

자동차 전면유리의 제상시스템 설계를 위한 3차원 비정상 수치해석

강 신 형¹⁾ · 이 진 호²⁾ · 변 주 석³⁾

건양대학교 기계공학과¹⁾ · 연세대학교 기계공학과²⁾ · 기술보증기금 송파기술평가센터³⁾

3D Unsteady Numerical Analysis to Design Defrosting System of Automotive Windshield Glass

Shin-Hyung Kang¹⁾ · Jinho Lee²⁾ · Ju-Suk Byun³⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Konyang University, Chungnam 320-711, Korea

²⁾School of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

³⁾Songpa Technology Appraisal Center, Kibo Technology Fund, 78 Garak-dong, Songpa-gu, Seoul 138-803, Korea

(Received 24 August 2006 / Accepted 2 May 2007)

Abstract : The present research is based upon the numerical analysis of a car windshield in order to represent the optimum design guide to improve the overall defrosting performance of the system. First, the control factors that highly affect the defrosting performance of a car windshield are chosen and afterwards, the optimum variables of each control factor are extracted out to analyze its performance. The main control factors for this research are respectively, the air injection angle of a defroster nozzle, the height of a nozzle outlet, and the ratio of the width to the height of a nozzle outlet. For such case when the air inlet angle is relatively small, the flow near the vicinity of the inner face of a windshield tends to expand. As a consequence, the heat transfer rate through the windshield decreases. Also, the height of a nozzle outlet is recommended to maintain its size to minimum. However, when the ratio mentioned before is designed less than unity, the defrosting performance decreases.

Key words : Windshield glass(전면유리), Defroster nozzle(제상노즐), Injection angle(분사각), Vision area(가시영역), Frost(성애), CFD(전산유체역학)

Nomenclature

c_p : constant-pressure specific heat, J/kg · K	turbulent kinetic energy
E : energy, J	L : latent heat, J
F : body force, N	p : pressure, N/m ²
g : gravitational acceleration, m/s ²	T : temperature, K
H : height of defroster nozzle exit, mm	t : time, sec
enthalpy, J	u : velocity, m/s
h : enthalpy, J/kg	W : width of defroster nozzle exit, mm
k : thermal conductivity, W/m · K	β : liquid fraction
	$\delta_{i,j}$: Kronecker delta function
	ϵ : dissipation rate
	θ : angle of injection, degree

^{*}Corresponding author, E-mail: sn1972@yonsei.ac.kr

- ρ : density, kg/m^3
- μ : dynamic viscosity, $\text{kg/m} \cdot \text{s}$
- ν : kinematic viscosity, m^2/s
- $\sigma_k, \sigma_\epsilon$: turbulent Prandtl number
- τ_{ij} : stress, N/m^2

1. 서론

20세기를 거치면서 자동차의 기술은 비약적인 발전을 이루어 고성능화 시대를 맞이하게 되었다. 과거, 운전자들은 차량의 주행성능을 중요시 하였으나, 현재는 차량의 주행성능 뿐만 아니라 차량의 안전성, 쾌적성 및 편의성에 대한 관심이 높아져가고 있다. 이 중의 하나가 겨울철 차량 전면 유리의 제상 및 제습성능에 관한 것이다. 겨울철, 차량 전면 유리에 발생하는 서리(frost)나 이슬(mist)은 운전자의 시야를 가려 안전운전을 방해할 뿐만 아니라, 쾌적한 운전을 저해하는 요소이므로, 단시간에 최대한 넓은 면적의 시야를 확보할 수 있는 공조 시스템이 필요하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 자동차 제조 회사와 개발자들은 많은 실험적, 수치적인 연구를 진행하여 왔다.

