

실도로 주행 기반 시간의존 경계조건을 적용한 차량 실내 NO₂ 유입의 CFD 분석

차 현 찬¹⁾ · 유 성 식²⁾ · 이 흥 식²⁾중부대학교 에너지융합공학과¹⁾ · 중부대학교 스마트모빌리티공학²⁾

CFD Analysis of In-Cabin NO₂ Ingress Using Real-World Transient Boundary Conditions

Hyun Chan Cha¹⁾ · Sung Sic Yoo²⁾ · Heung-Shik Lee³⁾¹⁾Department of Energy Convergence Engineering, Joongbu University, Gyeonggi 10279, Korea²⁾Department of Smart Mobility Engineering, Joongbu University, Gyeonggi 10279, Korea

(Received 17 November 2025 / Revised 5 December 2025 / Accepted 6 December 2025)

Abstract : This study presents a CFD framework for predicting transient in-cabin NO₂ concentrations under real-world driving scenario in outside-air mode. Vehicle speed and ambient NO₂ signals were imposed through UDF-based boundary conditions to reproduce dynamic inflow behavior. To capture filtration, mixing, and associated delay effects, a full-scale vehicle model, including a porous-media cabin filter, was developed. Validation against on-road measurements showed that the simulated ambient peak was attenuated by approximately 21.6%, while in-cabin concentrations were moderately overpredicted. Error analysis yielded MAE 21.18 ppb, RMSE 24.20 ppb, and MBE -20.71 ppb, while correlation improved from 0.505 to 0.627 after applying lag correction. These findings highlight the importance of incorporating time-resolved inputs to accurately reproduce transient concentration dynamics and provide a practical basis for optimizing filtration characteristics and ventilation strategies in real driving environments.

Key words : Computational fluid dynamics(전산 유체 역학), User defined functions(사용자 정의 함수), Time dependent boundary conditions(시간 의존 경계조건), In-cabin air quality(차량 공기 실내질), NO₂ exposure assessment(NO₂ 노출 평가)

Nomenclature

CFD : computational fluid dynamics
 HVAC : heating, ventilation and air conditioning
 UDF : user defined function
 ROI : region of interest
 MAE : mean absolute error
 RMSE : root mean square error
 MBE : mean bias error
 OA : outside air mode

1. 서론

본 연구는 실도로 주행 조건에서 외기 모드 운전 시 외부 오염물질이 차량 실내로 유입/분포되는 과정을 CFD로 정량화하고, 실제 주행 데이터의 시변 특성을 반영하여 실내 NO₂ 농도 예측의 정확도를 향상하는 것을 목적

으로 한다. 이를 통해 캐빈 필터 설정이 실내 NO₂ 저감에 미치는 영향을 평가하고, 실무적 환기전략/설계 개선에 기여할 수 있는 정량 근거를 제시한다.

차량 내부 공기질에 관한 CFD 해석 연구들은 외부 오염물질의 유입 및 캐빈 내 분포를 규명하고, 실내 공기질에 관한 향상을 위한 설계/운용 방안을 제시하는데 활용되어 왔다. Xiang과 Wang¹⁾은 캐빈 내부에서 좌석/개구 배치에 따른 농도장 변화를 CFD로 제시하여 분포 해석의 기본 틀을 마련하였다. Chan과 Chung²⁾은 주행환경과 환기모드에 따라 실내/실외 농도 관계가 크게 달라짐을 체계적으로 보고하였다. Seo와 Choi³⁾는 깨끗한 외기/재순환 비율 변화가 캐빈 공기질에 미치는 영향을 모델링과 검증으로 정량화하였다. Choi 등⁴⁾은 주행풍, 노즐 길이/위치, 사이드미러 유도 난류 등을 고려해 외부 샘플링 노즐의 대표성과 민감도를 CFD로 정량화하고 손상 위

*Corresponding author, E-mail: jsheung@joongbu.ac.kr

[†]This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

힘을 줄이는 최적 샘플링 위치를 제안하였다. 이러한 선행연구들은 CFD를 통해 차량 실내 공기질에 영향을 미치는 다양한 요인을 밝혀내고, 환기전략 최적화, 필터 기술 평가 등 실무 적용에 유용한 시사점을 제공해왔다.

하지만 시뮬레이션이 정상 상태 또는 고정된 주행속도/외기농도를 가정하여 실제 도로 주행 중의 급격한 변동을 충분히 반영하지 못한다. Tajdaran 등⁵⁾은 CFD로 순간 피크 노출의 중요성을 보이며 장기 평균만으로는 고 피크 효과를 포착하기 어렵다고 지적하였다. Matthaïos 등⁶⁾은 경로 선택과 환기 옵션에 따라 차량 내 NOx/입자 노출이 크게 달라짐을 정량화해 실도로 변동성 반영의 필요성을 강조하였다. Lesage 등⁷⁾은 주행속도가 증가하면 침투(Infiltration) 유량이 증가하게 되며 환기 설정으로 저감 될 수 있음을 실험으로 보였다. 이처럼 정적 평균과 정상 상태 가정만으로는 이러한 순간피크와 과도 거동, 침입 변화를 충분히 설명하기 어렵다.

