

전기자동차 전면유리 제상성능 개선을 위한 전산수치 해석

김현일¹, 김재성^{2*}, 김명일³, 이재열⁴

¹포항금속소재진흥원 기술지원실, ²한밭대학교 산학협력단,
³한국과학기술정보연구원 가상설계센터, ⁴전남대학교 산업공학과

Numerical Analysis for Improvement of Windshield Defrost Performance of Electric Vehicle

Hyun-Il Kim¹, Jae-Sung Kim^{2*}, Myung-Il Kim³, Jae Yeol Lee⁴

¹Corporation Support Department, Pohang Institute of Metal Industry Advancement

²Industry-University Cooperation Foundation, Hanbat National University

³Supercomputing Modeling & Simulation Center, Korea Institute of Science and Technology Information

⁴Industrial Engineering, Chonnam National University

요약 차량에 거주하는 시간이 증가하면서 탑승자는 차량의 높은 주행성능과 더불어 쾌적하고 안정성 높은 승차 환경을 원하고 있다. 자동차 전면유리 제상성능은 운전자의 안전운전을 위해 필수적으로 요구되는 성능 중 하나이다. 자동차의 전면유리의 성에 제거 성능을 향상시키기 위해서는 제상 노즐의 형상과 같은 관련 요소들을 적절하게 설계하여야 한다. 본 논문에서는 소형 전기자동차의 제상성능 개선을 위하여 CFD 기반의 전산수치해석을 수행하였다. 자동차 전면유리에 뜨거운 공기를 분사하는 제상 노즐과 가이드 베인의 각도를 변경하면서 제상 성능해석을 수행하였다. 전산수치해석 결과, 제상노즐 각도 70° 및 가이드 베인 설치 각도 60°인 경우가 가장 우수한 제상성능을 보이는 것으로 분석되었다. 해석결과를 바탕으로 제상노즐과 가이드 베인을 제작하여 제상실험을 수행하였으며, 해석결과와 실험결과가 매우 유사함을 확인할 수 있었다. 또한 실험결과, 자동차 전면유리의 성에가 20분 이내 80% 제거됨을 확인 할 수 있어, FVMSS 103 규정을 만족하는 제상성능을 확보한 것으로 판단된다.

Abstract As the residence time in the vehicle increases, the passenger desires a pleasant and stable riding environment in addition to the high driving performance of the vehicle. The windshield defrosting performance is one of the performance requirements that is essential for driver's safe driving. In order to improve the defrosting performance of the windshield of a vehicle, relevant elements such as the shape of the defrost nozzle should be appropriately designed. In this paper, CFD based numerical analysis is conducted to improve defrost performance of small electric vehicles. The defrost performance analysis was performed by changing the angle of the defrost nozzle and the guide vane that spray hot air to the windshield of the vehicle. Numerical simulation results show that the defrosting performance is best when the defrost nozzle angle is 70 ° and the guide vane installation angle is 60 °. Based on the analytical results, the defrosting experiment was performed by fabricating the defrost nozzle and the guide vane. As a result of the experiment, it is confirmed that the frost of windshield is removed by 80% within 20 minutes, and it is judged that the defrost performance satisfying the FVMSS 103 specification is secured.

Keywords : Defrost, Windshield, CFD, Defrost Nozzle, Guide Vane, Electric Vehicle

*Corresponding Author : Jae-Sung Kim(Hanbat National Univ.)

Tel: +82-42-821-8419 email: jaesungkim@hanbat.ac.kr

Received February 8, 2019

Revised March 29, 2019

Accepted May 3, 2019

Published May 31, 2019

1. 서론

자동차는 단순한 이동 수단을 넘어 운전자와 승객의 안정감, 쾌적함을 제공할 수 있는 실내 환경을 갖도록 요구 받고 있다[1]. 혹서기와 혹한기에는 에어컨과 히터의 성능에 따라 탑승자의 승차 환경이 달라지고 있으며, 특히 혹한기에는 차량 전면유리에 서리(frost) 및 성애가 생겨 운전자의 시야를 방해하여 안전운행에 좋지 않은 영향을 미치기도 한다[2] 일반 승용차량과 마찬가지로 전기자동차의 경우에도 쾌적한 실내 환경 유지와 제어는 물론 운전자의 안전을 위해서 냉난방이 가능한 적절한 에어컨 시스템과 겨울철 전방유리면에 결빙된 성애를 효율적으로 제거할 수 있는 제상기능이 필요하며 이는 국내는 물론 외국에서의 도로주행을 대비하여 반드시 갖추어야 할 필수기능이라 할 수 있다. 특히 전기 자동차는 일반 차량과 다르게 배터리의 소모가 차량 운행 거리에 영향을 미치기 때문에 최소의 전기를 소모하여 성애를 효율적으로 제거해야 할 필요가 있다.

