HVAC 작동특성에 따른 자동차 실내 공기질 평가에 관한 수치해석적 연구

윤성현^a, 서진원^b, 최윤호^{a*}

A Numerical Study of the Air Quality Inside Automobiles According to the HVAC System Operating Conditions

Seonghyun Yoon^a, Jinwon Seo^b, Yunho Choi^{a*}^a Ajou University, Woncheon-dong, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea^b Hyundai Mobis, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 7 May 2014

Revised 5 June 2014

Accepted 10 June 2014

Keywords:

RFR(Ratio of fresh air to recirculated air)

Human respiration

HVAC system

CO₂ concentration

Indoor air quality

Operating mass flow rate

ABSTRACT

When using an automotive heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) system, we can obtain fresh outside air while maintaining the interior vehicle temperature. In this study, a correction equation considering experimental data for automotive indoor air leakage is defined to simulate the ratio of fresh air to recirculated air in the automobile cabin. With this correction equation, numerical results are compared with experimental data and validated. The CO₂ concentration in the automotive cabin is evaluated by considering various boarding conditions and mass flow rates of the HVAC system. The CO₂ concentration model derived in this study is expected to be used to control the effective air conditioning and become a basic research tool for automotive air quality control system development.

1. 서 론

자동차 실내 오염물질 제거는 일반적으로 창문을 개방해서 신선한 외기(fresh air)를 실내에 도입시켜 오염된 공기를 희석시키는 방법과 공기청정기를 설치하여 정화시키는 방법 등이 있다. 이 중 첫 번째 방법은 가장 빠르고 효과적인 방법이지만 외부 공기가 신선해야 하고, 여름과 겨울철은 실내외 온도 차이가 커서 승객의 쾌적성이나 에너지 보존 측면(연비 등)에는 좋지 않은 영향을 미친다. 또한 탑승객이 냄새나 어지럼증 등의 불편을 느끼고 난 후에 실행되기 때문에 실내 공기질 오염도가 높은 상황에서 환기가 이루어지고, 사람이 직접 환기시켜야 하기 때문에 능동적인 제어가 쉽지 않다. 두 번째 방법은 특정 오염물질은 제거할 수 있지만, 제거할 수

있는 물질이 제한적이고 추가 설치비용과 공간이 필요해 가장 비효율적인 방법이기도 하다. 이러한 단점들을 극복할 수 있는 방법은 자동차용 HVAC 시스템(Heating, Ventilation and Air Conditioning System, 이하 HVAC 시스템)을 이용하는 것이다.

이 방법은 장치를 추가로 설치해야 하는 부담이 없고, 자동차 실내의 온도를 유지하면서 외부의 신선한 공기를 가장 빠르게 확보할 수 있다. 또한 외부공기가 오염되었을 경우 내기모드로 전환하여 필터를 이용하면 일부 오염물질의 제거도 가능하다. 그러나 이 방법 또한 승객이 불편을 감지하고 환기의 필요성을 느낄 때만 HVAC 시스템을 가동하여 그 효과를 볼 수 있다. 또한 외기모드로 전환 시 100% 외기가 유입되기 때문에 차실내 냉난방 효율이 저하되는 문제점을 가지고 있다. 특히 전기자동차를 개발할 때 이러한

* Corresponding author. Tel.: +82-31-219-2937

Fax: +82-31-219-1611

E-mail address: ychoi@ajou.ac.kr (Yunho Choi).

문제점이 크게 부각된다^[1].

본 연구에서는 먼저 실험데이터를 기반으로 한 해석을 통하여 실제 자동차 환경과 유사한 조건을 모사하고, 이를 이용하여 다양한 매개변수(자동차용 HVAC의 작동 특성 및 인체 탑승조건)에 대한 공기질 평가 연구를 수행하였다. 또한 본 연구에서는 이러한 결과를 바탕으로 적정 수준의 공기질을 예측할 수 있는 제어 방안을 도출하여 차 실내의 CO₂ 농도를 최적화하는 공조시스템의 개발에 관한 기초를 정립하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 지배방정식