이에 본 연구는 실차에서 계측한 1 Hz 차량 속도 및 외기 NO₂ 시계열을 UDF(User-Defined Function)로 구현하여 CFD 경계조건에 직접 부여함으로써, 기존 정적 시나리오에서 누락되던 동적 거동을 포착하고자 하였다. 또한 필터를 다공성 매질로 모델링하여 압력강하·유량감쇠·혼합 지연 등의 물리적 효과를 재현하고, 민감도 분석을 통해 실측 대비 예측 오차가 최소화되는 파라미터 영역을 도출하였다. 이를 통해 외기 농도의 실내 전달 과정에서 나타나는 감쇠·지연 특성과 실내 농도의 과대/과소 예측 패턴을 체계적으로 분석할 수 있는 프레임워크를 구축하였다.

2. 연구 방법

실도로 주행 환경에서 차량 내부 및 외부 오염물질 거동을 해석하기 위해서 실차 주행 실험을 통해 얻어진 데이터를 사용하였다. 특히 시간에 따른 차량 주행속도 변화와 외부 대기 NO₂ 농도 변화를 파악하여 시나리오를 구성하였다. 시뮬레이션에서는 창문이 모두 닫힌 상태에서 차량 공조장치를 외기(OA)모드로 설정하여 환기함으로써 외부 공기가 HVAC 흡입구를 통해 실내로 유입되는 상황을 가정하였다. 이러한 외기 유입 시 차량 실내로의 오염물질 침투는 실내 공기질에 큰 영향을 주는 주요 메커니즘이 되며, 이를 재현하여 NO₂의 실내 유입과정을 분석하였다.

2.1 모델링 및 CFD 해석 개요

실제 차량의 유동 특성을 반영하기 위해 세단 형상 전체를 3차원 모델링 하였다. 모델링 소프트웨어로는

CATIA를 사용하여 차량 외부 형상과 내부 캐빈 공간을 생성하였다. 특히 차량 내부의 유동경로와 부피를 정확히 묘사하기 위해 주요 구성요소인 HVAC 외기 통로를 포함시켰으며, 이를 Figs. 1~3에 각각 도식화하였다.

Fig. 1은 해석 대상인 차량의 전체 형상으로 실측 데이터와의 오차 범위를 최대한 줄이기 위해 스케일은 전척도(Full-scale)로 구성하였으며, 외부 오염물질과 배기가

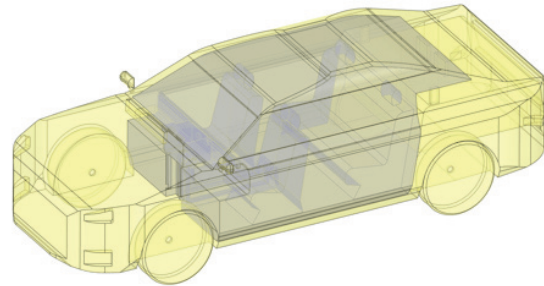


Fig. 1 3D model of the sedan for CFD

Table 1 Specifications of the vehicle model

Overall length / Width	4831 mm / 1811 mm
Overall height / Wheelbase	1474 mm / 2803 mm
Overhang	Front: 988 mm/ Rear: 1278 mm

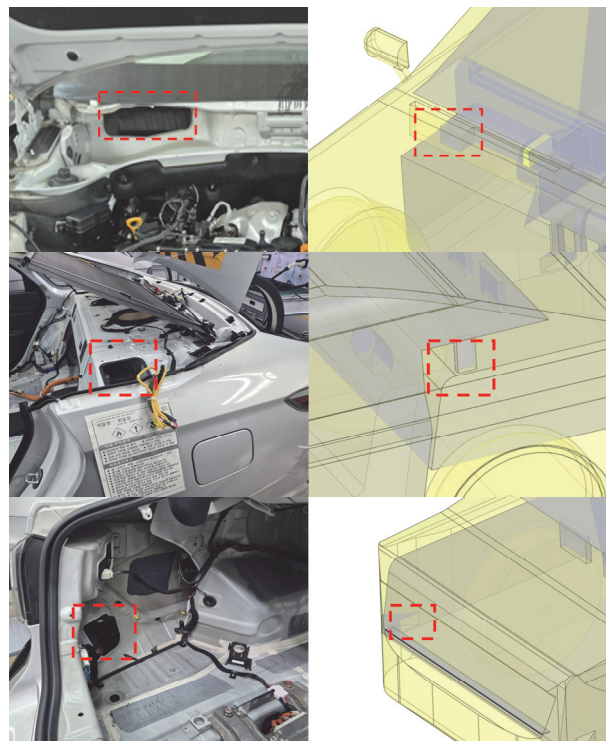


Fig. 2 Design of HVAC intake and in-cabin exhaust outlets from real-vehicle references

