

## 자동차 전면유리 제상 메커니즘의 수치해석 연구

강승재 · 전용두 · 이금배<sup>†</sup>

공주대학교 기계공학과

(2010년 3월 23일 접수, 2010년 8월 30일 수정, 2010년 9월 5일 채택)

### A Numerical Study of a Vehicle Windshield Defrosting Mechanism

Seung Jae Kang, Yong Du Jun and Kum Bae Lee<sup>†</sup>

Department of Mechanical Engineering, Kongju National University, Chungnam 330-717, Korea

(Received 23 March 2010, Revised 30 August 2010, Accepted 5 September 2010)

#### 요 약

자동차 전면유리를 통한 적당한 가시거리의 확보와 제상 시간은 주요 설계 요소들이다. 이런 요소들의 성능을 향상시키기 위해, HVAC 시스템에서 생성되는 유체의 흐름과 열전달 특성을 이해하는 것이 필요하다. 제상 노즐의 성능을 조사하기 위해 수치해석을 수행하였다. 본 연구에서는 현재 디자인의 모순과 제상 메커니즘의 개선방법을 보여주고 있다. 수치해석 결과 현재 부착된 제상 노즐로는 최대 공기흐름이 전면유리 하단부에서 최대 공기흐름이 나타나고 있으며, 이는 만족스럽지 못한 가시거리를 확보하게 된다. 제상 노즐의 분사 각도가 45도일때 탁월한 제상성능을 보여주고 있다. 수치해석 결과들은 NHTSA에서 정한 규정들을 만족시킨다.

**주요어** : 자동차 전면유리, 서리, 제상 노즐, 분사각도

**Abstract** — Adequate visibility through a vehicle windshield and frost melting period are critical aspects of major design parameters. To make progress in this area, a good understanding of the flow behavior and heat transfer characteristics produced by the HVAC module is required. The computational study was used to perform the parametric investigation into the defroster nozzle's performance with a full-scale model. The study highlights the drawbacks of current designs and points the way to improve passive defrosting mechanism. The results show that the current design of the defroster nozzles deliver the maximum airflow in the vicinity of the lower part of the windshield, which yields unsatisfactory visibility. Defrosting performance was excellent when the injection angle of the defrost nozzle was 45 degree. The numerical analysis satisfies the criteria provided by NHTSA.

**Key words** : Vehicle windshield, Frost, Defroster nozzle, Injection angle

#### 1. 서 론

자동차 산업의 발전이 거듭될수록 주행성능 보다는 운전자의 편의 및 안전관련 장치에 초점이 더 맞추어지고 있다. 현대인들은 여과시간이 길어짐에 따라 자동차 탑승 시간 또한 늘어나고 있는 추세이며,

그로 인해 사고도 빈번히 발생하고 있다. 이러한 이유로 인해 운전자와 승객들의 안정감, 쾌적함 및 편리성 등을 고려한 설계가 이루어지고 있다. 그 중 자동차 실내의 환경을 조절하는 공기조화(HVAC) 시스템의 역할이 중요시 되고 있다. 특히 겨울철 자동차 전면유리에 발생하는 서리(frost) 및 성에는 운전 중에 운전자의 시야를 방해하고, 집중력을 분산시켜 안전운행을 방해하는 요소이다 [1-3]. 따라서 단시간에 운전이 방해가 되지 않는 시야를 확보 할 수 있는 제

<sup>†</sup>To whom corresponding should be addressed.  
Department of Mechanical Engineering, Kongju National University, Chungnam 330-717, Korea  
Tel : 041-521-9246; E-mail : kumbae@kongju.ac.kr

상(defrosting) 시스템이 필요하다. 이러한 제상 시스템의 성능을 향상시키기 위해서 최근에는 CFD를 이용한 연구 개발이 활발히 진행되고 있다 [4-5]. Kader et al [6]. 은 차량 실내의 냉난방에 관한 열전달 해석을 하였다.

제상 성능 향상에 영향을 미치는 제어인자에는 제상노즐(defroster nozzle)의 분사각, 유동, 온도, 습도, 그릴 및 데쉬보드(dashboard)의 디자인 등이 있다. 본 연구에서는 제상노즐 분사각의 변화에 따른 전면유리의 제상 성능에 미치는 영향에 대해 수치해석을 이용하여 조사하였으며, 이러한 결과들은 제상노즐 설계 시 기초자료로 활용하고자 한다.