전기 자동차의 전면유리 성애 제거 성능을 향상시키기 위해서는 전면유리로 토출되는 온기의 속도가 일정 수준 이상을 만족하여야 하며, 전면유리 전체적으로 유동이 고르게 퍼져야 한다. 제상 노즐에서 토출되는 온기의 속도를 일정하게 하고, 유동을 고르게 하기 위해서 제상 노즐 형상 등의 관련 설계요소들을 적절하게 설계하여야 한다. 이러한 제상시스템의 성능 향상을 위해서 최근에는 전산 유체해석(Computational Fluid Dynamics)과 같은 전산수치해석 방법을 활용한 연구개발이 활발히 진행되고 있다[2-3].

본 논문에서는 2인용 소형 전기자동차의 제상 성능 향상을 위하여 전산유체역학(CFD) 해석을 수행하여, 전면유리에 생성된 성애를 효과적으로 제거 할 수 있는 제상 노즐 및 가이드 베인의 설계 방안을 제안하였다.

2. 해석모델

전산유체역학 해석은 주로 설계 단계에서 열전달 및 유체 거동의 경향을 파악하기 위해 활용된다. 본 연구에서는 전면 유리에 생성되는 성애를 효율적으로 제거하기 위해 제상 노즐 각도와 가이드 베인의 설치 각도를 변경하여, 제상성능을 향상시키고자 하였다.

2.1 지배방정식

전기 차량 전면유리 제상 해석을 위한 전산수치해석에 사용된 형상모델은 3차원이며, 주로 차량 내부 및 전면유리 부분의 유동장과 온도장의 해석이 이루어짐으로 비압축성유체, 비정상 난류유동에 해당하여 다음과 같은 지배방정식이 적용될 수 있다.

- 연속 방정식

$$\frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0 \quad (1)$$

- 운동량 방정식

$$\frac{\partial(\rho u_i \mu_i)}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[-p \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad (2)$$

- 에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j \left(h + \frac{1}{2} u_i^2 \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = 0 \quad (3)$$

전산수치해석을 위하여 상용 소프트웨어인 ANSYS Fluent 6.3을 사용하였으며, 사용된 열 및 유동에 대한 지배방정식은 3차원 일반화 좌표에 대한 난류에 관한 운동에너지 및 에너지 방정식이 적용되었다. 난류영역의 해석을 위한 표준 $k-\varepsilon$ 모델을 사용하였다. k 는 난류 운동에너지, ε 은 난류운동에너지 소산률, G_k 는 평균속도 구배에 의한 난류 운동에너지 발생, G_b 는 부력에 의한 난류 운동에너지의 발생을 나타낸다. 또한, 전면유리로의 열전달을 고려하기 위해 에너지 방정식을 적용하였다.

- 난류에 관한 운동에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

- 난류 운동에너지의 발생을 표현한 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (5)$$

여기서,

$$\mu = \mu_l + \mu_t$$

$$\mu_l = \text{상수} \quad : \text{층류점성계수}$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad : \text{난류점성계수}$$

제상노즐의 설치각도 및 가이드 베인의 설계안을 도출하여, 유리 외부에 0.5mm 두께의 성애를 생성시키고,

녹아가는 과정을 Enthalpy-porosity technique을 사용하여 Liquid fraction 기법으로 과도상태의 비정상해석을 수행하였다. Liquid fraction은 각 체적에 대한 액분율을 나타내며, 수치계산이 반복될 때마다 에너지평형에 의해 계산된다.