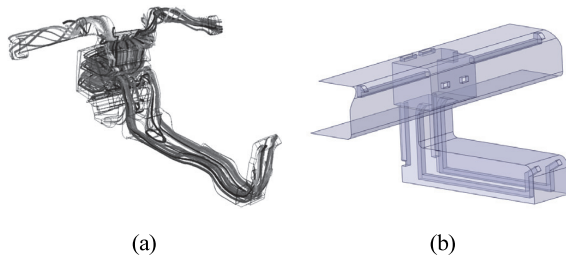


Fig. 3 Reference image and reconstructed 3D air-duct model: (a) Reference airflow visualization used for geometry design,⁸⁾ (b) 3D air-duct model built from the reference

스의 역유입을 추적하기 위해 트렁크에 미세탐색을 추가하였다. 해당 제원은 Table 1에 나타내었다. Fig. 2는 외기 HVAC와 캐빈 내부 공기 배출구(Inner outlet)와 실제 차량 이미지를 참고하여 설계하였고, 에어덕트 형상은 차량 공조 덕트 구조를 다룬 기술 단행본⁸⁾의 제원과 단면 자료를 바탕으로 모델링하였다.

전처리의 경우 실도로 주행에서 수집된 속도 및 외기/내기 NO₂ 시계열을 사용하였다. 데이터는 1 Hz 샘플링으로 총 3,063 s 구간을 포함한다. 센서의 측정 범위/정확도 및 시간 동기화 절차를 동일 구간으로 정렬하였다. NO₂ 단위는 해석의 일관성을 위해 ppb를 질량분율(Mass fraction)로 변환하였다.

본 연구의 수치해석은 상용 전산유체역학 해석 프로그램인 ANSYS Fluent 2022 R2를 이용하여 수행하였다. 해석은 병렬 연산이 가능한 워크스테이션 14-Core Intel 13th Gen 3.5 GHz CPU, 32 GB RAM, Windows 11 OS에서 수행하였다. 차량 형상은 CATIA로 3차원 모델링하였으며, Fluent Mesher를 이용하여 약 23만개의 Cells 규모의 격자를 생성하였다. 유동 해석은 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식을 기반으로 수행하였으며, 난류 모델은 Standard k-ε model, 종 전달은 Species Transport Model을 적용하였다.

2.2 Interface 기반 다영역 유동 해석 설정

필터 압력강하를 포함해 3개의 영역을 구성하여(Fig. 4) 차량의 외기 영역(Outer fluid), 캐빈 내부 영역(Inner fluid), 그리고 HVAC 덕트 영역을 설정하였다. 이 3개의 유동장을 비정합 인터페이스로 결합함으로써, 외부 NO₂가 필터를 통과하여 실내로 유입·분포되는 전체 과정을 연속적으로 모사하였다.

3개의 영역으로 구분한 주요 목적은 UDF로 부여된 시간의존 외기 NO₂ 신호가 HVAC 흡입구로 유입되고 필터를 지나 캐빈으로 전달되는 실제 물리 경로를 구조적으

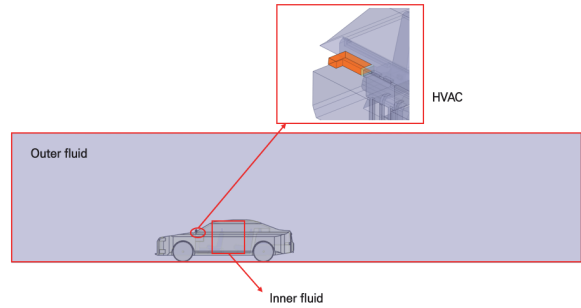


Fig. 4 CFD configuration for coupling the outer flow, in-cabin region, and HVAC air-duct system

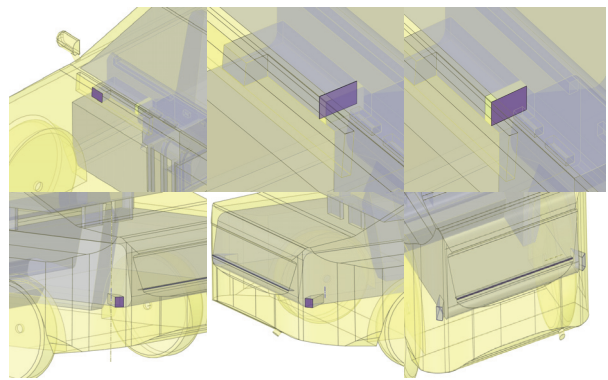


Fig. 5 Six interface surfaces coupling the external flow and the in-cabin domain

로 반영하기 위함이다. 또한 외기 NO₂와 캐빈 NO₂의 초기조건을 서로 다르게 설정하여, 초기 축적·희석 과정과 시간지연 특성이 왜곡되지 않도록 하였다.

