

자동차 전면 유리의 제상 성능 정합성 검증 연구

김수빈* · 김영재* · 김윤제**

A Study on the Consistency of Defrosting Performance
of the Windshield in Auto-vehicles

Subin Kim*, Youngjae Kim*, Youn-Jea Kim**

Key Words: Defrosting performance(제상성능), Windshield(자동차 전면유리), Auto-vehicle(자동차), CFD(전산유체 해석), Consistency(정합성)

ABSTRACT

The windshield of a vehicle plays an important role in ensuring driver safety and maintaining visibility. To prevent issues such as frost and mist from occurring inside and outside the vehicle, research related to the defrosting performance of the windshield is being conducted. Evaluating defrosting performance requires accurate thermal flow analyses. Therefore, in this study, a defrosting duct was constructed within a chamber at an actual vehicle scale to evaluate its performance, and a finite element model was developed and verified. To evaluate defrosting performance, the temperature of the windshield was measured under condition with a mass flow rate of 0.1 kg/s, which corresponds to that of a typical midsize vehicle. A total of 45 thermocouples were arranged at equal intervals of 9 widths and 5 lengths on the windshield to measure the temperature and compare it with the temperature predicted through finite element analysis. A volume grid was created in the main flow area to ensure accurate thermal flow analyses, and a prism layer was added at the interface between the windshield and fluid. In total, 6 million grid systems were formed. Comparing the temperature fields of the experimental results and the finite element analysis results confirmed a similar defrosting pattern, with an average temperature difference of 0.64K.

1. 서론

자동차의 전면 유리는 운전이나 사고 발생 시 도로의 위험 요소로부터 운전자와 승객의 안전을 지키고, 운전자의 전방 시야 확보하는 역할을 한다. 특히, 운전자의 전방 시야 확보는 주행 안전성에 큰 영향을 미치기에 전면 유리의 가시성 확보가 중요하다. 이러한 가시성 확보를 위해 차량 운전석 전방에는 공조 시스템(Heating, Ventilating,

and Air Conditioning, HVAC)이 설치되어 있다. 이 내부 공조 시스템에서 제상 모드를 가동하면 운전자의 시야를 방해하는 성에를 제거할 수 있다. 각 나라에서는 법적으로 SAE(Society of Automotive Engineers) J381, FMVSS(Federal Motor Vehicle Safety Standard) 103 등으로 제상 성능을 제정하여, 일정 시간 내에 제상 성능을 확보할 수 있도록 규제하고 있다. 이와 같이 차량 내부 공조 시스템의 제상 모드 기능은 중요하므로 제상 성능을 향상시키기 위한 연구를 시험과 수치해석으로 진행해 왔다. Kim과 Lee⁽¹⁾는 제상 덕트의 가이드 베인 형상에 따른 유동 특성을 실험적으로 규명하고, 유동 형태를 가시화하였다.

