *Transportation Research Part D*, Vol. 99, 103006
- Noh, K.C. and Oh, M.D. (2015) Variation of clean air delivery rate and effective aircleaning ratio of room air cleaning devices, *Build. Environ.* Vol. 84, pp. 44-49.
- Noh, K.C. (2015). Theoretical investigation on clean air delivery rate and cost-effectiveness of indoor environment control technologies in a child care center, *J. Odor Indoor Environ.* Vol.14, No.2, pp.128-135.
- Noh, K.C. and Yook, S.J. (2016). Evaluation of clean air delivery rates and operating cost effectiveness for room air cleaner and ventilation system in a small lecture room. *Energy Build.* Vol. 119, pp. 111-118.
- Noh, K.C. (2022) Proper particle cleaning per hour for controlling indoor contamination and infection, 2022 International Symposium on Indoor Air Environment in Annual meeting of the Society of Indoor Environment Japan.
- Noh, K.C. (2022) Introduction on new concept of air cleaning per hour (ACH) for controlling contamination and infection, *Air cleaning technology, KACA*, Vol. 138, pp. 93-99.
- Robinson, J., Nelson, W.C. (1995). National human activity pattern survey database, United States Environment Protection Agency, Research Triangle park, NC.
- Tong, Z., Li, Y., Westerdahl, D., Adamkiewicz, G., Spengler, J.D. (2019) Exploring the effects of ventilation practices in mitigating in-vehicle exposure to traffic-related air pollutants in China, *Environment International*, Vol. 127, pp. 773-784.