인터페이스의 경우 양측에서 질량, 운동량, 난류변수, NO₂ 플럭스가 보전적으로 교환되도록 설정하였다. 필터는 두께 30 mm 다공성 유체 영역으로 모델링하여, 외기/필터와 필터/캐빈에서 압력강하와 종 전달이 동시에 반영되도록 하였다. 각 인터페이스의 위치는 Fig. 5에 나타내었다.

2.3 UDF 경계조건 및 다공성(캐빈 필터) 모델

차량 내외부 유동장에서의 NO₂ 거동을 재현하기 위해 시간의존 경계조건을 적용하였다. 경계조건은 사용자 정의 함수(UDF)로 구현하였으며, 외기 속도와 외부 NO₂ 농도 시계열을 Velocity inlet에 부여하였다.

속도와 외기 NO₂ 농도는 실측 1 Hz 시계열을 입력으로 하여 UDF를 통해 경계에 부여하였다. UDF는 시물레이션 시간 t와 가장 근접한 두 시점의 데이터를 이용한 선형 보간으로 경계값을 계산하며, 데이터 범위를 넘어서는 구간에서는 마지막 유효값을 유지한다. 결측/이상

값에 대해서는 UDF 내부에서 예외 처리를 수행하였다. 시뮬레이션 시작 시각과 데이터 시작 시각의 동기화를 위해 오프셋을 0 s로 설정하였다.

UDF는 실도로 주행 중 측정된 외기 NO₂ 농도 및 차량 속도의 시계열 데이터를 Fluent의 시간 단계(t)와 동기화하여 경계조건에 부여하였다. 시간 구간 [t_i, t_{i+1}] 내에서 경계면의 물리량 φ_{BC}(t)은 다음의 선형보간식으로 계산된다:

$$\phi_{BC}(t) = \phi(t_i) + \frac{t - t_i}{t_{i+1} - t_i} [\phi(t_{i+1}) - \phi(t_i)]. \quad (1)$$

여기서 φ(t_i)와 φ(t_{i+1})는 인접한 두 시점의 실측값이다. 이 방식은 실도로 측정 데이터가 불연속으로 존재하는 한계를 보완하여, Fluent 계산 시간축에서 물리적 연속성을 확보한다. 또한 시간 범위를 벗어나는 구간에서는 마지막 유효값을 유지하도록 하여 계산 안정성을 보장하였다. 실측 데이터는 서경대학교에서 수행한 실도로 주행 실험으로부터 획득하였으며, 동일 주행 구간에서 수치결과와 실측값의 정합을 평가하였다.

실내 농도 평가는 운전석과 조수석 헤드레스트를 관심영역(ROI)으로 설정하였으며, ROI는 헤드레스트 중심 기준으로 후방 628 mm, 좌우 1,400 mm, 상하 460 mm의 직육면체로 정의하고 Fluent Report Definition의 Volume Average를 통해 Fig. 6과 같이 영역을 분리하여 농도를 기록하였다.

캐빈 필터의 경우 등방성 다공성 매질로 모델링하였다. 다공성 매질 내 유동에 대한 지배 방정식은 다음과 같은 체적 평균화된 모멘텀 보존식으로 표현된다:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\epsilon \rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon \rho \mathbf{u} \mathbf{u}) \\ &= -\epsilon \nabla p + \nabla \cdot (\epsilon \boldsymbol{\tau}) - \left(\frac{\mu}{\alpha} \mathbf{u} + \frac{1}{2} \rho C_2 |\mathbf{u}| \mathbf{u} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

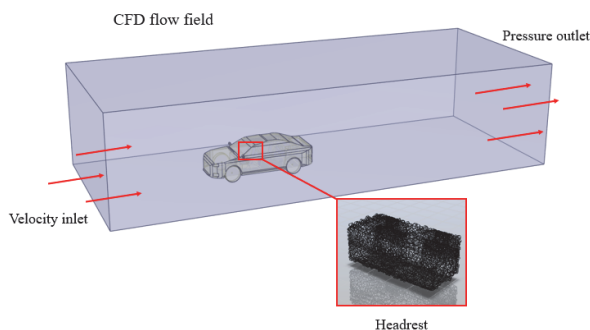


Fig. 6 CFD domain and in-cabin NO₂ sampling region (headrest ROI)

Table 2 Parameters of porous-media filter model

Item	Direction	Value	Unit
Viscous resistance (1/α)	Normal	3.0 × 10 ¹⁰	m ⁻²
	Transverse	1.0 × 10 ¹²	m ⁻²
Inertial resistance (C ₂)	Normal	2.0 × 10 ³	m ⁻¹
	Transverse	0	m ⁻¹
Porosity (ε)	-	0.90	-