## 2. 수치해석

### 2-1. NHTSA 규정

미국 도로교통안전국(NHTSA: National Highway Traffic Safety Administration)의 FMVSS 103의 실험 규정을 보면, 전면유리의 가시영역을 크게 A, C 영역으로 나뉘짐을 Fig. 1에서 볼 수 있다. C 영역은 운전자가 운전할 수 있는 최소한의 시야확보 구역이고, A 영역은 최대한의 시야 확보 구역이다 [7].

NHTSA 규정은 실험을 시작하기 최소 10시간 전에 엔진활동을 멈춰야 하며, 30분간 전면유리에 약 0.5 mm 두께로 얼음이 생성될 수 있도록 물을 반복적으로 분사시켜준다. 모든 실험 준비가 완료되면 시동 후 5분 간격으로 A, C 영역에서 제상 상태를 백분율(%)로 기록한다. NHTSA의 규정에 따르면 각 영역기준 30분 이내에 C 영역은 100%, A 영역은 80%이상 제상이 되도록 규정하고 있다.

### 2-2. 수치해석 모델

본 수치해석에 사용된 차량은 르노삼성 자동차 SM3 (2006년형 1500cc 디젤 승용차)이며, Fig. 2에서 그 모델을 보여주고 있다.

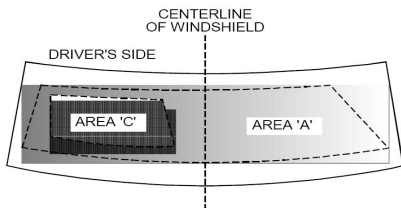


Fig. 1. Vision area through the windshield.

설계 전용 소프트웨어인 CATIA(Computer Aided Three-dimensional Interactive Application)를 이용하여 Fig. 3(a)와 같이 3차원 모델링을 하였으며, 자동차의 실내, 전면유리, 서리(얼음) 영역, 외부영역으로 각각 나누어 모델링 하였다. 격자(mesh)는 비정열 격자인 테트라 격자(tetrahedral)와 프리즘 레이어(prism layer)로 구성하여 총 격자수는 약 244만 개로 하였으며, 해석의 정밀도를 높이기 위해 전면유리와 서리 영역에서의 격자를 조밀하게 구성하였다. Fig. 3(b)에서 전체적인 격자의 단면을 보여주고 있다. 본 연구에서는 상용 소프트웨어인 SC/Tetra V.7을 사용하였다.

### 2-3. 지배방정식

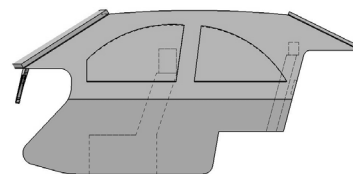
수치해석을 위해 3차원 비압축성 난류 유동, 유체의 물성치는 일정하다고 가정하였을 때, 연속 방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

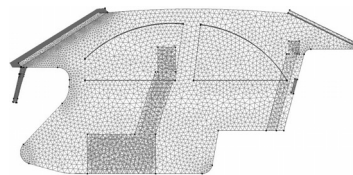
$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho g_i \beta (T - T_0) \tag{2}$$



Fig. 2. The automobile used in numerical analysis and experiment.



(a) The numerical model



(b) Unstructured mesh(2.4 million)

Fig. 3. Overall computational model.

where,  $\mu = \mu_1 + \mu_t$ ,  $\mu_t = C_t \rho \frac{k^2}{\epsilon}$

$$\frac{\partial \rho c_p T}{\partial t} + \frac{\partial u_i \rho c_p T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} K \frac{\partial T}{\partial x_i} + q \quad (3)$$

난류유동을 해석하기 위해서 본 연구에서는 표준 k-ε 난류모델을 사용하였다.

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial u_i \rho k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_s + G_T - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_i \rho \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

$$+ C_1 \frac{\epsilon}{k} (G_s + G_T) (1 + C_3 R_f) - C_2 \frac{\rho \epsilon^2}{k}$$

where,  $G_s = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$

$$G_T = g_i \beta \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad R_f = \frac{G_T}{G_s + G_T}$$

$$\sigma_k = 1 \quad \sigma_\epsilon = 1.3 \quad C_t = 0.09$$

$$C_1 = 0.9 \quad C_2 = 1.92 \quad C_3 = 0.0$$

### 2-4. 경계조건 및 초기조건

제상노즐의 입구 속도는 14 m/s, 출구에서의 압력은 대기압으로 가정하였다. 차량 외부의 대기속도는 0.02 m/s, 온도는 -6.9°C로 일정하다고 하였다. 차량의 유리창이 없는 부분은 모두 단열로 가정하였으며, 전면유리와 서리사이의 경계조건은 열저항이 없다고 가정하였다. 제상노즐의 입구 온도는 -4.2°C~40.7°C로 시간에 따라 변하며, 이들 값들은 실험값을 이용하였다. 전면유리 위에 서리는 0.5 mm로 균일한 두께로 분포한다고 가정하였으며, 초기온도는 -6.9°C로 하였다.