Bashar S. AbdulNour^{1,2)}는 차량 내부의 유동장을 상용 수치해석 프로그램인 STAR-CD를 이용하여 해석하고, 차량 전면 유리 내부면 근처의 유동을 열선 유속계(hot-wire)를 이용한 실험으로 수치해석의 타당성을 입증하였다. Robert A. Brewster³⁾ 등은 차량 전면 유리의 제상 문제에 대해 상용 프로그램인 STAR-CD를 이용하여 과도 비정상 해석을 수행하였고, 이 결과가 실험 결과와 비교적 잘 일치함을 보였다. 그들은 수치해석을 두 단계로 진행하였다. 유동에 대한 정상상태 해석 후 온도장에 대한 과도비정상 문제를 해결하였다. Subrata Roy⁴⁾ 등은 가열 패드가 부착된 경사 평판에 차가운 공기를 분사할 때, 경사 평판의 열전달 특성에 관해 상용 프로그램인 FLUENT를 이용하여 수치해석한 후 실험결과와 비교하였다. 한편, Ikeda⁵⁾ 등은 수치해석을 통하여 제상 노즐로부터 분사된 공기의 유동 분포를 해석하였으며, 이를 실험에 의해 검증하였다. Sugano⁶⁾ 등은 전산유체역학적 기법을 사용하여 3차원 형상에 대한 유동 해석으로 공조 시스템의 성능을 예측하

였고, 또 이 예측이 실험결과와 잘 일치함을 보였다. Yuuji Satoh⁷⁾는 제상 노즐의 출구가 하나로 된 일체형 노즐과 출구가 두개인 분리형 노즐에 대한 차량 전면 유리의 제상 패턴을 3차원으로 수치해석 하였다. Alex Alexandrov⁸⁾ 등은 차량의 외부 조건과 내부 조건의 변화에 따른 공조시스템의 성능에 관하여 CFD-ACE+를 이용하여 해석하였다. 여기서 고려된 외부 파라미터는 차량의 속도와 외부 공기온도이며, 내부 파라미터는 차량 공조시스템에서 실내로 분사되는 공기의 속도, 온도 그리고 공기 분사노즐 입구와 출구의 위치이다. 한편, 허남건⁹⁾ 등은 차량 공조시스템이 난방, 냉방 및 제상모드일 경우의 차량 내부 유동장을 3차원으로 수치해석 하였다. 연동원¹⁰⁾ 등은 제상 노즐의 다양한 형상에 대하여 차량 전면 유리 내부면 유동장에 관하여 해석하였으며 박만성¹¹⁾ 등은 자동차 전면 유리의 제상현상을 모사하기 위한 전산 프로그램을 개발하였다.

본 연구는 상용 프로그램을 이용한 수치해석을 바탕으로 자동차 전면유리의 제상 및 제습 성능을 향상시킬 수 있는 공조 시스템의 최적 설계 가이드를 확립하고자 하였다. 우선, 본 연구는 기존의 실험 및 수치적 연구를 통하여 자동차 전면유리의 제상성능에 영향을 미치는 주요 제어인자들을 선정하고, 각 제어인자들의 최적 변수에 대한 성능 분석을 하였다. 수치해석에 사용된 상용 프로그램은 FLUENT이며 3차원 비정상 모델에 대하여 해석하였다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식

수치해석에서 유체의 유동은 기본 지배방정식인 질량 보존 방정식, 운동량 보존 방정식, 에너지 보존 방정식을 만족시킨다. 이 때의 유체 및 에너지의 이동 현상의 해석에 필요한 방정식은 질량, 운동량, 에너지 보존법칙을 유체 내의 미소 체적에 적용하여 얻어진 비선형 편미분 방정식이다. 차량 내의 기류를 비압축성 유체로 가정할 경우 질량 보존방정식인 연속방정식은 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

여기서 ρ 는 밀도, t 는 시간, u_i 는 속도성분을 각각 나타낸다.