* 성균관대학교 기계공학과, 대학원생

** 성균관대학교 기계공학부, 교수

E-mail: yjkim@skku.edu

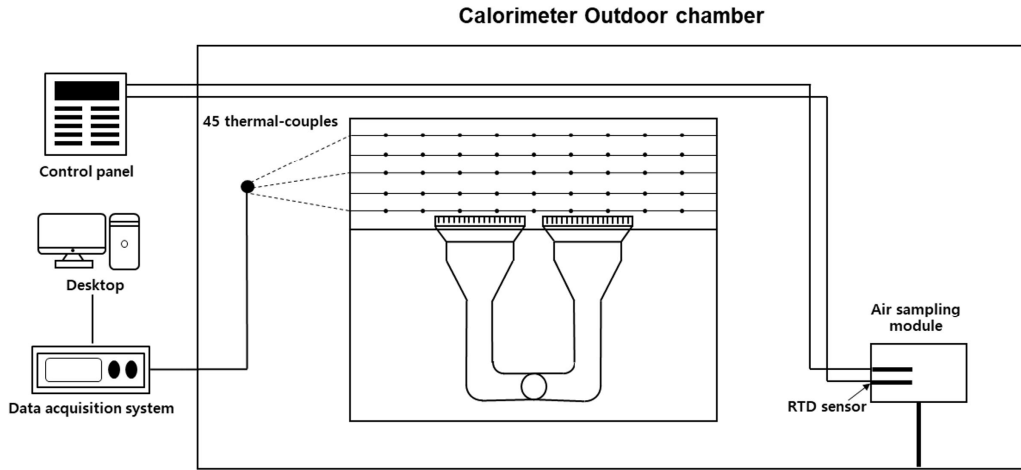


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

최적의 성능을 갖는 제상 덕트를 제안하였으며, 입구 가이드 베인 외에도 층돌각, 노즐 형상 등이 제상 성능에 많은 영향을 미친다고 밝혔다. Kim 등⁽²⁾은 열용량법을 이용하여 성에 제거 과정을 수치적으로 모사하여 실험적 연구 결과와 비교함으로써 제상 조건을 만족하는지 판단하였다. 제상 패턴은 수치해석 상의 결과가 실험 결과보다 약 5분 정도의 시간차가 발생하였으나, 성에가 녹는 제상 패턴은 실험 결과와 해석 결과가 유사하다고 밝혔다. Kang 등⁽³⁾은 수치해석으로 전면 유리의 성에가 10분 이내로 녹는 결과를 도출하였다. 이러한 수치해석 결과의 검증을 위해 실험을 수행하였으며, 실험과 수치해석의 결과 편차는 5%로 수치해석은 제상 시스템에 유용한 설계 도구가 될 수 있다고 밝혔다. Kim 등⁽⁴⁾은 제상 노즐 각도와 가이드 베인 각도에 따라 우수한 제상 성능을 보이는 설계 조건을 도출하였다. 도출한 결과를 기준으로 제상 노즐과 가이드 베인을 제작하여 실험을 수행하였으며, 전산해석과 실험의 결과가 유사함을 확인하였다. Wang 등⁽⁵⁾은 수치해석으로 입구의 파라미터를 입구 유형, 온도, 속도, 각도 등으로 설정하고, 제상 성능의 영향을 고찰하여 제상 성능을 보장하는 각 파라미터에 해당하는 최적의 수치를 도출하였다.

본 연구에서는 제상 성능을 예측하기 위해 정확한 열-유동 해석이 선행되어야 하므로 실제 차량 스케일의 챔버를 제작하여 제상 덕트의 성능을 시험하였다. 시험 조건을 해석에 반영하여 수치해석 모델을 구축하였으며, 실험적 결과와 해석적 결과를 비교 분석하여 제상 성능을 판단하였다.

2. 본 론

2.1. 시험

2.1.1. 시험 장비

제상 성능 측정을 위한 시험 장비는 Fig. 1에 도시하였으며, 시험은 제어판(control panel)을 통해 일정한 온도와 습도 조건을 설정할 수 있는 칼로리미터 챔버 내에서 진행하였다. 시험 장비는 실제 차량 크기 기준으로 제작되었으며, 크기는 1,500 mm×1,800 mm이다. 시험 장비 내부에는 차량용 제상 덕트가 원통형으로 제작되어 설치되었으며, 목표 유량 설정을 할 수 있는 송풍기 유량 제어 장치를 설치하였다. 제상 덕트의 상하좌우 풍향 조절을 모사하기 위해 3D 프린터로 제작한 가이드 베인을 덕트 출구에 설치하였다. 송풍기에서 토출되는 유동의 균일화를 위해 타공판을 설치하고, 오리피스 필터를 설치하여 유량을 측정할

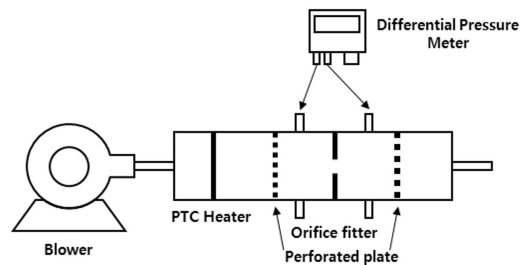


Fig. 2 Schematic of piping for defrosting duct

수 있도록 하였다. 오리피스 필터는 차압 측정 장치랑 연결되어 있으며, 덕트의 배관 개략도는 Fig. 2와 같다.