$$\begin{aligned} & \bullet \text{ Liquid fraction, } \beta \\ & \beta = 0 \quad \text{if } T < T_s \end{aligned} \quad (6)$$

$$\beta = 1 \quad \text{if } T < T_l \quad (7)$$

$$\beta = \left(\frac{T - T_s}{T_l - T_s} \right) \quad \text{if } T_s < T < T_l \quad (8)$$

위의 식을 이용하면 엔탈피는 다음과 같다.

$$H = h + \Delta H \quad (9)$$

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (10)$$

$$\Delta H = \beta L \quad (11)$$

따라서, 에너지 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있으며, 유동 및 온도장에 대해 비정상해석을 수행하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (\rho k \nabla T) + S \quad (12)$$

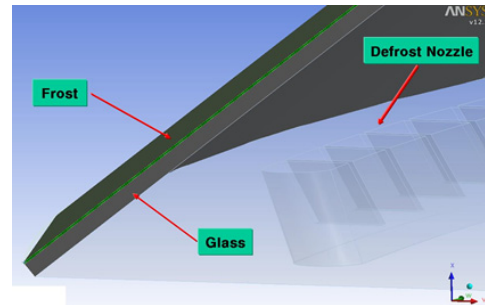
2.2 수치해석 모델

본 논문에서 대상으로 하는 차량은 (주)씨티엔티의 소형 근거리용 전기자동차인 e-Zone 모델(Fig.1)이며, 차량의 설계도면에 따라 전면유리와 차량 내부의 3차원 모델과 격자를 생성하였다.

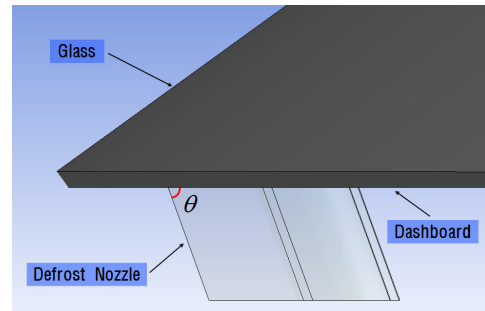


Fig. 1. The electric vehicle used in numerical analysis and experiment

제상시스템의 성능해석을 위하여 먼저 e-Zone 차량에 설치된 기존 제상 노즐의 각도를 70° ~ 120°까지 10°간격으로 변경하면서 성에를 효율적으로 제거할 수 있는 노즐 각도를 선정하고자 하였다. 이후 선정된 노즐 각도에 대해 가이드 베인을 데쉬보드 상부에 추가로 설치하였고, 가이드 베인 각도를 50° ~ 70°까지 10° 간격으로 변경하면서 성에 제거 성능이 가장 뛰어난 최종 설계(안)를 마련하고자 하였다.



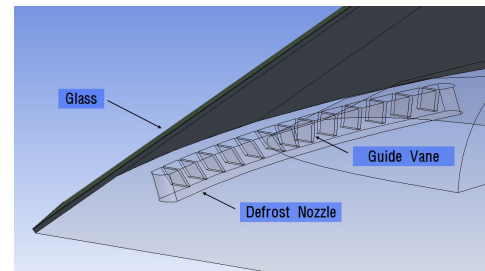
(a)



(b)

Fig. 2. Defrost nozzle analysis model

(a) Frost, glass and defrost nozzle (b) Defrost nozzle angle



(a)

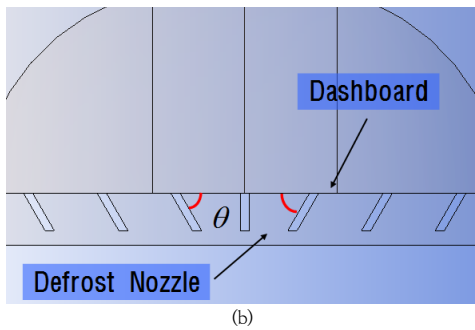


Fig. 3. Analysis model for Defrost nozzle with guide vane
(a) Guide vane (b) Guide vane angle

2.3 초기 및 경계조건

전면유리 위의 성에는 0.5 mm로 균일한 두께로 분포한다고 가정하였으며, 차량 내부와 외부의 온도는 -20°C 로 설정하여, 혹한기의 좋지 않은 환경을 고려하였다. 또한, 실제 현상에서 차량 내부의 온도는 저온에서부터 서서히 상승하게 되는데, 이와 같은 대류 현상을 고려하기 위해 온도에 따른 공기의 밀도 변화를 주었으며, 제상 노즐에서 토출되는 속도 및 온도는 일반 승용차량의 제상해석[4-7]과 동일하게 5m/s와 30°C 로 설정하여 해석을 진행하였다.