Table 2는 본 연구에서 적용한 다공성 캐빈 필터 모델의 핵심 파라미터(점성 저항 · 관성 저항 · 공극률)를 정리한 것이다. 점성 저항(1/α)은 필터 내부에서의 저속 영역 유동 감쇠에 주로 기여하며, 관성 저항(C₂)은 고속 유동 시 추가적인 압력강하를 유발하여 피크 유량 변화를 제한하는 역할을 한다. 본 연구에서는 문헌 제원과 상용 필터 제품 범위를 고려하여 주류 방향(Normal direction)에는 상대적으로 낮은 저항을, 횡방향(Transverse direction)에는 높은 저항을 부여함으로써 실제 필터의 비등방성 유동특성을 반영하였다. 공극률(ε)은 종 전달 및 전체 유량 통과량을 결정하는 주요 매개변수로, 필터의 구조적 특성과 문헌값을 고려하여 0.90으로 설정하였다.

본 연구에서 사용한 캐빈 필터는 NO₂에 대한 흡착 · 정화 기능을 갖지 않기 때문에, 필터를 질량전달 반응을 포함하지 않는 다공성 매질로 구현하였다. 그러나 캐빈 필터는 외기 유입 과정에서 압력강하와 속도장 분포를 결정하는 주요 유동 저항체로 작용하며, 이는 실내로 전달되는 공기량, 혼합 강도, 체류시간 및 농도응답의 시간 지연 특성에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 필터를 다공성 매질로 모델링하는 것은 화학적 정화 과정이 없더라도 실내 NO₂ 전달 동역학을 물리적으로 재현하는 데 필수적인 절차이다.

추가적으로 배기구에서 나오는 오염물질을 모사하기 위해 배기구 경계조건을 적용하였다. 해당 배기구 경계조건은 EURO 6에 해당하는 실 차 실험 데이터를 바탕으로 NO_x 배출계수 0.043 g/km를 채택하였으며, 차량 속도는 UDF로부터 읽어 순간 질량유량을 구하고 배출 NO_x 중 NO₂의 비율은 여러 선행연구에서 보고된 세단차량 배기 NO_x/NO₂ 비율(약 0~30 %)의 중간값에 해당하는 15%를 대표값으로 가정하였다. 배기 체적유량 21 L/s와 배기가스 온도 380 K는 EURO 6 승용차의 전형적인 배기 조건을 나타내는 값으로 설정하였다. 이러한 가정값들을 이용해 시간대별 NO₂ 질량분율을 계산한 후, 이를 배기구 Mass flow inlet 경계조건의 종(Species) 분율로 입력하여 배기구에서 배출되는 NO₂ 농도를 모사하였다.

본 연구에서 고려한 주행 조건에서는 실내 NO₂ 농도가 주로 외기 유입에 의해 결정되고, 배기구를 통한 자동차 배출 기여는 전체 질량유량과 농도 수준에서 2차적인 항으로 작용한다. 따라서 배기 NO_x 중 NO₂ 비율을 선행연구에서 보고된 범위 내에서 변화시켜도, 실내 평균 농도 및 피크의 절대값에는 일정 수준의 차이가 발생할 수 있으나 외기 모드에서의 필터·혼합·지연 특성에 대한 본 연구의 결론적 경향은 유지될 것으로 판단된다. 보다 정량적인 민감도 해석은 향후 연구에서 별도로 수행할 예정이다.

3. 연구 결과

3.1 기본 유동 형상 및 NO₂ 전달 경로 검증

본 연구에서 구축한 CFD 모델이 실차 조건의 기본 유동 구조를 적절히 재현하는지 확인하기 위해 정상상태 기반의 유동 검증을 먼저 수행하였다. 모델 전체를 포함한 외부 Enclosure를 설정하고 Velocity inlet을 부여하여 유동을 계산한 결과, Fig. 7과 같이 차량 전면 범퍼-후드 전방의 정체영역, 후방의 저압 후류(Wake)와 재순환 영역 등 차량 공력 특유의 기본 유동 형상이 명확하게 나타났다. 또한 캐빈 내부에서는 덕트-캐빈-에어벤트로 이어지는 연속 유량 경로가 확보되었고, 운전석·조수석 상부로의 유량 분배 역시 실차 공조 특성과 부합함을 확인하였다.