2.1.2. 시험 방법

본 연구에서는 일반 중형차 운전석으로 유입되는 유량인 0.1 kg/s를 목표 유량으로 설정하여 시험을 진행하였다. 시험 장비에 설치된 오리피스 필터에서 발생한 차압으로 유량을 얻을 수 있다. 목표 유량을 달성하기 위해 유량에 따른 차압을 다음 식을 통해 계산하였다.

$$Q = CA_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (1)$$

여기서 Q 는 유량, C 는 유량 계수, A_0 는 오리피스 필터 단면적, Δp 는 오리피스 필터 전후단의 차압, ρ 는 유체의 밀도이다. 차압은 오리피스 필터 전후단에서 1분 동안 측정하였다. 차압 계산 조건은 Table 1에 기술하였으며, 0.1 kg/s의 질량 유량에 따라 계산된 차압은 $\Delta p = 539.63$ Pa이다. 계산된 결과를 바탕으로 목표 유량을 달성하기 위해 송풍기를 제어하였다. 송풍기에서 발생한 유량은 스테인리스 관을 통해 제상 덕트로 이동하며, 제상 덕트에서 전면 유리로 토출된 공기의 온도를 측정하기 위해 Fig. 3과

Table 1 Conditions for calculating differential pressure

Condition	Value
Maximum rotation frequency (Hz)	60
Pipe diameter(m)	0.125
Orifice diameter (m)	0.075
Orifice coefficient C	0.6490
Air density (kg/m ³)	1.127

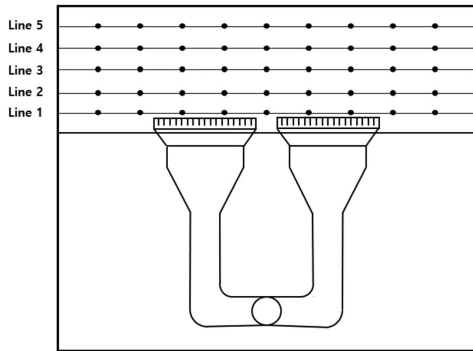


Fig. 3 Thermocouple locations on the windshield

같이 5개의 선 위치에 각 선마다 9개의 열전대를 설치하여 총 45개의 열전대를 고려하였다. 설치된 열전대로 온도를 측정하고, 데이터 수집 장치(DAQ970A)와 컴퓨터를 이용하여 측정된 온도 결과를 얻었다.

2.2. 전산 유체 해석

2.2.1. 지배 방정식

제상 덕트 성능 해석을 위해 ANSYS사의 상용 코드 Fluent ver 23. R1을 사용하였다. 제상 덕트의 유동 및 열 흐름 계산을 위해 다음과 같은 지배 방정식을 적용하였다.

- 질량 보존 방정식 :

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2)$$

- 운동량 보존 방정식 :

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) \\ = -\nabla p + \nabla \cdot \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \vec{I} \right] + \rho \vec{g} \end{aligned} \quad (3)$$

- 유체 영역의 에너지 보존 방정식 :

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) \\ = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) \end{aligned} \quad (4)$$

- 고체 영역의 에너지 보존 방정식 :

$$\nabla \cdot (k \nabla T) = 0 \quad (5)$$

여기서 k_{eff} ($k + k_t$, k_t 는 사용되는 난류 모델에 따라 정의된 난류 열전도도)는 유효 전도도, \vec{J}_j 는 j 의 확산 선속이다. 난류 유동 해석을 위한 모델로 Standard $k-\omega$ 모델을 적용하였다. Standard $k-\omega$ 모델은 벽 경계 흐름 및 자유 전단 흐름 예측에 유용하며, k 와 ω 의 수송 방정식은 다음과 같이 표현된다.

