

# CFD를 활용한 차량 외부 오염물질 샘플링 위치 민감도 해석

최규권<sup>1)</sup> · 유성식<sup>2)</sup> · 이흥식<sup>2)</sup>

중부대학교 미래자동차융합공학과<sup>1)</sup> · 중부대학교 스마트모빌리티공학과<sup>2)</sup>

## Sensitivity Analysis of Sampling Locations for External Pollutants in Vehicles Using CFD

Kyu Kwon Choi<sup>1)</sup> · Sung Sic Yoo<sup>2)</sup> · Heung-Shik Lee<sup>\*2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Future Vehicle Convergence Engineering, Joongbu University, Gyeonggi 10279, Korea

<sup>2)</sup>Department of Smart Mobility Engineering, Joongbu University, Gyeonggi 10279, Korea

(Received 24 October 2024 / Revised 10 November 2024 / Accepted 2 December 2024)

**Abstract :** In this study, we performed a sensitivity analysis of external air pollutant sampling locations by using computational fluid dynamics(CFD) in determining the difference in pollutant levels between the exterior and interior of a vehicle. To assess the extent to which pollutants from the outside environment enter the vehicle's interior, it is crucial to measure the air quality inside and outside the vehicle simultaneously. Typically, an external air sampling nozzle is installed on the vehicle's exterior for sampling in driving conditions; however, this measure often leads to vehicle damage, making experimental sensitivity testing challenging. In this study, sampling locations were selected by considering environmental factors that could affect air quality sampling, such as the vehicle's orientation(front/side), intake nozzle length, and turbulence caused by side mirrors. A flow analysis was conducted at each sampling location, and the mass fraction of NO<sub>2</sub> accumulated at each point over time was measured and compared. Based on these results, we proposed an optimal sampling location for external air pollutants after considering aerodynamic factors.

**Key words :** Computational fluid dynamics(전산 유체 역학), I/O air quality in vehicle(차량 실내외 공기질), Nitrogen dioxide(NO<sub>2</sub>), Sampling nozzle(샘플링 노즐), Green NCAP(그린 앤캡)

### 1. 서론

최근 자동차 개발에서 주행 성능 향상뿐만 아니라 승객이 느끼는 쾌적성이 중요한 설계변수가 되고 있으며 자동차 실내 공기질에 대한 관심이 증가하고 있다.<sup>1-2)</sup> 이와 함께 세계 각국은 자동차 실내 기준 강화를 위한 노력과 국제 표준화 연구를 활발히 진행 중이다. 하지만 현재 자동차 실내로의 배기가스 유입에 대한 측정 방법과 허용 기준이 부재한 상황이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 많은 연구자들이 실험과 시뮬레이션을 통해 차량 외부 오염물질의 차 실내 유입에 대해 연구를 진행하였다.

Matthaios 등<sup>3)</sup>은 실제 주행 실험을 통해 승용차 실내에서의 NO<sub>2</sub>와 PM<sub>2.5</sub> 농도의 변화를 조사하여 차량 외부 오염물질 농도와 어떻게 관련되는지를 분석하였다. Chan과

Chung<sup>4)</sup>은 교통 밀도, 환기 모드 및 도로 유형과 같은 다양한 주행 조건에서 실내-실외(I/O) 공기질의 관계를 연구하였다. Abi-Esber와 El-Fadel<sup>5)</sup>은 자가 오염, 외부 샘플 채취 위치 및 기상 변화가 차량 내부 농도에 미치는 영향을 조사하는 실차 실험을 실시하였다. 이 실험을 통해 차량의 앞쪽 윈드실드 근처에서 외부 샘플을 채취하는 경우 차량 내부 공기질과 가장 많이 상관관계를 보이기 때문에 이 위치에서의 샘플링을 지양해야 함을 제시하였다.

하지만 차량의 실내외 공기질 분석을 위해서는 실험적으로 규명할 수 없는 다양한 조건에서의 차량 주변 및 내부 유동에 대한 시뮬레이션 기반의 유동 해석이 필요하다. 현재 CFD(Computational Fluid Dynamics)는 실차 실험에 필요한 시간과 비용을 줄이기 위한 현대적인 대

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

<sup>\*</sup>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.