NO₂ 해석에서도 Fig. 8과 같이 흡기 덕트/필터 전·후

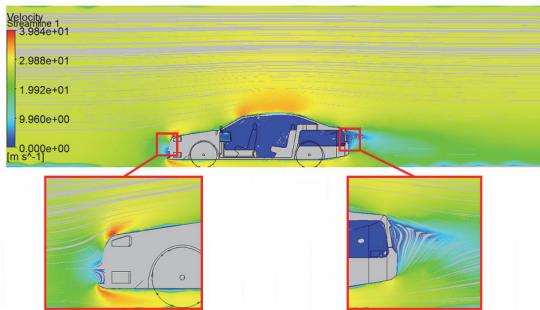


Fig. 7 Velocity streamlines showing the front stagnation region and rear wake, confirming the baseline validity of the CFD model



Fig. 8 NO₂ mass-fraction contours on the mid-plane

단의 농도 구배가 형성되고, 필터 통과 이후 캐빈 내부로 확산되어 배출 벤트를 통해 외기로 배출되는 유입-혼합-배출 과정이 연속적으로 재현되었다. 이러한 결과는 실차 주행으로부터 제공된 속도·외기 농도 입력이 CFD 유동장 전체에 물리적으로 일관되게 반영되었음을 보여주며, 이후 시간 의존 해석을 위한 기반 모델로서의 타당성을 검증한다.

3.2 UDF 기반 시간의존 속도 경계조건 정합성 검증

실측 데이터의 제한된 시간 해상도로 인해 UDF 보간 과정에서 시간축 불일치나 신호 왜곡이 발생할 수 있으므로, 이를 방지하기 위해 UDF로 전달된 경계값이 원 시계열의 변화 패턴과 타이밍을 정확히 재현하는지 확인하였다.

Fig. 9는 외기 속도와 외부 NO₂의 실제 데이터와 UDF 데이터를 비교하는 그래프이다. 실도로 주행에서 취득한 시계열 데이터를 UDF로 연결하여 경계조건을 시간에 따라 갱신하였다. 데이터는 Time(s), Speed, NO₂열로 구성되며, 속도는 해석 입력 시 SI 단위(m/s)로 사용하였다. NO₂값은 이상기체 가정하에 몰분율(ppb)에서 질량분율로 변환하여 종(Species) 경계에 부여했다.

속도 곡선은 전 구간에서 거의 동일하게 추세가 맞아 UDF 경계 갱신이 안정적으로 작동함을 확인하였다. 다만 약 1,317 s 부근에서 80 km/h 이상의 단발성 스파이크를 보이는 반면 실제 데이터는 직전부터 0 km/h로 감소하는 구간이 나타난다. 이 불일치는 실측 데이터의 1초 샘플 간격 경계에 위치한 값이 보간 과정에서 순간적으로 반영된 것으로, UDF의 시간 동기화나 보간 메커니즘의 구조적 한계라기보다는 데이터 샘플 간격에 기인한 국지적 현상으로 판단된다. 이러한 구간은 전체 추세 재현성에는 영향을 미치지 않으나, 교차상관 분석을 통해 미세

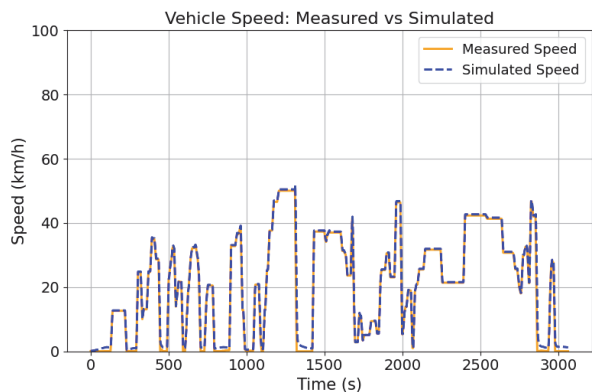


Fig. 9 Measured and simulated inlet-speed boundary condition, smoothed with an 11-point moving average (solid: measured, dashed: simulated)

시차를 확인하고 해당 방향으로 1 s 시프트하여 재정렬한 결과, 오차 지표와 상관 지표가 개선됨을 확인하였다.

3.3 외기·내기 NO₂의 실측-시뮬레이션 정합성 분석 및 지연 보정 평가

외기 NO₂의 시계열 비교 결과, 시뮬레이션과 실측 데이터는 전체적인 농도 변화 패턴에서 대체로 유사한 경향을 나타냈다(Fig. 10). 전 구간 상관계수는 0.78로 중등도 이상의 일치성을 보였으며, MAE와 RMSE는 각각 13.38 ppb와 33.45 ppb, MBE는 +2.75 ppb로 나타나 평균 농도 수준에서는 비교적 작은 편차를 보였다. 다만 고농도 구간에서는 실측 피크(631.2 ppb)에 비해 시뮬레이션 피크가 494.6 ppb로 약 -21.6 % 낮게 재현되었고, 피크 도달 시점 역시 다소 늦게 나타났다. 이러한 차이는 외기 농도의 급격한 변화가 필터와 덕트 등을 통과하는 과정에서 자연스럽게 완만해지는 물리적 감소 효과에 기인하며, 특히 필터의 점성·관성 저항이 순간 유량 응답을 제한하고 공극률이 전체 통과량을 조절하는 등 필터 저항계수들이 피크 감쇠에 더 큰 영향을 미치는 경향이 있다. 또한 모델의 시간 의존 응답이 이러한 전달 과정을 완전히 추종하지 못한 점도 일부 영향을 미친 것으로 보인다.