속도, 압력, 온도 등을 계산하기 위해 연속방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식을 고려하였으며,^[2] 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하여 난류를 고려하였다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) &= -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, ρ 는 밀도(density), $\vec{v}$ 는 속도벡터, p 는 정압(static pressure), $\vec{g}$ 는 중력(gravitational body force), $\vec{\tau}$ 는 응력텐서(stress tensor)로 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (2)$$

여기서 μ 는 점성계수, I 는 단위 텐서를 나타낸다. 에너지방정식은 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) \\ = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, k_{eff} 는 열전도 계수(conductivity), $\vec{J}_j$ 는 j 번째 화학종의 확산유속(diffusion flux of species j), E 는 단위질량당 총 에너지, T 는 온도항이다.

2.2 난류 모델

본 연구에서 고려한 표준 $k-\epsilon$ 모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \vec{v}) \\ = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k - \rho \epsilon + S_k \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \nabla \cdot (\rho \epsilon \vec{v}) \\ = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{1\epsilon} G_k \frac{\epsilon}{k} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \\ \vec{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \mu_t &= \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \\ G_k &= \mu_t \nabla \vec{v} \cdot (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) \\ C_{1\epsilon} &= 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \\ \sigma_k &= 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3 \end{aligned} \quad (5)$$

2.3 화학종 수송방정식

단일 및 다 화학종의 유체에 관한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi_k) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \phi_k - \Gamma_k \nabla \phi_k) = S_{\phi_k} \quad (6)$$

$$\vec{J}_i = - \left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T} \quad (7)$$

식 (6)의 스칼라 수송방정식에 $\phi_k = Y_i$, $\Gamma_k = 0$, 그리고 $S_{\phi_k} = -\nabla \cdot \vec{J}_i$ 를 대입하면 화학종 수송방정식으로 사용할 수 있다. 여기서 Y_i 는 i 번째 화학종의 질량 분율(mass fraction)을 나타내고, $\vec{J}_i$ 는 식 (7)과 같이 i 번째 화학종의 확산 유속(diffusion flux), $D_{i,m}$ 은 i 번째 화학종에 대한 질량 확산계수, Sc_t 는 난류 Schmidt 수로 $Sc_t = \mu_t / (\rho D_i)$ 이고, D_i 는 난류 확산계수를 나타낸다.

2.4 차 실내 공기의 재순환 비율 설정

본 연구에서는 그동안 on/off 형식으로만 작동하던 자동차용 HVAC 시스템의 내외기 모드를 도어의 개폐 수준(Ratio of fresh air to recirculated air, 이하 RFR)에 따라 외기유입 비율을 얻기 위해 실험데이터(Fig. 1)를 바탕으로 재정의하였다^[3]. RFR은 0~100%의 범위로 구분되며 0%일 때 외기모드, 100%일 때 내기모드를 의미한다. 본 연구에서 고려한 HVAC 시스템은 증발기 유닛을 없애고 히터 유닛에 증발기와 히터코어를 함께 배치하여 구성한

Fig. 1 Flow rates at recirculation outlet for various RFR

Table 1 Equations of recirculated mass flow rates according to RFR in HVAC system

Flow rate (m³/h)	Second order polynomial equations
145	$y = 8.951x^2 + 136.1x + 9.851$ ($R^2 = 0.983$)
219	$y = -63.91x^2 + 262.9x + 15.88$ ($R^2 = 0.979$)
366	$y = -164.6x^2 + 524.2x + 8.598$ ($R^2 = 0.979$)
493	$y = -248.8x^2 + 711.33x + 17.244$ ($R^2 = 0.982$)
538	$y = -301.8x^2 + 794.8x + 21.55$ ($R^2 = 0.975$)

* y = Recirculated mass flow rate(m³/h), x = RFR(%)
 R^2 = Coefficient of determination

semi-center type^[4]이다. 이 형식은 내기도어(recirculation mode door)가 닫히는 만큼 외기도어(fresh mode door)가 열려, 내외기 공기가 함께 HVAC 모듈로 혼합되어 차실내로 유입되는 구조로 되어있다.