안으로서 최근 정교해진 자동차 공기역학적 설계의 다양한 단계에 광범위하게 적용되고 있다.<sup>6)</sup>

Seo와 Choi<sup>7)</sup>는 CFD를 활용하여 차량 실내 공기질을 개선하기 위해 다양한 실내 환기율과 공기 흐름 속도에 따른 차량 실내 오염물질의 감소 특성을 조사하고, 효과적인 운영 조건을 제안하였다. Chang 등<sup>8)</sup>은 다양한 환기/순환 모드에서 소형 승용차의 실내 공기질을 조사하기 위해 CFD를 수행하였고, 이산화탄소 농도를 1000 ppm에서 2000 ppm 사이로 유지하기 위한 에어컨 환기 전략을 제안하였다. 그러나 차량 공기질 관련 CFD 연구는 주로 차량 내부 환기에 중점을 두고 있어, 차량 외부 오염물질의 실내 유입에 대한 수치 해석적 연구는 상대적으로 부족한 실정이다.

본 연구는 ‘한국형 Green NCAP’ 개발과 제도화를 위한 프로젝트의 일환으로 진행되었다. 차량 외부에서 발생한 오염물질이 실내로 유입되는 정도를 평가하고 등급화하려면, 다양한 환경에서 실차 테스트를 통해 차량 내부의 공기질을 평가하는 과정이 필요하다. 이때 외부 공기질이 내부 공기질에 상당한 영향을 미치므로, 두 가지를 동시에 측정하는 것이 중요하다. 외부 공기질을 측정하기 위해서는 대개 차량 외부에 샘플링 노즐을 설치하여 주행 중에 외부 공기를 수집하지만, 샘플링 위치에 따라 차량이 손상되는 경우가 많아 실차 기반으로 민감도를 테스트하기가 어렵다.

우리는 차량 외부에서 내부로의 오염물질 유입을 평가하기 위해 샘플링 위치에 따른 CFD 기반의 민감도 해석을 실시하였다. 차량의 전면 및 측면, 흡입 노즐의 길이, 사이드미러에 의한 난류 등의 주요 환경 변수를 고려하여 총 6개의 샘플링 위치를 선정하고, 각 위치에서 유동 해석을 수행하였다. 일정 시간 동안 각 샘플링 위치에서 NO<sub>2</sub>의 질량 분율을 측정하고 이를 비교함으로써, 공기역학적 요인을 고려한 외부 오염물질의 최적 샘플링 위치를 제안한다.

## 2. 연구 방법

차량 외부 공기질 포집 해석을 위해 외기 속도, 흡입기 위치 및 흡입기 길이에 따른 오염물질 포집 농도를 분석하였다. 차량의 저속 및 고속 주행상태 모사를 위해 30, 60, 100 kph의 외기 속도를 설정하였고, 각각의 속도에 대해 여섯 가지 흡입기 위치를 설정하여 유동 해석을 수행하였다. 해석 대상 오염물질은 NO<sub>2</sub>로 설정하였다. 일정 시간 동안 공기 분석기에 측정되는 NO<sub>2</sub>의 질량 분율(Mass fraction)을 비교 인자로 삼아 외기 속도, 흡입기 위치 및 길이에 따른 차이를 분석하고, 최적의 흡입기 위치를 도출하는 것을 목표로 하였다.

### 2.1 모델링 및 격자 생성

차량의 공기역학적 특성을 반영하기 위해 기존의 세단 형상 차량 디자인을 참고하여 Fig. 1과 같이 사이드 미러를 포함한 전체 차량을 모델링하였다. 차량의 제원은 Table 1과 같으며, 유체 이동에 중요한 부분인 사이드 미러의 제원은 Table 2와 같다. 모델링을 위해 사용된 소프트웨어는 CATIA이다.

공기질 측정기는 Fig. 2와 같이 직육면체 형상으로 단순화하여 외기를 흡입하기 위한 노즐이 결합된 형상으로 모델링 하였다. 여기서 노즐의 길이는 실차 실험에 사용되는 공기질 측정기의 길이를 참고하여 모델링 하였다. 흡입기는 10 mm의 내경을 가지며, 흡기구가 차량의 진행 방향을 향하고 배기구는 차량 반대 방향으로 향하도록 하였다.

공기질 측정 노즐의 위치는 Fig. 3과 같이 노즐의 길이, 높이, 사이드미러 근접성을 고려하여 여섯 가지 경우로 구분하였다.