내기 NO₂의 재현성은 외기보다 낮게 나타났다. 전체 구간 상관계수는 0.51이며, MAE와 RMSE는 각각 21.18 ppb와 24.20 ppb, MBE는 -20.71 ppb로 분석되어 시뮬레이션이 평균적으로 실측보다 약 20 ppb 높게 예측하는 경향을 보였다. 본 실험에서 사용된 필터는 활성탄이나 촉매가 포함되지 않은 비반응성 섬유 필터로서 NO₂에 대한 화학적 흡착·정화 기능은 갖고 있지 않지만, 섬유

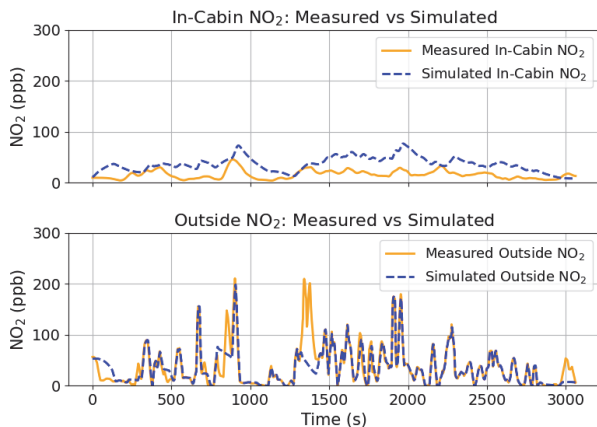


Fig. 10 In-cabin and outside NO₂ time series (top: in-cabin, bottom: outside). Measured and simulated signals were smoothed using a 21-point moving average (solid: measured, dashed: simulated)

표면에서의 경미한 물리적 흡착이 발생할 가능성은 존재한다. 이러한 비반응적 표면효과는 실내 측정 농도를 소폭 감소시키는 방향으로 작용할 수 있으며, 이에 따른 흡착 효과의 미반영이 평균 MBE의 일부에 기여했을 가능성이 있다. 다만 전체적인 과대예측은 캐빈 내부 체류·혼합 거동, 필터 후단의 유동 지연, 그리고 덕트-캐빈-배출 경로의 과도응답이 단순화된 모델에서 충분히 표현되지 못한 데에서 주로 기인한 것으로 판단된다. 이동평균 기반의 시계열 비교에서는 저농도 배경 구간의 장기 추세는 유사하게 재현되었지만, 농도 상승·하강 속도나 피크 크기에서는 불일치가 확인되었다.

시계열의 시간적 차이는 교차상관 분석을 통해 정량적으로 평가하였다. 외기 NO₂는 수 초 이내의 작은 시차를 보였으나, 내기 NO₂는 필터 통과 지연과 캐빈 체류영역의 영향이 더해지며 약 52 s 수준의 뚜렷한 응답 지연이 나타났다(Fig. 11). 이는 외기 농도 변화가 캐빈 내 측정 위치에 반영되기까지 일정한 전달 시간이 존재함을 보여주며, 다만 유동 경로와 필터의 저항 특성이 복합적으로 작용한 결과로 볼 수 있다. 특히 본 연구의 모델 구성상 필터 구간의 압력강하·속도 감쇠가 전체 지연의 상당 부분을 형성하고, 그 다음으로 HVAC 덕트 내부의 체류시간과 캐빈 내부의 완만한 혼합 과정이 순차적으로 영향을 더하는 것으로 판단된다. 이러한 정성적 비중 분석은 향후 후단 유동장 모델 개선이 지연 예측 정확도를 높이는 데 우선적으로 고려되어야 함을 시사한다. 이

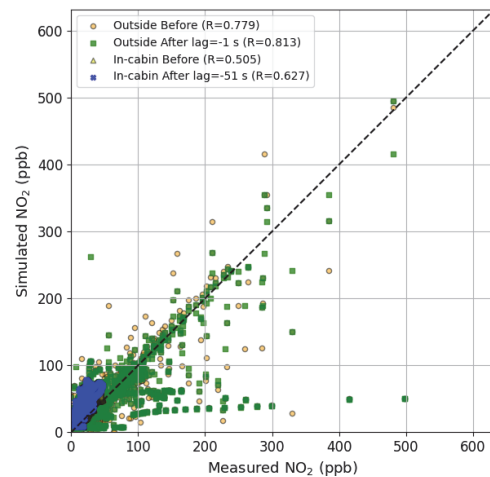


Fig. 11 Scatter plots of measured versus simulated NO₂ concentrations for both in-cabin and outside locations. The figure displays values before and after applying the optimal lag correction (outside: -1 s; in-cabin: -51 s). The dashed line represents the 1:1 reference line

러한 시차를 보정해 시물레이션 시계열을 재정렬한 경우, 내기 NO₂의 상관계수는 0.505에서 0.627로 향상되어 시간 지연을 고려한 비교가 실내 농도 재현성을 평가하는 데 유효함을 확인하였다.