본 연구에서 고려한 외기 유입량(145~538 m³/h), 내기 유량과 RFR에 따른 실험데이터(Fig. 1)를 접합하여 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1을 살펴보면, 작동 풍량이 145 m³/h와 219 m³/h 일 경우에는 RFR이 커질수록 내기유량의 측정값이 대부분 선형적으로 증가하는 것으로 나타났으나, 366 m³/h부터 538 m³/h까지의 경우에는 RFR이 커질수록 내기유량의 측정값이 비선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이는 작동 풍량이 커지면서 HVAC 도어 전후단의 압력차에 의한 유동의 섭동현상이 크게 발생했기 때문으로 판단된다.

3. 계산영역 및 경계조건

3.1 계산영역

본 연구는 상용코드인 FLUENT V13을 이용하여 계산을 수행

Fig. 2 Locations of air vent, outlet and recirculation outlet for the numerical simulation

Table 2 Distribution conditions on the various vent number

Vent number	①,④	②,③	⑤,⑧	⑥,⑦
Distribution (%)	37	37	11	15

Table 3 Operating conditions for the purification of CO₂ concentration on the HVAC system's parameters for the numerical simulation

Flow rate (m³/h)	RFR (0%)	RFR (25%)	RFR (50%)	RFR (75%)	RFR (100%)
145	○	○	○	○	○
219	○	○	○	○	○
366	×	×	×	×	×
366	○	○	○	○	○
538	○	○	○	○	○

하였다.^[5] Fig. 2에 나타난 것처럼 계산영역에는 앞좌석과 뒷좌석 부분에 각각 4개의 공기 토출구(air-vent)를 고려하였고, 조수석 측 대시보드 밑부분에 내기 모드(recirculation mode)를 모사하기 위해 재순환 토출구(recirculation mode outlet)와 뒷좌석 측면과 뒷 유리창 끝부분에 외부로 빠져나가는 3개의 자동차 실내 토출구를 고려하였다. Table 2에서는 HVAC 시스템이 vent 모드일 때 각각의 공기 토출구에서 배분율을 나타내었고, HVAC의 작동 풍량과 RFR 조건을 Table 3에 나타내었다. 인체모델의 탑승조건은 탑승자가 없을 때(P0)부터 4인 탑승(P4)까지 고려하였다. 또한 인체 호흡(날숨)을 고려하기 위해 인체모델의 코 부위에 질량유량 경계조건을 사용하였다. HVAC 시스템의 재순환 유량은 Table 1을 바탕으로 각 작동 풍량 및 RFR에 따라 그 값을 도출하여 내기 모드에서 재순환 토출구의 target mass flow 조건으로 고려하였다. 또한 재순환되는 차실내 공기의 농도 계산은 Fig. 3의 흐름도를 바탕으로 UDF (user defined function) 코드를 작성하고, 각 경계조건에 적용하여 구현하였다. 초기 자동차 실내 CO₂ 농도는 2,000 ppm으로 설정하였고, 본 연구에서 고려한 경계조건은 Table 4와 같다.

Fig. 3 Flow chart of the recirculated air simulation

Boundary	Conditions
Inlet (Air vents)	Flow rate = 145/219/366/493/538m ³ /h Volume fraction = 'UDF for Inlet'
Recirculation outlet	Pressure outlet = Target mass flow Volume fraction = 'UDF for Rec. outlet'
Nose of human model	Mass flow rate = 1.43×10 ⁻⁴ kg/s CO ₂ volume fraction = 0.04
Outlet	Pressure outlet = 1atm CO ₂ volume fraction = 0.0004