먼저 차량의 정면과 측면의 효과를 비교하기 위해 Case 1과 2는 정면에, 나머지 네 경우는 측면에 위치하였다. 또한 노즐의 길이에 따른 효과를 분석하기 위해 Case 1과 2는 각각 전체 길이 4050 mm과 430 mm으로 모델링

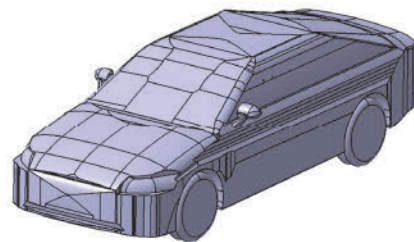



Fig. 1 Three-dimensional model of a sedan for CFD

Table 1 Specifications of the vehicle model

Overall length / Width	4912 mm / 1847 mm
Overall height / Wheelbase	1475 mm / 2834 mm
Overhang	Front: 947 mm Rear: 1136 mm

Table 2 Specifications of the side mirror model

	Length of mirror	222.7 mm
	Height of mirror	141.4 mm
	Width of mirror	90.6 mm
	Height of mirror including neck	203.1 mm

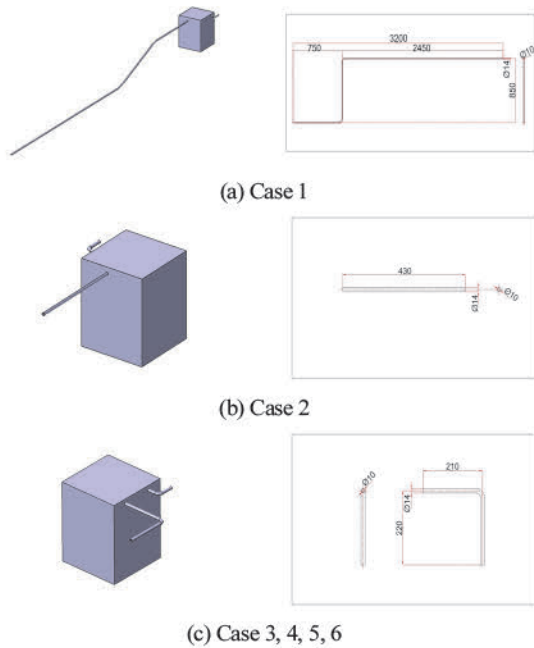


Fig. 2 Three-dimensional model of air quality measurement equipment and sampling nozzle

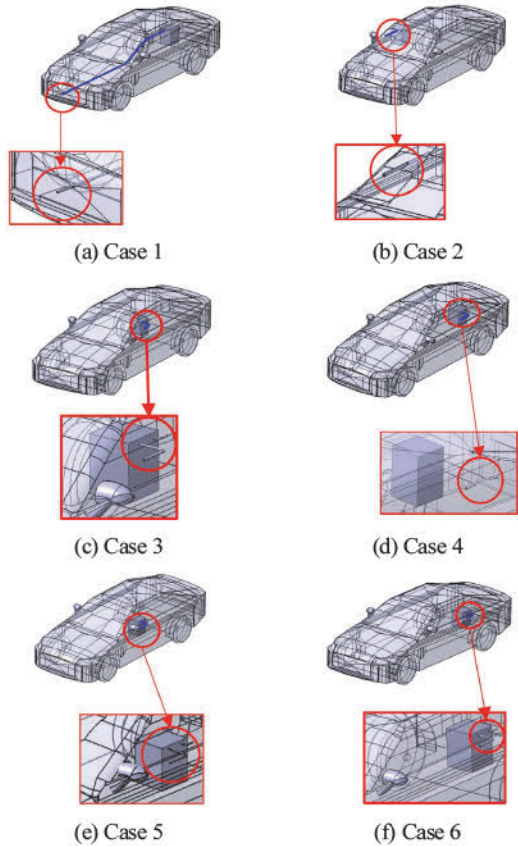


Fig. 3 Vehicle models representing six cases that consider various positions of the sampling nozzle

하였다. 이는 노즐의 위치가 전면부 그릴에 위치한 경우와 앞좌석 창문을 이용한 경우에 공기질 측정기의 위치가 뒷좌석 또는 조수석으로 이동함에 따라 전체 노즐 길이에 영향을 받게 됨을 고려하였다. 나머지 경우에 대해서는 430 mm의 노즐 길이로 동일하게 설정하였다.

다음으로 사이드미러 근접성에 대한 효과를 비교하기 위해 Case 3과 4는 사이드미러에 의해 발생하는 난류의 영향을 받지 않도록 경계층의 높이를 고려하여<sup>9)</sup> 노즐의 높이를 사이드 미러보다 165 mm 높게 설정하였다. 흡입기 위치는 각각 차량 앞좌석과 뒷좌석의 측면에 위치하도록 하였다. Case 5와 6의 경우는 Case 3과 4와 횡축 위치는 동일하며 사이드미러에 의한 기류 변화를 받는 위치로 선정하여 사이드미러와 같은 높이로 설정하였다.