종합적으로, 모델은 외기 농도의 저주파 추세와 캐빈 내 장기적 농도 변동은 비교적 잘 재현하였으나, 고농도 피크나 급격한 농도 변화에서는 필터·혼합부·캐빈 체류영역의 완만한 응답 특성이 충분히 반영되지 않아 시간적 차이가 발생하였다. 이는 향후 필터 후단 응답 특성, 순간 유량 변동, 캐빈 체류시간 등을 포함한 동적 요소를 보다 정교하게 고려할 필요가 있음을 시사한다.

4. 결론

본 연구에서는 실도로 주행에서 취득한 속도 및 외기 NO₂ 시계열을 CFD에 연동하여, 필터-덕트-캐빈으로 이어지는 실제 유입 경로를 모사하고 실내 NO₂의 시변 거동을 정량적으로 분석하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 시간의존 UDF 경계조건은 실도로 주行的 비정상 특성을 효과적으로 재현하였다. 외기 NO₂와 차량 속도는 실측과 시물레이션 간에 각각 상관계수 0.78, 0.98 수준의 높은 정합성을 보였다. 외기 NO₂의 고농도 피크는 실측 대비 약 20 % 낮고 수 초 지연되는 경향을 보였으나, 전체 추세와 배경 농도는 양호하게 일치하였다. 이는 UDF 기반 경계 갱신과 다공성 필터 모델이 정적 시나리오로는 설명하기 어려운 동적 농도 변동을 일정 수준 재현함을 의미한다.
- 2) 실내 NO₂는 필터·덕트·캐빈 체류영역의 영향으로 재현 난도가 높았으나, 시간지연 보정을 통해 정합성이 개선되었다. 전체 구간에서 MAE 21.18 ppb, RMSE 24.20 ppb, MBE -20.71 ppb로 실내 농도가 평균적으로 과대 예측되는 경향이 있었으며, 상관계수는 0.51 수준이었다. 교차상관 분석 결과 약 52 s의 응답 지연이 확인되었고, 이를 보정할 경우 상관계수는 0.627로 향상되었다. 이는 캐빈 내부의 체류·혼합 거동과 필터 후단 지연 효과가 실내 오염물질 전달 특성을 결정하는 핵심 요인임을 시사한다.

본 연구의 프레임워크는 실차 기반 시간의존 입력을 CFD에 직접 연결함으로써, 필터 사양·유량 조건·환기 모드 변화에 따른 NO₂ 유입·감쇠·지연 특성을 정량적으로 비교할 수 있는 도구로 활용 가능하다. 향후 PM_{2.5} 등 다른 오염물질과 필터의 화학적 반응 모델을 추가함으로써 실내 공기질 예측 정확도를 더욱 향상할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 재원으로 한국형 Green NCAP 평가기술 개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00243220).

References

- 1) L. P. Xiang and H. Q. Wang, "Numerical Simulation of Pollutant Transport within a Vehicle Cabin," *Communications in Computer and Information Science*, Vol.216, pp.575-579, 2011.
- 2) A. T. Chan and M. W. Chung, "Indoor-Outdoor Air Quality Relationships in Vehicle: Effect of Driving Environment and Ventilation Modes," *Atmospheric Environment*, Vol.37, No.27, pp.3795-3808, 2003.
- 3) J. W. Seo and Y. H. Choi, "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*, Vol.227, No.8, pp.1162-1172, 2013.
- 4) K. Choi, S. Yoo and H. Lee, "Sensitivity Analysis of Sampling Locations for External Pollutants in Vehicles Using CFD," *Transactions of KSAE*, Vol.33, No.1, pp.1-7, 2025.
- 5) S. Tajdaran, F. Bonatesta, B. Mason and D. Morrey, "Simulation of Traffic-Born Pollutant Dispersion and Personal Exposure Using High-Resolution Computational Fluid Dynamics," *Environments*, Vol.9, No.6, Paper No.67, 2022.
- 6) V. N. Matthaios, L. J. Kramer, L. R. Crilley, R. Sommariva, F. D. Pope and W. J. Bloss, "Quantification of Within-Vehicle Exposure to NO_x and Particles: Variation with Outside Air Quality, Route Choice and Ventilation Options," *Atmospheric Environment*, Vol.240, Paper No.117810, 2020.
- 7) M. Lesage, D. Chalet and J. Migaud, "Experimental Analysis and Quantification of Air Infiltration into a Passenger Car Cabin," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol.99, Paper No.103006, 2021.
- 8) S. Daly, *Automotive Air-Conditioning and Climate Control Systems*, 1st Edition, Butterworth-Heinemann (Elsevier), Oxford, p.4, 2006.