4. 수치해석 모델

4.1 인체호흡에 따른 수치해석 모델

Fig. 4에 나타난 것처럼 사람의 총폐기량(total lung capacity; TLC)은 흡기예비량(inspiratory reserve volume)과 1회 호흡량(tidal volume), 호기예비량(expiratory reserve volume), 잔기용량(residual volume)으로 이루어져 있다. 본 연구에서 인체모델의 호흡 해석을 위한 경계조건은 일반 성인의 1회 호흡조건인 500 ml로 가정하고, 온도는 34℃, 밀도는 1.15 kg/m³을 이용하였다. 또한 호흡횟수는 15회/분(일반적으로 12~20회)으로 정의하고, 호기 혼합공기 중 CO₂의 체적 분율은 약 4%로 가정하였다.^[6,7] 인체모델의 호흡해석에 대한 타당성을 검증하기 위하여 실험결과와 해석결과를 비교하였다. 실험은 자동차 실내에 성인 남성 한명을 탑승시킨 후 편안한 상태에서 180초 동안 호흡으로부터 발생하는 CO₂ 농도를 측정하였다. 차실내에 CO₂ 센서는 운전석을 제외한 앞/뒤 좌석 및 중앙 콘솔박스 위 등 총 4곳에 각각 위치시켰고, 실험이 진행되는 동안 HVAC 시스템을 가동시키지 않았다. 센서 4곳의

Fig. 4 Diagram of respiratory volume and capacity for a male

Fig. 5 Comparison of computational and experimental results for human respiration

평균 농도 값을 이용하여 얻은 실험결과와 해석결과는 최대 약 6.27%의 오차가 발생하였으며, 180초 동안 인체호흡에 따른 CO₂ 농도 변화는 거의 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 5).

4.2 HVAC의 RFR 및 풍량에 따른 수치해석 모델

Table 1에서 정의한 HVAC의 RFR 방정식을 바탕으로 Table 4의 경계조건에 따라 CFD 해석을 수행하였다. 이때, Fig. 1의 실험결과와 해석결과를 비교해보면 대부분의 작동 풍량에서 RFR이 작을수록(외기비율이 클수록) 오차가 커지는 것으로 나타났고, 작동 풍량에 따라서는 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 이러한 오차를 정정하기 위해, 실험에 의해 얻어진 이산화탄소 농도 및 해석 결과의 이산화탄소 농도 감소 비율의 차이를 기초 다항식 회귀법을 사용하여 식 (8)과 같은 실험보정식을 정의하였다.^[8] 이 식을 이용하면 다양한 풍량에 따른 해석에 필요한 보정 RFR(실제 RFR에 대비)을 정의할 수 있다.

Table 5 Experimental and the corrected numerical RFR

Flow rate (X_2 , m ³ /h)	RFR (X_1 , %)	RFR (Y , %)
145	50%	75%
219	15%	50%
	85%	85%
366	0%	40%
	50%	70%
	100%	100%
493	15%	55%
	85%	85%
538	50%	75%

$$Y = 51.7191 - 0.4081X_1 - 0.0006X_1^2 - 0.0637X_2 + 0.0001X_2^2 \quad (8)$$

여기서, Y 는 보정 RFR(%), X_1 은 희망 RFR(%), X_2 는 풍량(m³/h)이다. Table 5에는 다양한 풍량 조건에서 식 (8)을 이용하여 얻은 보정 RFR 결과의 일부를 나타내었다.

5. 수치해석 결과

5.1 내외기울을 고려한 해석

자동차 실내의 HVAC 시스템의 RFR 및 풍량에 따른 실내 공기 질 평가를 수행하기 위해 Table 4와 실험보정식을 바탕으로 경계 조건(보정 RFR 및 풍량)을 선정하고 해석을 수행하였다. Fig. 6과 7은 366 m³/h의 풍량 조건에서 RFR 0%와 100%의 유동해석 결과를 유선으로 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 RFR이 0%보다 100%에서 내기모드 출구를 통해 많은 양의 공기가 재순환되는 것을 확인할 수 있으며, RFR이 0%라 할지라도 재순환되는 유동이 약간은 존재함을 확인할 수 있다. 이 현상은 실제 자동차에서도 유사하게 나타난다.