- k 와 ω 의 수송 방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega \quad (7)$$

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega} \quad (8)$$

여기서 k 는 난류 운동 에너지, ω 은 에너지 소산율, G_k 는 평균속도 구배로 인한 난류 운동 에너지 생성항, G_ω 는 에너지 소산율 생성항, 그리고 Y_k 와 Y_ω 은 난류로 인해 소산되는 정도를 의미한다.

2.2.2. 해석 모델 및 경계조건

해석 모델은 유동이 균일한 제상 덕트 내 오리피스 필터 이후부터 고려하여 Fig. 4와 같이 모델링하였다. 전면 유리와 유동장 사이의 정확한 해석을 위해 전면 유리를 5 mm 두께를 가진 고체로 설정하였고, 전면 유리의 물성치는 일반적인 유리 물성치를 부여하였다(Table 2 참조).

유동장의 입구는 제상 덕트로 유입되는 경계면에서 일반 중형차 운전적으로 유입되는 유량인 0.1 kg/s로 313 K(40°C)의 온풍이 토출되는 것으로 설정하였다. 유입되는 작동 유체는 공기이며, 내부 유동장의 대류 현상을 고려하기 위해 온도에 따른 물성 변화를 주었다(Table 3 참조). 유동장의 출구는 제상 덕트 기준 옆단, 후단 영역으로 설정하고, 대기압력을 부여하였다. 전면 유리를 고려한 복합 열전달 해석은 유동장과 전면 유리와의 대류와 전면

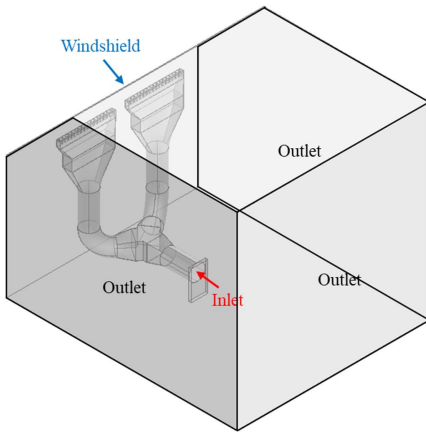


Fig. 4 Numerical model of defrosting duct

Table 2 Material properties of windshield

Material: glass (solid)	
Property	Value
Density (kg/m ³)	2,511
Thermal conductivity (W/m·K)	0.785
Specific heat (J/kg·K)	790.6
Thickness (m)	0.005

유리의 전도가 중요하므로 대류 열전달 계수와 전도 열전달 계수를 각각 고려하였으며, 연구에 사용된 경계조건을 Table 4에 기술하였다.

본 연구에 사용된 난류 모델은 Standard $k-\omega$ 이며, 난류 모델의 타당성 검증을 위해 시험 결과와 해석 결과를 비교하였다. 검증에 사용된 다른 난류 모델은 SST $k-\omega$, Realizable $k-\epsilon$, RNG $k-\omega$, Standard $k-\epsilon$ 모델이다. 각 난류 모델에 대해 전면 유리의 5개 선 위치에서 시험과 해석의 평균 온도 차이를 계산한 결과, Standard $k-\omega$ 모델이 벽 경계 흐름을 효과적으로 모사하면서 전반적으로 평균 온도 차이를 최소화하여 이 난류 모델을 선정하였다 (Table 5 참조).