### 2-5. 제어인자 및 물성치

본 연구에서는 제상 시스템 성능에 영향을 미치는 제어인자중 전면유리에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위해 Fig. 4에서 처럼 전면유리에 공기가 부딪치는 각도를 제어인자로 하였다. 분사각의 범위를 10°~50°로 하였으며, 5° 간격으로 결과들을 구하였다. 여기서 “θ”는 노즐로부터 분사된 공기의 분사각을 나타낸다.

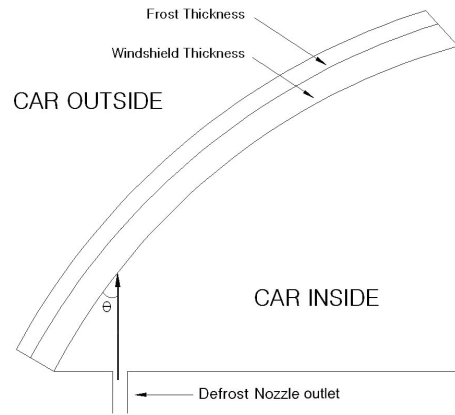


Fig. 4. Schematics of a windshield vicinity including the injection angle.

Table 1. Material properties.

Material		Air	Car Glass	Frost
ρ	(kg/m <sup>3</sup> )	1.317	2190	917
μ	(Pa · s)	1.83	.	0.00553
c <sub>p</sub>	(J/kg · K)	1007	740	2027
K	(W/m · K)	0.0256	1.38	2.25

Table. 1에서는 수치해석에 사용된 물성치 값들을 보여 주고 있다.

## 3. 결과 및 고찰

제상노즐의 분사각도가 전면유리 제상성능에 미치는 영향을 조사하기 위하여 수치해석을 수행하였으며, 분사각은 10°~50° 범위에서 5° 간격으로 하였다. 전면유리 위에 0.5 mm의 서리가 고루 분포되었다고 가정하였을 때, 30분간 어떤 각도에서 가장 좋은 제상성능을 나타내었는지를 Fig. 5에서 보여 주고 있다. 결과들로부터 45°에서 가장 좋은 제상성능을 보여주었으며, 10°에서 가장 낮은 제상성능을 보여주고 있다. 50°와 40°에서도 좋은 제상성능을 보여주고 있으나, 8분 후 부터 45°에 비해 제상이 떨어짐을 알 수 있다. 그 원인은 노즐에서 분사되는 공기가 전면유리 상단까지 원활하게 미치지 못하고 차량의 뒷좌석으로 넘어감에 따른 결과라고 생각된다. 이런 원인들을 뒷받침 해주는 그림이 Fig. 6에서 보여 주고 있다.

Fig. 6은 전면유리의 평균온도를 1분 간격으로 30분간 보여주고 있다. 노즐에서 분사되는 공기가 고루 분포되는 45°에서 전면유리의 평균온도가 가장 높았으며, 다음으로 50°, 40° 순으로 높았다. 25°~10° 범

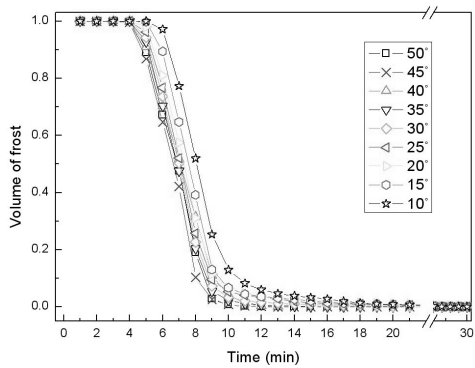


Fig. 5. Effect of injection angle on the volume of frost.

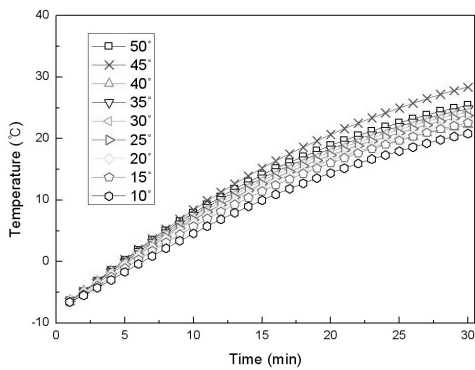


Fig. 6. Effect of injection angle on the average windshield temperature.