5.2 인체모델 탑승조건에 따른 인체호흡 해석

HVAC 시스템을 가동하지 않은 자동차 실내에서 인체 호흡을 고려한 모델의 탑승조건(P1~P4)에 따른 CO₂의 변화 추이를 Fig. 8에 나타내었다. 차 실내 초기 CO₂ 농도를 대기 농도와 동일한 400 ppm으로 설정하고, 인체 호흡을 통해 농도가 1,000 ppm(권장 농도)과 2,000 ppm(졸음 유발)에 도달하는 시간을 탑승인원 별로 평가하여 Table 6에 나타내었다. CO₂농도가 1,000 ppm에 도달하는 시간을 살펴보면 P1보다 P2가 2.03배, P3가 3배, P4가 4.2배 빠르게 나타났고, 2,000 ppm에 도달하는 시간은 P2가 2.03배, P3가

Fig. 6 Streamlines in the automotive cabin at 0% RFR

Fig. 7 Streamlines in the automotive cabin at 100% RFR

Fig. 8 Validation of CO₂ concentrations according to the number of passengers without HVAC system

Table 6 Time taken to reach 1,000 and 2,000 ppm of CO₂ concentration when HVAC system does not operate

CASE	P1	P2	P3	P4
1,000 ppm	315 sec	155 sec	105 sec	75 sec
2,000 ppm	845 sec	415 sec	265 sec	195 sec

3.19배, P4가 4.3배 빠르게 나타났다. 또한 P1의 CO₂ 농도가 1,000 ppm에 도달하는 동일한 시간(315sec)에 P2에서는 1,624 ppm, P3에서는 2,279 ppm, P4에서는 2,962 ppm으로 측정되었다. 탑승인원(P1~P4)이 증가함에 따라 차실내 CO₂ 농도는 비례하게 증가하였고, 초기 농도(400 ppm)에서 1,000 ppm에 비해 2,000 ppm에 도달하는 시간이 약 2.6배 더 걸리는 것으로 나타났다.

Fig. 9 Contours of CO₂ Concentrations for P1 and P2

Fig. 10 Contours of CO₂ concentrations for P3 and P4

Fig. 9와 10은 호흡을 고려한 인체모델의 탑승조건에 따라 차실내 CO₂ 농도 분포를 탑승객의 가슴 위치에서 평면을 잘라 나타낸 그림이다. P1의 호흡에 의한 CO₂는 시간이 지날수록 앞 유리창 및 대시보드에 부딪혀 조수석으로 흘러가지만, P2처럼 앞좌석에서 발생한 CO₂는 시간이 지나도 뒷좌석으로 거의 흘러가지 않는 것으로 나타났다. 결국 대부분의 탑승 위치에서 CO₂ 농도는 인체 주변에 주로 분포하고 주변으로 크게 확산되지 않는 것으로 나타났다. 이는 HVAC에 의한 강제 대류가 아닌 호흡에 의한 대류 영역에서는 매우 약한 수준의 유동장이 형성되기 때문에 CO₂가 크게 확산되지 않는 것으로 사료된다.

5.3 실내 권장농도(1,000 ppm) 도달시간

Fig. 11과 Table 7은 인체모델이 탑승하지 않았을 경우 차실내 CO₂의 농도(초기농도 2,000 ppm)가 실내 권장 농도인 1,000 ppm이 될 때까지의 풍량과 RFR에 따른 해석결과(소요 시간)를 나타낸다. RFR이 0%일 때는 538 m³/h를 기준으로 366 m³/h는 약 1.27배, 219 m³/h는 약 2.05배 그리고 145 m³/h는 약 2.89배 등의 시간이 더 걸리는 것으로 나타났고, RFR이 100%일 때는 538 m³/h를 기준으로 366 m³/h는 약 1.61배, 219 m³/h는 약 2.55배 그리고 145 m³/h는 약 5.73배 등으로 RFR이 0%일 때보다 100%

Fig. 11 Comparison of CO₂ concentrations for the various RFR

Table 7 Time taken to reach 1,000 ppm of CO₂ concentration for P0 (numerical results)

Flow rate (m ³ /h)	RFR (0%)	RFR (25%)	RFR (50%)	RFR (75%)	RFR (100%)
145	127s	176s	282s	727s	1970s
219	90s	122s	181s	314s	877s
366	56s	79s	125s	245s	554s
538	44s	63s	97s	171s	344s

에서 자동차 실내의 오염물질을 정화하는데 풍량 대비 시간이 더 오래 걸리는 것으로 나타났다. 또한 RFR이 100%인 경우, 누설의 영향으로 차 실내 오염가스가 감소하는 것으로 나타났다.