유동 해석을 위한 격자 모양은 Polyhedral로 설정하였다. 격자의 크기는 표면 격자(Surface mesh) 크기와 셀(Cell)의 길이로 Table 3과 같이 설정하였다. 유동 영역은 Fig. 4와 같이 차량 외기를 Outer fluid, 공기질 측정기 및 노즐관 내부를 Inner fluid로 구분하여 정의하였다. 본 해석에서 차량 내부 영역은 Dead zone으로 설정하였다. 유동장 추출, 격자 생성 및 유동 해석에 사용된 소프트웨어는 ANSYS Fluent이다.

Table 3 Mesh configuration for the car, outer fluid, and inner fluid

	Surface mesh (mm)				Max cell length (mm)	
	Minimum		Maximum			
Car	0.97		122.8		267.88	
Outer fluid	0.97		249.12		305.66	
Inner fluid	0.71 (Front)	0.51 (Side)	18.25 (Front)	13.18 (Side)	23.83	17.19

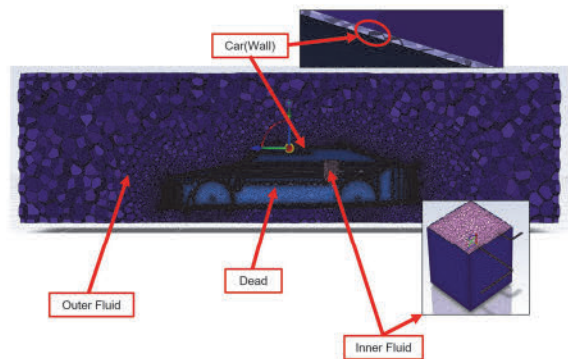


Fig. 4 Flow domain configuration for air quality monitor and nozzle: Outer fluid and inner fluid separation



### 2.2 경계조건 및 해석 조건 설정

유동 해석에 필요한 경계조건은 Fig. 5와 같이 Outer fluid에 해당하는 차량 외기와 Inner fluid에 해당하는 노즐관의 유입 및 배출구에 주어진다. Outer inlet은 차량 주행 풍을 모사하기 위해 Velocity inlet 조건으로 30, 60, 100 kph로 설정하였으며 Outer outlet은 Pressure outlet으로 설정하였다. 공기질 측정기의 유입 부분은 Inner inlet으로 Fan 조건을 부여하여 두 유동장의 경계면에 놓여있는 공기질 측정기를 통한 유입을 모사하였다. Fan 속도는 실차 실험에서 사용되는 공기질 측정기의 흡입 성능을 반영하여 분당 유량이 약 28 L/min인 공기질 측정기를 모사하도록 Inlet과 Outlet의 Fan 조건을 각각 50 m/s와 6 m/s의 접선속도로 설정하였다. 외부 오염물질의 NO<sub>2</sub> 질량 분율은 전체 공기의 8 %에 해당하도록 설정하였으며, 22 °C의 온도에서 60초 동안 포집하여 공기질 측정기 내의 평균 질량 분율을 분석하였다.