Table 3 Air density according to temperature

Material: air (fluid)	
Temperature (K)	Air density (kg/m ³)
273.15	1.292
278.15	1.269
283.15	1.246
288.15	1.225
293.15	1.204
298.15	1.184
303.15	1.164
308.15	1.145
313.15	1.127

Table 4 Boundary conditions applied in this study

Conditions		
Inlet	Mass flow rate (kg/s)	0.1
	Temperature (K)	313
Outlet	Gauge pressure (Pa)	0
Fluid	Temperature(K)	293
Fluid-Solid	Convective coefficient (W/m ² ·K)	10

Table 5 Average temperature differences based on turbulence models

Turbulence model	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5
SST $k-\omega$	1.69	0.09	0.15	0.37	0.78
Standard $k-\omega$	1.60	0.03	0.43	0.36	0.79
RNG $k-\epsilon$	1.75	0.11	0.39	0.32	0.55
Standard $k-\epsilon$	4.59	8.46	7.60	6.57	5.04
Realizable $k-\epsilon$	1.94	0.61	0.36	0.31	0.70

2.2.3. 격자 의존성 테스트

정확한 열-유동 해석을 위해 전면 유리 및 주 유동 영역에 국소 격자(local mesh)를 구성하고, 전면 유리와 유체 사이 경계에 경계층 격자(prism layer)를 고려하였다. 또한, 벽면으로부터 거리에 따른 유체 속도를 계산하기 위해 사용되는 무차원 수인 y^+ 값을 5 이하로 설정하여 벽면 경계층을 효과적으로 모사할 수 있도록 하였다. 해석 결과의 신뢰성을 위해 전면 유리에 위치한 5개의 선에 대한 평균 온도와 시험 결과 및 해석 결과의 평균 상대 오차를 기준으로 격자 의존성을 평가하였다(Fig. 5 참조). 평가에 기반하여 선정된 격자의 수는 평균 온도가 수렴하면서 평균 상대 오차가 낮은 9,372,230개이다.

2.3. 해석 결과

2.3.1. 제상 덕트의 유동 특성

제상 덕트 출구에서의 유량 분배 특성을 통해 제상덕트의 성능을 평가할 수 있다. 연구에 사용된 제상 덕트는 2개의 토출구가 있으며, 각 토출구에 대한 유량을 계산하기 위해 Fig. 6과 같이 토출구의 영역을 보조석 토출구(vision area, a)와 운전석 토출구(vision area, b)로 구분하였다. 해석을 통해 해당 토출구 영역에 대한 평균 질량 유량을

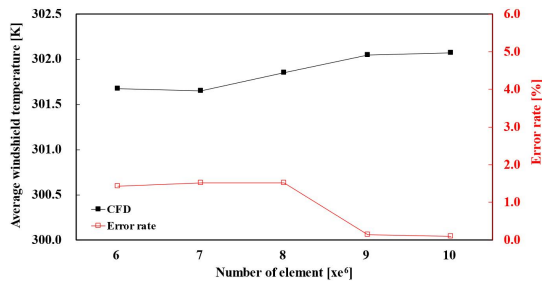


Fig. 5 Grid dependence test

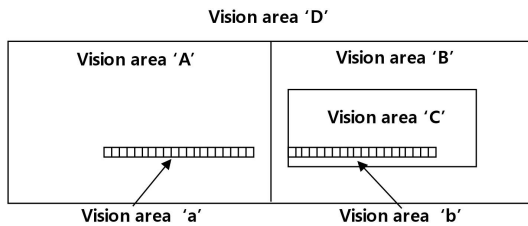


Fig. 6 Vision areas on the windshield

계산하면 보조석 토출구(vision area, a)의 질량 유량은 0.0495 kg/s, 운전석 토출구(vision area, b)의 질량 유량은 0.0497 kg/s이다. 제상 덕트의 입구 질량 유량(0.1 kg/s) 대비 보조석 및 운전석 토출구 질량 유량을 백분율로 환산하면 보조석 토출구(vision area, a)는 49.5%, 운전석 토출구(vision area, b)는 49.7%로 각 토출구의 질량 유량이 균일하게 분배되었음을 확인할 수 있다. 이는 제상 덕트를 통과하는 동안 발생하는 압력 강하가 최소화됨을 의미하므로 제상 덕트의 성능이 양호하다고 판단할 수 있다.