Table 1. Initial and boundary condition

Inlet Area (m ²)	Inlet cond.		Outlet cond.	Initial cond. (°C)
	Velocity (m/s)	Temp. (°C)		
0.01188	5	30	static pressure	-20

Table 2. Air density according to temperature

Temperature (K)	Air density (kg/m ³)
253	1.395
273	1.292
278	1.269
283	1.247
288	1.225
293	1.204
303	1.165

Table 3. Material property of windshield

Property	Glass
Density (kg/m ³)	2500
Specific heat (J/kg·K)	800
Thermal conductivity (W/m·K)	0.785

Table 4. Material property of frost

Property	Glass	Frost
Density(kg/m ³)	2500	920
Specific heat(J/kg·K)	800	2040
Thermal conductivity(W/m·K)	0.785	1088
Dynamic viscosity(kg/m·s)	-	0.00553
Melting latent heat(kJ/kg)	-	334.96
Solidus temp.(K)	-	271.15
Liquidus temp.(K)	-	273.15

3. 해석결과 및 고찰

3.1 노즐 각도 변경 해석 결과

Table 5는 노즐 각도 변경에 따른 해석결과와의 평균 속도 및 전면유리에서의 온도분포를 종합하여 나타내고 있다.

Table 5. Summary of average temperature and velocity according to the nozzle angle

Nozzle angle	70°	80°	90°	100°	110°	120°
Average Temp. (K)	279.84	280.03	280.14	279.74	277.06	273.69
Average velocity (m/s)	2.14	2.00	1.88	1.74	1.55	1.34

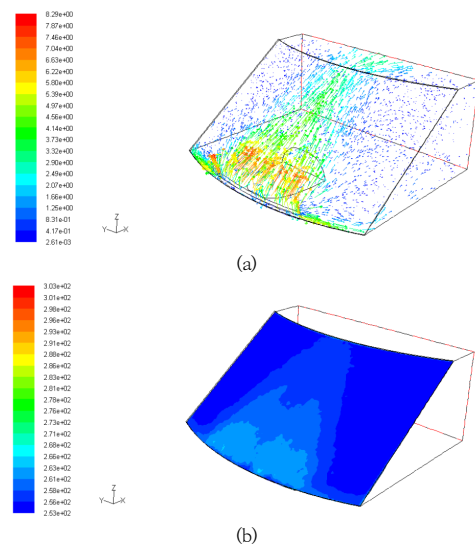


Fig. 4. Analysis result of the defrost nozzle angle (70°)
(a) Velocity vector (b) Temperature distribution

제상해석에서는 전면유리 표면에서의 유속이 2 m/s 이상일 때 제상성능이 양호한 것으로 분석되고 있다[5]. Table 5의 해석 결과에서 확인 가능하듯이 노즐 각도 70°와 80°에서 전면유리 표면에서 속도분포가 2m/s를 넘는 결과를 보이고 있다. Fig.4는 노즐각도가 70°일 때 속도벡터와 온도분포에 대한 해석결과를 나타내고 있다. 전면유리에서 평균온도의 경우 110°와 120°의 결과에서는 평균온도가 각각 277K 및 273K으로 낮게 나타났다. 이는 제상 성능을 약화시킬 것으로 판단된다. 따라서, 노즐의 설치 각도는 70°와 80°일 때 우수한 제상성능을 보일 것으로 예측된다.

그러나, 해석결과 중 속도벡터를 살펴보면 모든 노즐 각도에서 전면유리 중앙으로의 유동이 집중되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 전면유리 좌우측면의 유동이 부족하여 제상 성능을 약화시키는 주요 원인이 될 것으로 파악되었다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 제상 노즐과 함께 가이드 베인을 추가로 설치함으로써 노즐에서 분사되는 공기의 유동을 좌우 측면으로 유도 토출 될 수 있도록 하였다.