HVAC 시스템(초기 농도 2,000 ppm)을 가동 후 360초가 지난 시점에서 인체모델의 탑승조건에 따른 저감율을 Fig. 12에 나타내었다. HVAC 시스템의 풍량이 각각 145, 219, 366, 538 m³/h일 때, P1보다 P2의 저감율은 약 11.3, 8.3, 5.4, 4.2%씩 감소하였고, P3, P4의 저감율도 같은 경향을 보인다. 탑승인원이 늘어남에 따라 저감율의 감소비는 거의 비례하게 나타났고, 풍량이 커질수록 탑승 인원 별 저감율의 차이는 줄어든다. Fig. 13에서는 인체모델의 탑승조건에 따른 자동차 실내의 CO₂ 평균 농도가 1,000 ppm에 도달되는 시간을 평가하여 나타내었다. 여기서 145 m³/h의 탑승조건 P3과 P4, 219 m³/h의 P4를 제외한 나머지 풍량 조건 및 탑승조건은 권장농도인 1,000 ppm 이하를 충족시키는 것으로 나타났다. 366 m³/h 이상의 풍량 조건에서는 탑승인원과 무관하게 1,000 ppm에 도달하는 시간이 비슷하게 나타났다. 이는 탑승인원이 일정

Fig. 12 Reduction rate of CO₂ according to the mass flow rates after 360 seconds

Fig. 13 Elapsed time for the cases of various number of passengers

수준 이상이고, HVAC 풍량이 작으면 외기모드라 할지라도 원하는 수준으로 자동차 IAQ (Indoor Air Quality, 이하 IAQ)를 제어할 수 없음을 나타낸다.

5.4 작동 풍량별 RFR과 시간에 따른 차 실내 CO₂ 농도 변화 해석

Fig. 14부터 Fig. 18은 차 실내 CO₂ 초기농도(2,000 ppm)일 때의 탑승인원, HVAC의 RFR과 작동 풍량 등을 고려한 자동차 실내의 CO₂ 농도 변화를 시간과 RFR에 따라 나타낸 등고선 그래프이다. 이 그래프를 이용하면 작동 풍량과 탑승인원, RFR에 따라 실내 평균 농도를 예측할 수 있고, 또한 실내 권장농도(1,000 ppm)에 도달하는 임의의 시간을 예측할 수 있다. 이 그래프의 정확성을 검토하기 위해 1,000 ppm에 도달하는 시간을 무작위로 3가지 조건에 대해서 Table 7의 결과와 비교하였다. P0 (145 m³/h-RFR 25%)의 실제 해석결과는 176 sec이고 그래프를 이용하여 구한 값은 약 180 sec, P0 (366 m³/h-RFR 75%)의 실제 해석결과는 245 sec이고 그래프를 이용하여 구한 값은 약 248 sec, P0 (538 m³/h-RFR 50%)의 실제 해석결과는 97 sec이고 그래프를 이용하여 구한 값은 약 98 sec로, CO₂ 농도 예측 그래프를 통한 결과는 상당히 신뢰할 수 있음을 확인하였다. 이를 바탕으로 탑승 조건에 따른 자동차 실내 CO₂ 농도를 실내권장농도(1,000 ppm) 이하로 제한 시간(60초, 180초, 360초) 내에 제어하기 위한 풍량 및 RFR 조건은 Table 8에

Fig. 14 Contours of CO₂ concentrations for P0

(a) 145 m³/h

(b) 219 m³/h

(c) 366 m³/h

(d) 538 m³/h

Fig. 15 Contours of CO₂ concentrations for P1

(a) 145 m³/h

(b) 219 m³/h

(c) 366 m³/h

(d) 538 m³/h

Fig. 17 Contours of CO₂ concentrations for P3

(a) 145 m³/h

(b) 219 m³/h

(c) 366 m³/h

(d) 538 m³/h

Fig. 16 Contours of CO₂ concentrations for P2

(a) 145 m³/h

(b) 219 m³/h

(c) 366 m³/h

(d) 538 m³/h

Fig. 18 Contours of CO₂ concentrations for P4

나타내었으며, 360초 이후에 초기농도보다 차실내 CO₂ 농도가 증가하는 RFR 조건을 Table 9에 나타내었다.