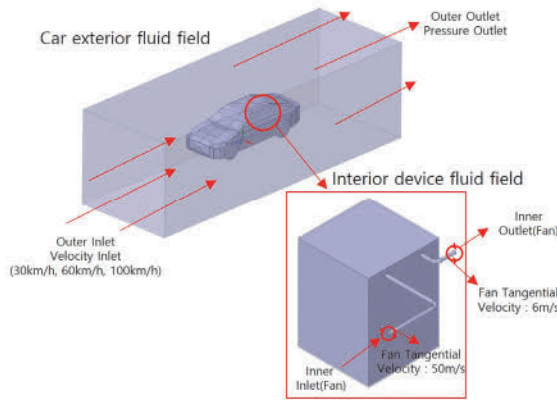


Fig. 5 Boundary condition

## 3. 연구 결과

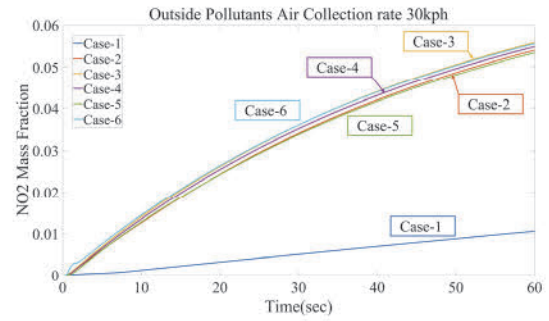
### 3.1 외기 속도와 노즐 길이의 영향 분석

Table 4와 Fig. 6은 외기 속도와 노즐의 위치에 따라 공기질 측정기에 포집된 NO<sub>2</sub>의 평균 질량 분율을 각각 수치와 그래프로 보여준다. 각 외기 속도(30, 60, 100 kph)에서의 NO<sub>2</sub> 포집 효율을 정량적으로 분석한 결과, 속도가 증가할수록 NO<sub>2</sub>의 포집량도 증가하는 경향을 보였으며, 이는 다양한 Case에서 일관되게 나타났다.

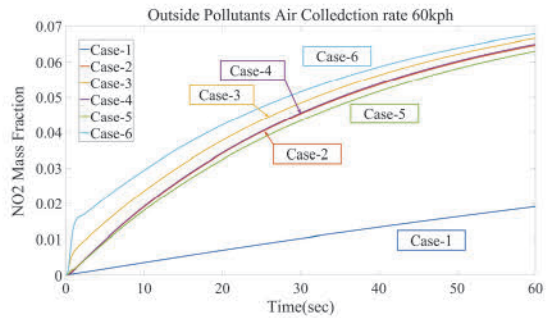
Table 4에서 60초 동안 포집된 NO<sub>2</sub>의 평균 질량 분율 ( $M$ )은 외기 속도 ( $V$ )와 다음과 같은 관계식을 가진다:

$$M = aV + b$$

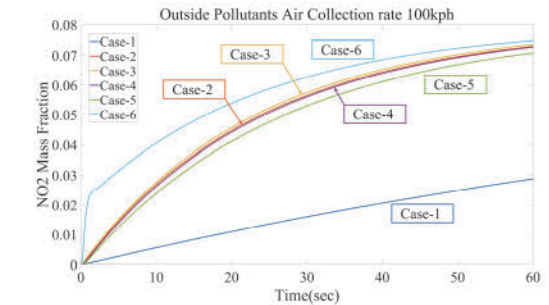
여기서  $a$ 는 외기 속도의 증가에 따른 NO<sub>2</sub> 포집량의 증



(a) 30 kph



(b) 60 kph



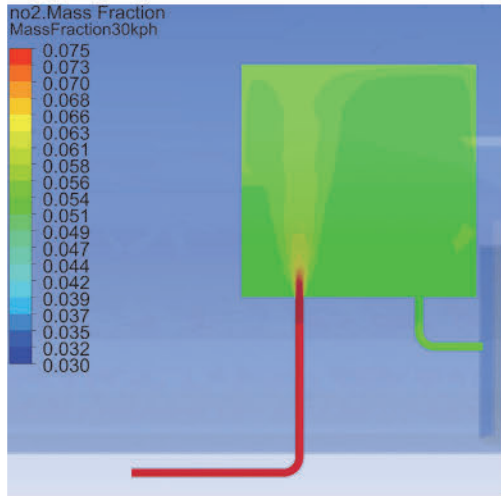
(c) 100 kph

Fig. 6 Mass fraction for each case according to vehicle exterior air speed (60 seconds)

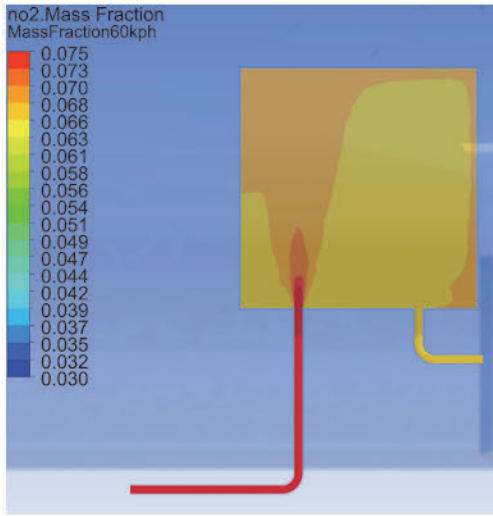
Table 4 Final average mass fraction for each case according to vehicle exterior air speed (60 seconds)

kph	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
30	0.011	0.054	0.056	0.055	0.053	0.056
60	0.019	0.065	0.067	0.065	0.063	0.068
100	0.029	0.073	0.074	0.073	0.071	0.075