2.3.2. 전면 유리의 유동 특성

전면 유리의 속도와 온도 분포를 통해 제상 덕트 성능을 평가하기 위해 Fig. 6과 같이 보조석(vision area, A), 운전석(vision area, B), 운전석 시야(vision area, C), 전면 유리(vision area, D)로 구분하였다. 운전석 시야(vision area, C) 영역은 가시성 확보를 위해 속도 및 온도 분포가 높아야 한다. Kim과 Lee⁽¹¹⁾에 따르면, 덕트의 적절성을 평가하기 위해 전면 유리의 유속 분포를 측정하고, 전면 유리에서 2 m/s 이상의 속도 분포가 형성되면 제상 성능이 양호하다고 판단할 수 있다고 한다. 이러한 속도 분포는 전면 유리에서 속도가 균일하게 분포되면서 유동 손실이 최소화될 때 나타난다. 해석 결과, 운전석 시야(vision area, C) 영역의 속도는 2.341 m/s, 온도는 307.81 K로 2 m/s 이상의 속도 분포를 확인하였다(Table 6 참조).

전면 유리의 속도와 온도의 균일한 분포는 제상 덕트의 성능을 나타내며, 특히 보조석(vision area, A)과 운전석(vision area, B) 영역에서의 분포가 균일해야 한다. 해석 결과, Table 6에 기술한 바와 같이 보조석(vision area, A)과 운전석(vision area, B)의 평균 속도 및 온도 분포가 유사하였다. 이는 전면 유리(vision area, D) 영역에서도 확인할 수 있다. 또한, 속도 및 온도 분포가 Fig. 7, Fig. 8과 같이 대칭적인 양상을 보이며, 시야 확보가 중요한 운전석 시야(vision area, C) 영역에는 상대적으로 높은 속도 및 온도 분포가 형성되었다. 이로써 제상 덕트의 성능을 확인할 수 있었다.

Table 6 Temperature and velocity distributions at different vision area

Vision area	A	B	C	D
Average temperature (K)	304.89	304.91	307.81	304.84
Average velocity (m/s)	1.595	1.590	2.341	1.553