위에서는 다른 각도에 비해 평균온도가 많이 낮음을 알 수 있으며, 이런 결과들이 Fig. 5에 제상성능 결과에도 똑같이 나타나고 있다.

Fig. 7에서는 30분이 경과했을 때 전면유리 바깥면의 온도분포를 보여주고 있다. 제상노즐에서 분사되는 공기가 전면유리에 충돌한 지점이 온도가 가장 높으며, 공기가 퍼져 나감에 따라 온도가 점차적으로 낮게 분포함을 볼 수 있다. Fig. 7~Fig. 9에서 제상노즐 각도는 45°이다.

Fig. 8은 시간이 흐름에 따른 제상성능을 보여주고 있다. 전면유리에서 제상이 시작되기 전의 서리량을 “1”, 서리가 모두 제거되었을 때를 “0”으로 하였다. 시간이 흐름에 따라 노즐에서 분사되는 공기의 영향을 많이 받는 영역을 중심으로 제상이 시작되어, 10분 후에는 전 영역에서 제상이 이루어짐을 볼 수 있다. 이들 결과들로부터 미국 도로교통 안전국의 실험 규정을 충분히 만족시켜 주고 있다고 볼 수 있다.

Fig. 9에서는 운전석 위치에서의 속도 벡터 및 스트림 라인을 보여주고 있다. 노즐에서 분사되는 공기

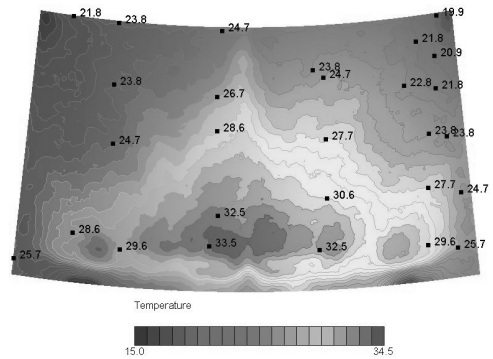


Fig. 7. Temperature distribution on the windshield outside surface after 30 minute.

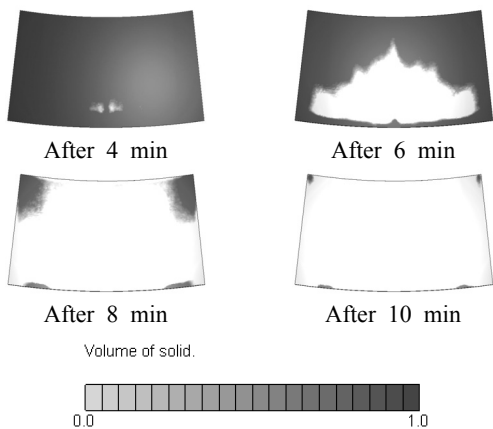


Fig. 8. Frost melting characteristic with respect to time.

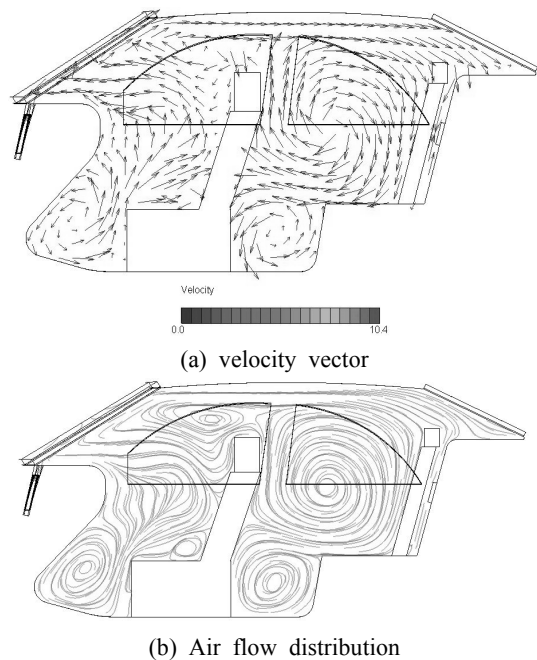


Fig. 9. Velocity distributions through the middle of driver seat.