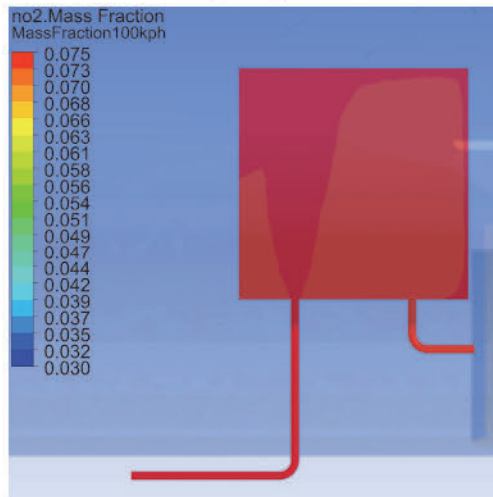
가율을 의미하며,  $b$ 는 NO<sub>2</sub>가 유입되지 않는 경우의 기준 질량 분율을 나타낸다. Table 4의 결과로부터  $a$ 는 모든 Case에 대해 약  $2.6 \times 10^{-4}$ 이고  $b$ 는 Case 1의 경우  $3.4 \times 10^{-3}$ , 나머지 Case의 경우 약  $4.8 \times 10^{-2}$ 로 나타난다. 이는 Fig. 7과 같이 흡기 노즐의 입구를 주행 방향과



(a) 30 kph

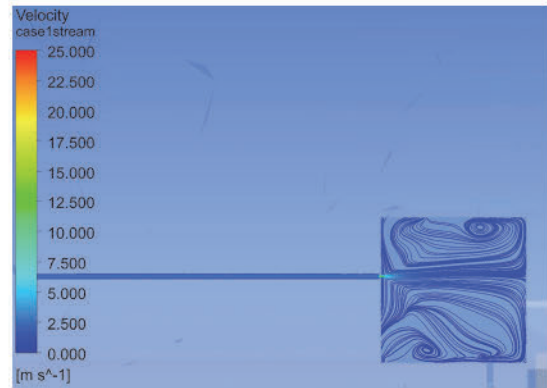


(b) 60 kph

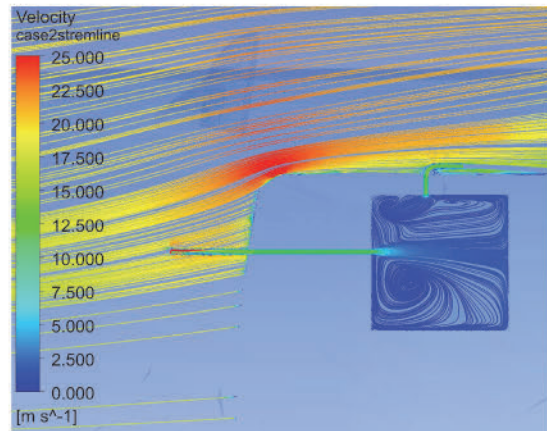


(c) 100 kph

Fig. 7 Mass fraction contour of the air quality measurement device cross-section for external air speed



(a) Case 1



(b) Case 2

Fig. 8 Streamlines and velocity distribution along the length of the sampling nozzle(Case 1 and 2)

일치시키며 노즐로 유입되는 외부 오염물질의 유입 속도에 영향을 주는 것으로 사료된다.

Case 1과 나머지 Case의 노즐 길이는 각각 4050 mm와 430 mm이고 Fig. 8과 같이 노즐의 길이가 길어질수록 노즐 내 유속이 감소하여 포집 효율이 낮아지는 결과를 보인다. 실제로 좁은 노즐의 파이프 관에서 층류가 형성되면 관내 유동은 다음과 같은 Hagen-Poiseuille 방정식을 따르는 것으로 알려져 있다:

$$\Delta p = \frac{8\pi\mu LQ}{A^2}$$

여기서  $\Delta p$ 는 압력강하,  $\mu$ 는 점성계수,  $L$ 은 관의 길이,  $Q$ 는 유량 그리고  $A$ 는 관의 단면적을 의미한다. 이 식으로부터 일정한 압력 차이와 환경에 대해서 유량은 관의 길이와 반비례 관계에 있음을 고려할 때, Table 4에서 노즐의 길이와 질량 분율의 관계는 난류 유동의 효과에 의해 추가적인 손실이 발생하는 것으로 해석된다.