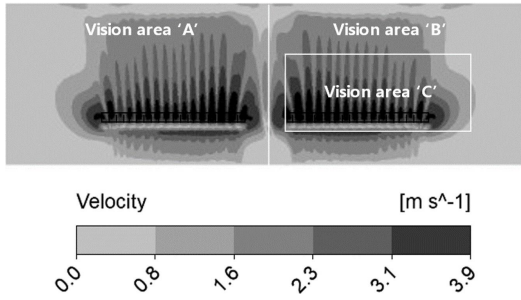


Fig. 7 Velocity distribution in the vicinity of windshield

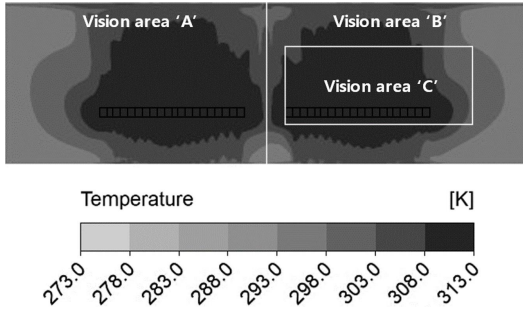


Fig. 8 Temperature distribution in the vicinity of windshield

2.3.3. 시험과 해석 결과 비교

전면 유리의 line 1~5에 대해 측정된 시험 결과와 계산된 해석 결과를 비교하여 평균 온도 차이를 확인하였다 (Fig. 9 참조). Line 1~5에서 평균 온도 차이는 각각 1.60 K, 0.03 K, 0.43 K, 0.36K, 0.79 K으로 line 2에서 평균 온도 차이가 가장 낮았으며, line 1에서는 상대적으로 더 높은 차이를 보였다. 열전달 차이를 정량화하기 위해 대류 열전달 및 열전도 계수를 계산하였다(Fig. 10 참조). 해석에서 line 1은 다른 선에 비해 대류가 낮고, 전도가 높아 Fig. 11과 같이 대류보다 전도 열전달의 영향이 지배적이다. 즉, 유리를 통해 열이 외부로 전달되어 시험 결과보다 온도가 더 낮게 계산되어 차이를 발생시켰다.

이와 달리, line 3~5에서는 전도보다 대류의 영향이 지배적이다(Fig. 11 참조). 시험 측정 방법은 전면 유리의 온도를 측정하는 열전대가 유리 내부에 삽입된 형태가 아닌 유리 내면에서 측정되어 내부 유동장의 대류 영향을 받는다. 즉, 시험 결과는 전도보다 대류에 지배적이므로 line 3~5는 시험과 해석의 온도 분포가 상대적으로 일치하였다. 이로써 시험과 해석의 온도 분포가 전반적으로 유사한 결과를 보였으며, 모든 선에 대한 평균 온도 차이는 0.64 K로 해석과 시험 결과의 정합성을 확인하였다.

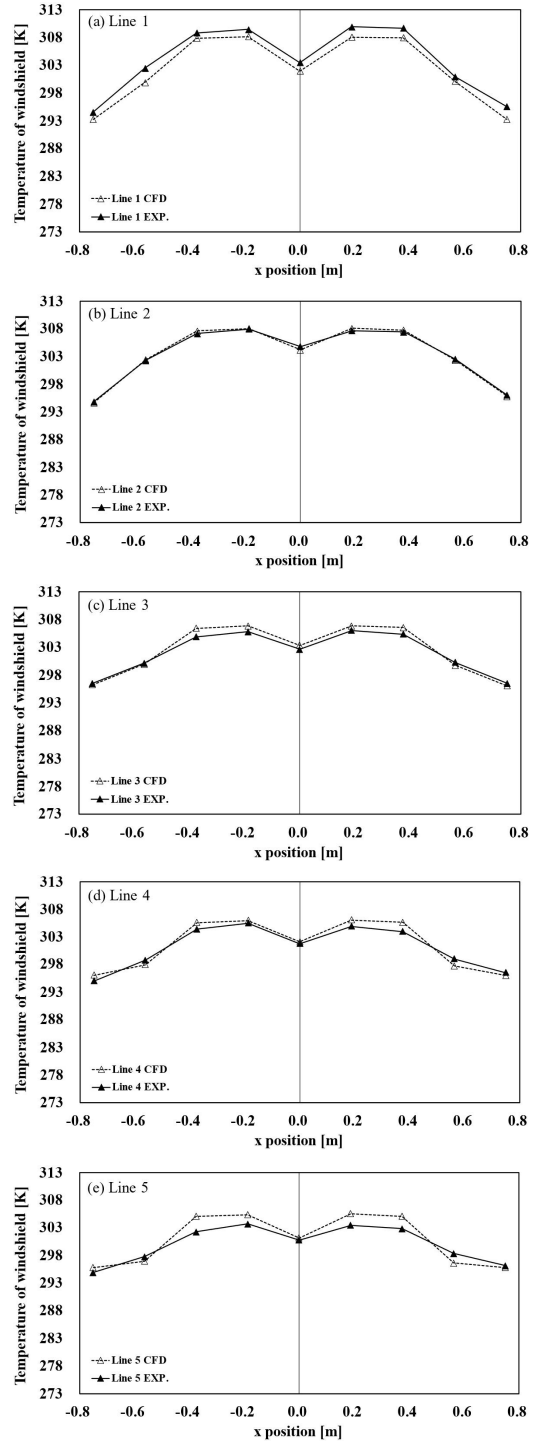


Fig. 9 Windshield temperature distribution according to x position, (a) Line 1, (b) Line 2, (c) Line 3, (d) Line 4, (e) Line 5