3.2 가이드 베인 설치 해석 결과

노즐 각도 변경에서 가장 좋은 결과로 나타난 70°와 80°의 모델에 가이드 베인을 설치하여 제상 성능 향상을 위한 추가적인 설계안을 마련하였다. 가이드 베인 설치각도를 50°, 60°, 70°로 변경하여 해석을 진행하였다.

Table 6은 해석결과를 통해 얻어진 전면유리 표면의 평균 온도 및 속도를 종합해서 나타내고 있다.

해석 결과에서 확인 가능하듯이 노즐에서 분사된 공기는 가이드 베인에 의해 전면유리 좌우 측면으로 토출되는 것을 확인할 수 있었다. Fig.5와 같이 가이드 베인 설치 각도가 50°인 경우에는 토출되는 공기가 좌우 측면으로 크게 분사되어 중앙 부분에 유동이 부족한 것으로 파악되었다.

Table 6. Summary of average temperature and velocity according to the nozzle and guide vane angle

Nozzle angle	70°			80°		
Vane angle	50°	60°	70°	50°	60°	70°
Average Temp. (K)	276.96	279.06	278.20	277.50	280.19	279.14
Average velocity (m/s)	2.15	2.33	2.15	2.11	2.29	2.14

Fig.6에서 보이듯이 제상 노즐 설치 각도 70°, 가이드 베인 설치 각도 60°일 때 토출되는 공기의 유동이 가장 좋게 나타났으며, 전면유리에서 평균 온도 및 표면에서의 평균 속도가 다른 설계안과 비교하여 좋게 나타났다.

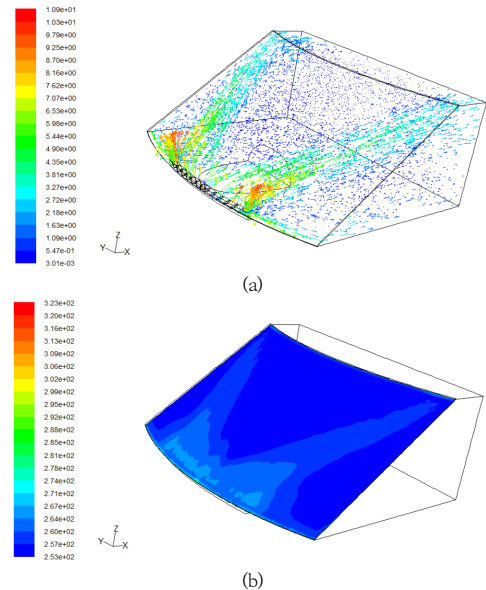


Fig. 5. Analysis result of defrost nozzle angle(70°) and guide vane angle(50°)
(a) Velocity vector (b) Temperature distribution

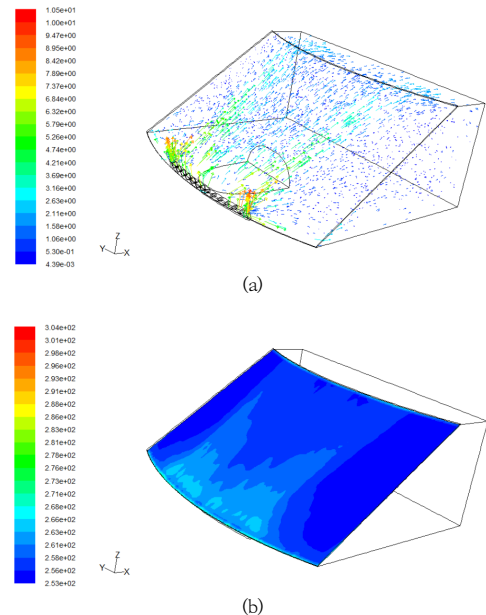


Fig. 6. Analysis result of defrost nozzle angle(70°) and guide vane angle(60°)
(a) Velocity vector (b) Temperature distribution

3.3 실험과 비교를 통한 해석결과 검증

해석에서 파악된 결과를 바탕으로 Fig.7과 같이 노출 각도 70° 및 가이드 베인 설치 각도 60° 를 적용한 제상 노즐을 제작하여 대상 전기 차량에 장착하여 제상성능 실험을 진행하였다.