Fig. 19부터 Fig. 22는 HVAC 작동 300초가 지난 후, 인체모델의 탑승조건에 따른 CO₂ 농도 분포를 작동풍량은 145, 366, 538 m³/h, RFR은 25, 75%일 때의 결과를 이용해 차실내 중앙 단면에서 나타내었다. 강제대류가 지배적인 유동장에서 작동 풍량과 RFR에 따라 전체 체적에서 측정된 평균 CO₂ 농도는 비슷하지만, 국부적인 농도 분포는 그 결과와 상이할 수 있다. 예를 들어 P1 (145 m³/h-RFR 25%)와 P3 (366 m³/h-RFR 25%) 그리고 P4 (538 m³/h-RFR 25%)에서는 체적평균 농도가 약 900 ppm으로 서로 비슷하게 나타났다. 그러나 CO₂ 농도 분포는 P1 (145 m³/h-RFR

25%)는 운전자 가슴 앞부분과 발부분 등의 위치에서 농도가 높게 나타났고, P3 (366 m³/h-RFR 25%)는 호흡하는 코 부분을 제외한 나머지 부분은 거의 균일하게 나타났다. 또한 P4 (538 m³/h-RFR 25%)는 탑승객의 코 부분과 운전석 발 부분, 뒷좌석 탑승객 등 부분에서 농도가 조금 높게 나타났다. RFR 25%에서 P1을 기준으로 P2, P3, P4 등 탑승객이 늘어날수록, 작동풍량(366 m³/h와 538 m³/h)의 차이에 따라 차실내 CO₂ 농도 차이가 점점 더 커지는 것을 다음과 같이 확인하였다. P1-366 m³/h (600 ppm)와 P1-538 m³/h (600 ppm)의 차이는 발생하지 않았지만, P2-366 m³/h (700 ppm)와 P2-538 m³/h (600 ppm)는 100 ppm의 차이가 발생하였다. 또한 P3-366 m³/h (900 ppm)와 P3-538 m³/h (800 ppm)에서도

Fig. 19 Contours of CO₂ concentrations for P1 (300sec)

Fig. 21 Contours of CO₂ concentrations for P3 (300sec)

Fig. 20 Contours of CO₂ concentrations for P2 (300sec)

Fig. 22 Contours of CO₂ concentrations for P4 (300sec)

Table 8 Maximum RFR to adjust the recommended CO₂ concentration (1,000 ppm) at a given time

Time	Flow rate (m ³ /h)	P0	P1	P2	P3	P4
60 sec	145	×	×	×	×	×
	219	×	×	×	×	×
	366	0%	×	×	×	×
	538	16%	12%	4%	0%	×
180 sec	145	24%	2%	×	×	×
	219	48%	29%	2%	×	×
	366	62.5%	51.5%	38%	27%	15%
	538	76%	62%	52%	40%	30.5%
360 sec	145	56%	32%	5%	×	×
	219	68%	55%	31%	8%	×
	366	86%	67%	52.5%	37%	23.8%
	538	100%	80%	64%	52%	36%

Table 9 Minimum RFR in case of the automotive indoor CO₂ concentration is higher than the initial CO₂ concentration

Flow rate (m ³ /h)	P1	P2	P3	P4
145	79%	61.8%	50.5%	40%
219	×	83%	71%	59%
366	×	86.2%	79%	71%
538	×	×	92.5%	83%

약 100 ppm의 차이가 발생하였고, P4-366 m³/h (1,100 ppm)와 P4-538 m³/h (900 ppm)에서는 약 200 ppm의 차이가 발생하였다. 반면에 P0를 기준으로 풍량이 가장 작고 RFR이 작은 145 m³/h-RFR 25%와 풍량이 가장 크고 RFR이 큰 538 m³/h-RFR 75%의 차실내 CO₂ 체적평균 농도와 운전석 단면의 농도 분포가 100 ppm 이하로 거의 유사한 것으로 나타났다.