결과적으로 Case 1과 같이 차량 라디에이터 그릴 부분에 노즐 흡입구를 설치하는 경우 공기질 측정기로부터의 거리가 길어짐으로 흡입 효율 저하를 가져올 수 있음을 보여준다.

### 3.2 사이드미러 및 포집 위치 영향 분석

Fig. 9와 10은 차량 사이드미러로 인해 흡입 노즐 근처의 유선과 유속 패턴의 변화를 보여준다.

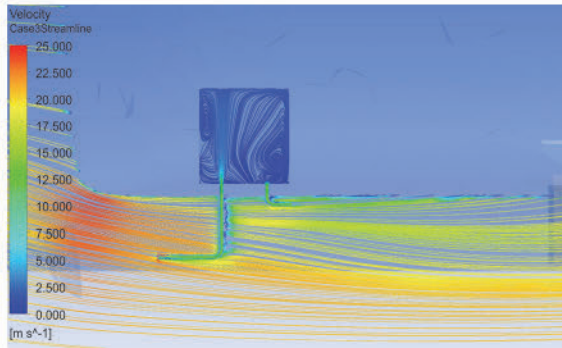
먼저 Fig. 9에서 Case 3과 4는 흡입 노즐이 사이드미러보다 높은 위치에 있는 경우를 보여준다. 두 경우 모두 A-필러를 지나면서 유속이 증가하는 흐름을 나타낸다. 그러나 Case 3의 흡입 노즐이 A-필러에 더 가까이 위치하여 Case 4에 비해 노즐로 유입되는 유속이 더 빠르다. 이는 Case 3에서 노즐 주변으로 집중되는 고속 유선에서 잘 드러난다. 실제로 Table 4에서 모든 외기 속도에 대해 Case 3가 4보다 약 1~3% 수준의 높은 포집량을 보임을 확인할 수 있다.

Fig. 10에서 Case 5와 6은 흡입 노즐이 사이드미러와 같은 높이에 있는 경우를 보여준다. 따라서 Case 5와 6에서는 외기가 사이드미러를 지나며 와류를 형성하는 외

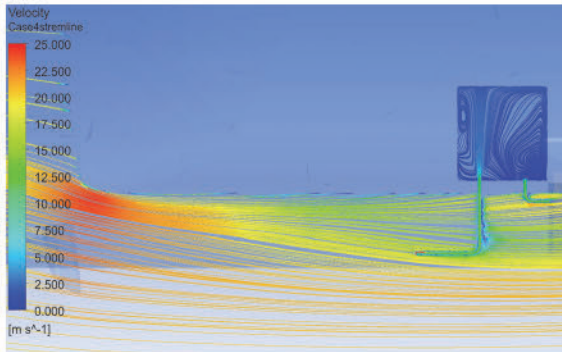
기의 유동 특성이 나타난다. Case 5는 사이드미러 하단에서 발생하는 와류가 층류로 발전하기 전에 흡기 노즐로 들어가고 있는 것을 확인할 수 있다. 반면 Case 6의 경우 사이드미러를 지나며 발생한 와류가 어느 정도 층류를 이룬 후에 노즐로 유입되는 것을 확인할 수 있다. Table 4에서 Case 6은 5에 비해 모든 외기 속도에서 약 5~7% 높은 포집량을 나타내었다.

한편, Case 2와 Case 3~6은 같은 길이의 흡기 노즐이 각각 차량의 정면과 측면에 설치되어 있는 차이를 갖는다(Fig. 6 참조). Table 4에서의 보여지는 포집된 NO<sub>2</sub>의 질량 분율의 차이는 4% 이내로 나타나며 비교적 A-필러나 사이드미러의 영향을 받지 않는 Case 4의 경우는 Case 2와 거의 모든 외기 속도에 대해 비슷한 포집률을 나타내었다.

결과적으로 흡기 노즐의 위치는 사이드미러나 차량 디자인에 의해 발생하는 공기역학에 영향을 받으며 본 연구에서 진행된 해석의 경우 공기질 측정기에 포집되는 NO<sub>2</sub>의 평균 질량 분율에 대해 약 7% 이내의 포집량 차이를 나타내었다. 다만 와류 등의 유동을 발생시키는 요인이 없는 경우 차량의 정면과 측면의 포집에는 차이가 거의 없는 것으로 파악된다.