Fig. 7. Experimental defrost nozzle

성애가 제거되는 이상유동(Two-phases flow) 및 상(phase) 변화에 관한 문제를 실제 현상과 유사하게 해석을 수행하기 위해 VOF(volume of fraction) 기법을 사용하여 제상노즐을 통한 내부 유동 및 전면유리로 열전달 되어 외부의 성애가 제거되는 현상을 함께 고려하여 해석을 수행하였다. Fig.8은 시간에 따른 제상 해석 결과와 실험 결과를 비교하여 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 시간에 따른 전면유리 제상 상황에 대한 해석결과와 실험결과가 매우 유사함을 확인할 수 있었다.

Time	Defrost analysis	Defrost Experiment
10 min		
20 min		
30 min		

Fig. 8. Comparison of defrost analysis and experiment

일반적으로 전기자동차를 포함하는 대부분의 차량은 미국 국가도로교통안전국의 FMVSS(Federal Motor

Vehicle Safety Standard) 103 실험 규정에 따르는 제상성능을 갖추도록 요구되고 있다. FMVSS 103에 따르면, 운전자가 운전할 수 있는 최소한의 시야확보를 위한 C 영역은 20분 이내에 80% 제상이 이루어지도록 규정하고 있다[2, 3, 5, 6]. Fig 9에서 알 수 있듯이, 본 논문에서 제시한 제상 노즐과 가이드 베인에 기반한 제상성능에 대한 실험결과, 20분 후 운전석 전면 유리의 성애가 80% 이상 제거되었음을 확인할 수 있었다.

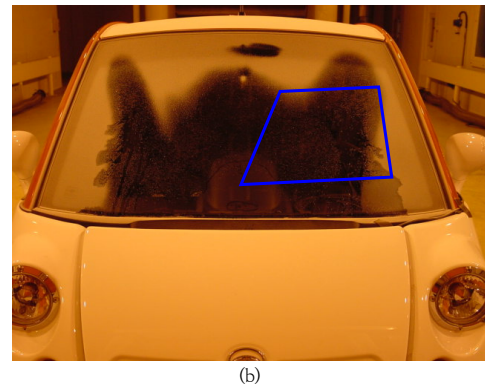
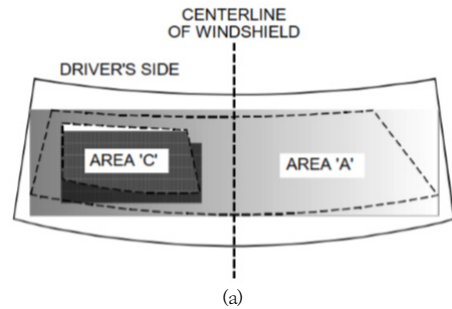


Fig. 9. FMVSS 103 specification and defrost experiment
(a) Typical location of vision area as viewed from interior of vehicle (b) Defrost experiment result of Area C

4. 결 론

본 논문에서는 소형 전기자동차의 제상성능 개선을 위하여 전산유체해석을 수행하였다. 자동차 전면유리에 고온의 공기를 분사하는 제상노즐의 각도를 선정할 후 가이드 베인을 추가로 설치하여 설치 각도 변경에 따른 해석을 수행함으로써 가장 우수한 성능을 보이는 제상설계 조건을 도출하고자 하였다. 제상노즐 각도는 $70^\circ \sim 120^\circ$ 범위에서, 가이드 베인의 각도는 $50^\circ \sim 70^\circ$ 의 범위에서

각각 10° 간격으로 변경하여 해석을 수행하였다. 전면유리에 0.5mm 두께의 서리가 고르게 분포하였다고 가정할 때, 전산수치해석 결과, 제상노즐 각도 70°와 가이드 베인 설치 각도 60°인 경우가 가장 우수한 제상성능을 보이는 것으로 분석되었다. 해석결과를 기준으로 제상 노즐과 가이드 베인을 제작하여 실제 차량을 대상으로 제상실험을 수행하였다. 전면유리에 대한 전산수치 해석결과와 실험결과가 매우 유사함을 확인할 수 있었다. 또한 실험결과, 자동차 전면유리의 성능이 20분 이내 80% 이상 제거됨을 확인 할 수 있어, FVMSS 103 규정을 만족하는 제상성능을 확보한 것으로 판단되었다.