6. 결 론

본 연구에서는 수치해석을 이용하여 자동차 실내 공기질에 대한 평가 방법을 정립하고, HVAC 작동 특성(작동 풍량 및 RFR) 및 호흡을 고려한 인체 모델의 탑승조건에 따른 공기질을 평가하여 적정 수준의 실내 공기질을 제어할 수 있는 예측 모델을 개발하였다. 이를 위해 HVAC 시스템의 작동풍량과 RFR에 따른 외기유입량에 대한 CO₂ 농도측정 실험데이터를 통해 차 실내 누설에 대한 보정 방정식 및 경계조건을 정의하였다. 또한 이 보정 방정식을 고려하여 해석결과와 타당성을 실험결과와 비교하고 검증하였다. 이를 바탕으로 매개변수(HVAC 작동풍량, RFR, 탑승인원 등) 연구

를 통해 차실내 공기질을 평가하고, 권장 농도를 유지하기 위한 작동 조건 및 차실내 농도(공기질) 예측 모델을 제안하였다. 이 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

CFD 해석결과와 CO₂ 농도 측정 실험결과를 통해 오차를 구하고 다항식회귀분석법을 이용하여 자동차 실내 및 HVAC 시스템의 누설에 대한 실험보정식을 정의하고 그 타당성을 입증(오차 10% 미만)하였다. 수치해석을 수행할 때 이 실험보정식을 이용하면 실제 자동차 내부의 여러 누설에 대한 보정이 이루어져 해석결과를 신뢰할 수 있을 것으로 사료된다.

또한 본 연구에서 고려한 인체 호흡모델의 해석결과, 시간이 지남에 따라 호흡에 의한 CO₂ 농도는 선형적으로 증가하고, 실험결과와 비교한 결과 매우 유사한 결과(약 6.27%이하 오차)를 얻을 수 있었다. 이를 바탕으로 탑승인원(P1~P4)에 따른 차실내 CO₂ 농도를 평가한 결과 탑승인원과 비례하게 CO₂ 농도가 증가하는 것으로 나타났다.

자동차 실내의 냉난방 성능을 유지하면서 차실내 공기질 제어를 동시에 수행하기 위하여 상황에 따라 HVAC 시스템의 RFR은 작게 하면서 작동풍량을 키우거나, RFR을 크게 하면서 작동풍량을 작게 해야 하는 경우가 있다. 본 연구에서 도출한 CO₂ 농도 예측모델을 이용하면 상황에 따라 차실내 공기질의 정량적인 예측을 할 수 있을 뿐만 아니라, 이를 이용하여 제어 시스템을 개발하고 적용하면 능동적인 자동차 IEQ (indoor environmental quality)를 유지할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국 연구재단의 기초 연구사업(2010-0025133) 지원을 받아 수행된 결과입니다.

References

- [1] Son, S. H., Kwon, H. B., Park, H. W., Lee, J. H., An Evaluation of The Driving Range of Electric Vehicle under Ambient Temperature and HVAC, KSAE 2012 Annual Conference and Exhibition 2245-2249.
- [2] John, D. A. Jr., 1995, Computational Fluid Dynamics, McGRAW-HILL, New York.
- [3] Seo, J. W., Choi, Y. H., 2011, Numerical Study on the Fresh Air Mode and the Recirculation mode of HVAC for Improving Automotive Indoor Air Quality, KSAE 2011 Annual Conference and Exhibition 552-558.
- [4] Lee, D. W., Yoo, S. Y., 2003, A Study on numerical performance analysis of automotive HVAC system, SAREK, Summer conference

proceeding 13:2 620-625.

- [5] ANSYS, 2010, viewed 21 January 2014, FLUENT 13.0 Theory Guide, <<http://www.ansys.com>>
- [6] Höppe, P., 1981, Temperatures of exhaled air under varying climatic conditions, *International Journal of Biometeorology* 25 127-132.
- [7] Bjørn, E., 2002, Dispersal of exhaled air in stratified surroundings – CFD studies, *Proceedings of the ROOMVENT* 8:11 285-288.
- [8] Seo, J. W., Choi, Y. H., 2013, Estimation of the air quality of a vehicle interior: The effect of the ratio of fresh air to recirculated air from a heating, ventilation and air-conditioning system, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 227 1162-1172.