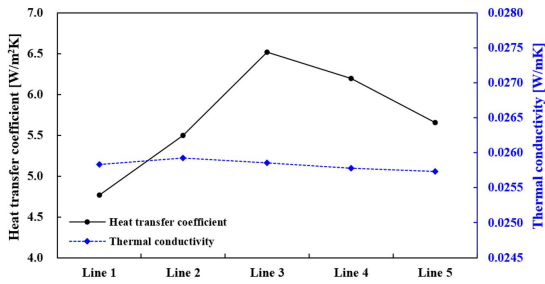


Fig. 10 Windshield heat transfer coefficient and thermal conductivity according to lines

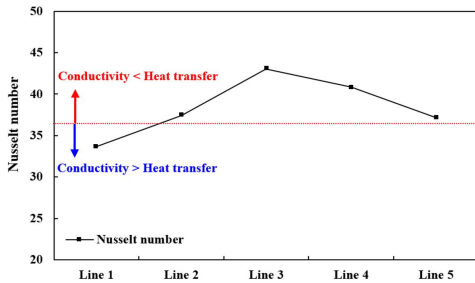


Fig. 11 Windshield Nusselt number according to lines

3. 결론

본 연구에서는 자동차 제상 성능에 대해 시험과 해석 결과를 비교 분석하여 정합성을 검증하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 시험과 해석 결과 평균 온도 차이를 기준으로 난류 모델의 유효성을 검증하였다. 이를 위해 5가지 난류 모델과 비교하였으며, Standard $k-\omega$ 난류 모델이 벽 경계 흐름을 효과적으로 모사하면서 시험과 해석 결과의 평균 온도 차이가 최소화됨을 확인하였다.
- 2) 제상 덕트 성능은 토출구에서의 분배 유량과 전면

유리에서의 속도 및 온도 분포를 통해 평가할 수 있다. 해석 결과, 제상 덕트 토출구의 유량 분배가 균일하고, 운전석 시야(vision area, C) 영역의 속도 분포가 2 m/s 이상임을 확인하여 제상 성능을 검증하였다.

- 3) 전면 유리에서의 시험과 해석 결과의 온도 분포가 전반적으로 유사한 결과를 보였으며, 평균 온도 차이가 0.64 K로 정합성을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Kim, D. J., and Lee, J. K., 2008, "Effects of an Inlet Guide Vane on the Flowrate Distribution Characteristics of the Nozzle Exit in a Defrost Duct System," Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 16, No. 4, pp. 88~96.
- (2) Kim, Y. K., Yang, J. S., Kim, K. C., and Ji, H. S., 2011, "Numerical Study on the Performance Assessment for Defrost and De-Icing Modes," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, Vol. 35, No. 2, pp. 161~168.
- (3) Kang, S., Kader, M., Jun, Y., and Lee, K., 2011, "Automobile defrosting system analysis through a full-scale model," International Journal of Automotive Technology, Vol. 12, No. 1, pp. 39~44.
- (4) Kim, H. I., Kim, J. S., Kim, M., I., and Lee J. Y., 2019, "Numerical Analysis for Improvement of Windshield Defrost Performance of Electric Vehicle," Journal of the Korea Academia-Industrial, Vol. 20, No. 5, pp. 477~484.
- (5) Wang, Y., Liu, M., Li, Y., Kong, B., and Chen, J., 2023, "Defrosting Characteristics of the Cockpit Windshield of Manned Airships," Journal of Physics: Conference Series, Vol. 2468, No. 1, p. 012159.