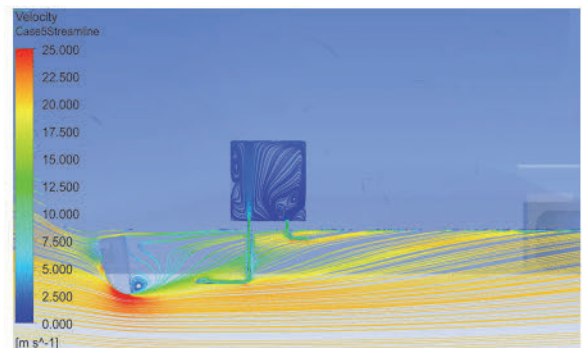


(a) Case 3

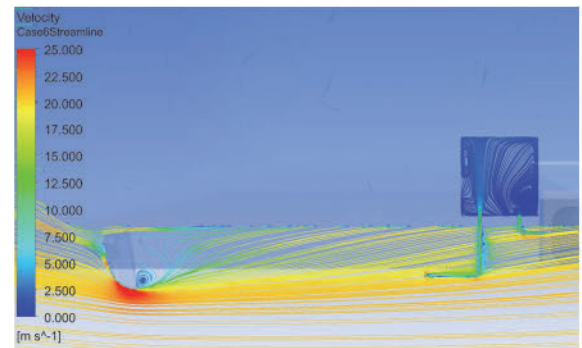


(b) Case 4

Fig. 9 Streamlines and velocity distribution along the length of the sampling nozzle(Case 3 and 4)



(a) Case 5



(b) Case 6

Fig. 10 Streamlines and velocity distribution along the length of the sampling nozzle(Case 5 and 6)

#### 4. 결론

본 논문에서는 외부 오염물질의 성분분석을 위한 공기 흡입기의 위치 선정을 위한 유동 해석을 진행하였다. 자동차의 손상을 최소화하며 외부 오염물질 분석을 위한 흡기 노즐의 최적 위치 선정을 위하여 Case study를 진행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 사이드미러 근처에서 발생하는 유동 변화와 와류는 흡입 노즐의 위치에 따라 외부 오염물질 포집 효율에 미세한 차이를 초래하였다. 와류가 층류로 발전하기 전에 노즐로 유입될 때 포집 효율이 낮아지는 경향이 있었다.
- 2) 같은 노즐 길이에 대해 차량의 정면과 측면에 대한 차이는 크게 발생하지 않았다. 따라서 실차 실험 시 흡기 노즐을 가급적 짧게 설치하기에 용이한 측면 창문에서의 흡기 노즐 설치 위치인 Case 4 또는 6이 적합할 것으로 사료된다.

향후 연구에서는 실차 실험 데이터를 기반으로 한 검증을 진행하고, 이를 바탕으로 미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)를 포함한 다양한 외부 오염물질이 차량 내부로 유입되는 과정에 대한 메커니즘을 분석하고자 한다.

#### 후 기

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

#### References

- 1) C. Park, J. Kim, D. Lee, D. Lee and Y. Kang, "Development of Ram Air Control AHU to Improve Cabin Thermal Comfort," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.1014-1021, 2021.
- 2) G. Sung, M. Kim, S. Choi, G. Jung and I. Kong, "Optimization of the Filter Characteristic by PM

- Size Distribution," KSAE Spring Conference Proceedings, p.479, 2019.
- 3) V. N. Matthaios, L. J. Kramer, L. R. Crilley, R. Sommariva, F. D. Pope and W. J. Bloss, "Quantification of Within-Vehicle Exposure to NOx and Particles: Variation with Outside Air Quality, Route Choice and Ventilation Options," Atmospheric Environment, Vol.240, Paper No.117810, 2020.
- 4) 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.
- 5) L. Abi-Esber and M. El-Fadel, "Indoor to Outdoor Air Quality Associations with Self-Pollution Implications Inside Passenger Car Cabins," Atmospheric Environment, Vol.81, pp.450-463, 2013.
- 6) K. Toshio and K. Kozo, "A Review of CFD Methods and Their Application to Automobile Aerodynamics," SAE Special Publication SP-908, Vehicle Aerodynamics: Wake Flows, CFD, and Aerodynamic Testing, pp.53-64, 1992.
- 7) 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.
- 8) T. B. Chang, Y. S. Lin and Y. T. Hsu, "CFD Simulations of Effects of Recirculation Mode and Fresh Air Mode on Vehicle Cabin Indoor Air Quality," Atmospheric Environment, Vol.293, Paper No.119473, 2023.
- 9) H. Schlichting and K. Gersten, Boundary-Layer Theory, Springer, 2016.