References

- [1] H. H. Jeon, S. B. Ko and K. B. Lee, "A Numerical Study on Automobile Interior Environment" *Korean Journal of Air-conditioning and refrigeration engineering*, Vol.19, No.1, pp. 36-42, 2007.
- [2] S. J. Kang, Y. D. Jun and K. B. Lee, "A Numerical Study of a Vehicle Windshield Defrosting Mechanism", *Journal of Energy Engineering*, Vol. 19, No. 3, pp. 151-155, 2010.
- [3] S. N. Patil, P. D. Sonawane, "Survey on Recent trends in Computational & Experimental Technique to Evaluate Performance of Air Flow in Defrost/Demist System for Automobile" *Int. J. of Engineering and Computer Science*, Vol.3, No.7, pp. 6859-6862, 2014
- [3] S. H. Kang, J.H. Lee and J.S. Byun, "3D Unsteady Numerical Analysis to Design Defrosting System of Automotive Windshield Glass", *Transactions of KSAE*, Vol. 15, No. 5, pp.1-8, 2007.
- [4] Y. M. Youn, F. Kader, Kum-Bae Lee and Yong-Du Jun, "Numerical Study on Control Factors of Defrosting Performance for Automobile Windshield Glass in Winter", *Kor. J. Air-Cond. Refrig. Eng.*, Vol. 20, No.12, pp. 789-794, 2008.
- [5] D. J. Kim and J. K. Lee, "Effects of an Inlet Guide Vane on the Flowrate Distribution Characteristics of the Nozzle Exit in a Defrost Duct System", *Transactions of KSAE*, Vol. 16, No. 4, pp.88-96, 2008.
- [6] D. J. Kim, H. J. Kim, J. K. Lee and B. J. Rho, "An Experimental Study on the Flow Characteristics with the Impinging Angles of Defrost Nozzle Jet Inside a Vehicle Passenger Compartment", *The Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 31(12), pp.1024-1032, 2007.

김 현 일(Hyun-II Kim)

[정회원]



- 2009년 8월 : 국민대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2009년 7월 ~ 2012년 7월 : 한국과학기술정보연구원 연구원
- 2012년 7월 ~ 현재 : 포항금속소재산업진흥원 실용화연구실 실장

<관심분야>

지역중소기업지원, 열유체 실험 및 전산해석

김 재 성(Jae-Sung Kim)

[정회원]



- 1999년 2월 : 포항공과대학교 일반대학원 산업공학과 (공학석사)
- 2003년 2월 : 포항공과대학교 일반대학원 산업공학과 (공학박사)
- 2003년 3월 ~ 2018년 9월 : 한국과학기술정보연구원 책임연구원
- 2018년 10월 ~ 현재 : 한밭대학교 산학협력단 조교수

<관심분야>

Modeling & Simulation, 슈퍼컴퓨팅, 스마트팩토리, 디지털트윈

김 명 일(Myung-II Kim)

[정회원]



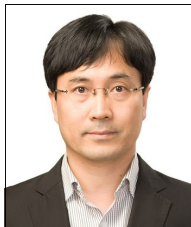
- 2000년 2월 : 중앙대학교 일반대학원 컴퓨터공학과 (공학석사)
- 2004년 2월 : 중앙대학교 일반대학원 컴퓨터공학과 (공학박사)
- 2004년 3월 ~ 현재 : 한국과학기술정보연구원 책임연구원

<관심분야>

Modeling & Simulation, 슈퍼컴퓨팅, 제조혁신, 디지털트윈

이 재 열(Jae Yeol Lee)

[정회원]



- 1994년 2월 : 포항공과대학교 일
반대학원 산업공학과 (공학석사)
- 1998년 2월 : 포항공과대학교 일
반대학원 산업공학과 (공학박사)
- 1998년 2월 ~ 2003년 2월 : 한국
전자통신연구원 선임연구원
- 2003년 2월 ~ 현재 : 전남대학교
산업공학과 조교수, 부교수, 정교수

〈관심분야〉

Modeling & Simulation, VR/AR, 디지털트윈, 산업 AI