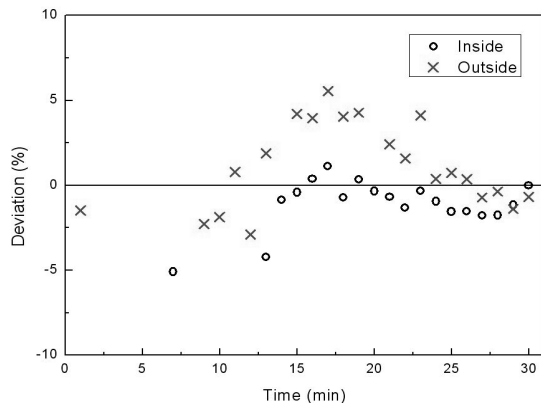


Fig. 10. Deviation analysis between the numerical and experimental temperature distributions.

가 전면유리를 따라 실내 천장으로 흐르면서 뒷좌석으로 이동한 뒤 다시 앞쪽으로 되돌아오면서 순환하고 있는 모습을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 10(b)에서 볼 수 있듯이 공기가 운전자 머리 주변에서 정체하고 있는 현상을 확인 할 수 있다. 이는 겨울철 전면유리의 제상뿐만 아니라 제습에도 사용되는 서리 제거 장치의 횡수가 많아짐에 따라 운전자에게 안구, 코 등에 건조증을 유발 할 수 있으며, 졸음을 유발함으로써 위험한 상황이 될 수도 있다.

Fig. 10에서는 수치해석 결과들의 신뢰도를 높이기 위해 실험결과와의 편차(deviation) 값들을 보여주고 있으며, 편차는  $[(T_{exp}-T_{num})/T_{exp}]$ 로 정의하였다. 온도 값들은 전면유리 내부 및 외부 표면의 온도이며, 편차는 0~5% 정도로 수치해석 결과들의 신뢰성이 매우 높다고 판단된다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 제상노즐의 분사각도가 겨울철 전면유리 제상성능에 미치는 영향에 대해 수치해석을 통하여 조사하였으며, 이들 결과들로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 전면유리의 서리가 약 10분 이내로 제상됨에 따라 미국 도로교통안전국(NHTSA)의 FMVSS 103 실험 규정을 충분히 만족하는 결과를 보였다.

- (2) 제상노즐의 분사각이 10°~35°일 때에는 전면유리에 공기가 원활하게 미치지 못하여 제상에 부적합하지만, 40°~50°의 분사각에서는 공기가 원활하게 분포함으로 제상에 적합하며, 그 중 45°에서 가장 좋은 결과를 얻었다.
- (3) 제상노즐에서 토출된 공기가 운전자의 얼굴부분에 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있으며, 차후 노즐 설계에 대한 지속적인 연구를 통해 이런 점들이 개선되어야 한다고 본다.
- (4) 수치해석의 신뢰도를 높이기 위해 실험결과와 비교해본 결과, 평균오차가 약 5% 이내로 수치해석 값의 신뢰도가 매우 높다고 사료된다.

### 사 사

본 논문은 “공주대학교 연구년 사업 및 BK 21 사업의 지원으로 연구되었으며”, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Park, C. H.: “The Developmental Trend of Automotive Air Conditioning System”, Magazine of the SAREK, Vol. 29, No. 10, pp. 14-19(2000).
2. Kim, H. G.: “The Comprehension of Automotive Air Conditioning System”, Magazine of the SAREK, Vol. 29, No. 10, pp. 20-27(2000).
3. Abdulnour, B. S.: “Hot-Wire Velocity Measurements of Defroster and Windshield Flow”, SAE Paper, No. 970109(1997).
4. Kim, J. H. Jang, B. M. Choi, J. J. Kang, S. H. and Lee, J. H.: “Numerical study on characteristics of defrosting performance for automotive windshield glass”, Proceedings of the SAREK 2003 Winter Annual Conference, pp. 125-130(2003).
5. Currel, J.: “Application of Computational Fluid Dynamics for The Optimization of Air Ducts”, 29th International Symposium of Automotive Technology and Automation (1996).
6. Kader, M. F. Youn, Y. M. Jun, Y. D. and Lee, K. B.: “Characterization of the HVAC Performance with Defroster Grilles and Instrument Panel Registers”, International J. of Automotive Technology, Vol. 10, No. 3, pp. 305-312(2009).
7. NHTSA.: “Laboratory Test Procedure for FMVSS 103 Windshield Defrosting and Defogging System”, U.S Department of Transportation National Highway Traffic Safety Administration(1996).