운동량 보존 방정식은 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) \quad (2)$$

$$= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i$$

여기서,

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (3)$$

식 (2)에서 p 는 정압을, τ_{ij} 는 스트레스 텐서(stress tensor)를 각각 나타내며, ρg_i 와 F_i 는 각각 중력과 외 부힘에 의한 체적력을 각각 나타낸다. 식 (3)에서 μ 는 점성력을 나타내며 우측의 두번째 항은 체적의 팽창효과를 나타낸다.

그러나 제상 노즐로부터 분사되는 유동은 층류가 아닌 난류유동이다. 따라서 이러한 난류의 효과를 해석하기 위해서는 난류 현상 및 난류 모델에 대한 고려가 필요하다. 본 연구에서는 여러 난류 모델들 중에 표준 k- ϵ 난류 모델을 사용하였으며 이 모델에 관한 식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) \quad (4)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) \quad (5)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{m_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + (1 - C_{3\epsilon}) G_b)$$

$$- C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

여기서, $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$, $\alpha_k = 1.00$, $\sigma_\epsilon = 1.30$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (6)$$

$$G_b = -g_i \left(\frac{\mu_t}{\rho \sigma_h} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

위의 방정식에서 k 는 난류 운동에너지를 말하며, ϵ 은 난류운동에너지의 소산률(dissipation rate)을 나

타낸다. G_k 는 평균 속도 구배에 의한 난류 운동 에너지의 발생을 나타내며, G_b 는 부력에 의한 난류 운동 에너지의 발생을 나타낸다. 또한 $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, $C_{3\epsilon}$ 은 경험상수이며, α_k , σ_ϵ 은 난류 프란틀 수(turbulent Prandtl number)이다. 그리고 마지막으로 에너지 보존식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\rho E + p)) \quad (8)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j h'_j J_j + u_j(\tau_{ij,eff}) \right) + S_h$$

여기서,

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u_{i2}}{2} \quad (9)$$

자동차 전면 유리 제상 성능에 관한 3차원 비정상 해석은 우선, 제상노즐에 관한 유동장을 먼저 해석한 후 그 결과로 얻은 제상 노즐 출구의 유동장에 관한 데이터를 차량의 입구조건으로 사용하였다. 또한, 비정상해석은 유리 외부에 0.45mm 두께의 성에층(frost layer)을 올리고, 성에가 녹아가는 과정에 대한 과도 비정상해석을 enthalpy-porosity technique을 사용하여 수행하였다. Enthalpy-porosity technique은 liquid fraction을 사용하며, 이를 통해 과도상태의 성에층에 대한 엔탈피를 계산한다. Liquid fraction은 각 제어체적에 대한 액분율을 나타내는 것이다. Liquid fraction은 수치계산이 반복될 때마다 에너지 평형에 의해 계산된다. 여기서 Liquid fraction, f 는 다음과 같이 정의된다.

$$\beta = 0 \quad \text{if} \quad T < T_{solidus} \quad (10)$$

$$\beta = 1 \quad \text{if} \quad T < T_{liquidus} \quad (11)$$

$$\beta = \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} \quad \text{if} \quad T_{solidus} < T < T_{liquidus} \quad (12)$$

이것을 이용하면 엔탈피는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$H = h + \Delta H \quad (13)$$

여기서,

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (\text{sensible heat}) \quad (14)$$

$$\Delta H = \beta L \quad (\text{latent heat}) \quad (15)$$

따라서 에너지 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad (16)$$

에너지 방정식의 해를 구하기 위해 계산이 반복 될 때마다 위의 식들을 이용하여, 유동장 및 온도장 해석 그리고, 성에 제거과정에 대한 비정상해석을 수행하였다.

2.2 해석모델

2.2.1 가시영역 및 제어인자

Fig. 1은 자동차 전면 유리에 대한 가시영역 (Vision Area)을 보여준다. 가시영역은 운전자의 시계를 확보하여야 하는 영역을 나타내는 것으로 가시영역 C(Vision Area C)의 시계 확보는 안전 운전을 위해 가장 중요영역이며 이 영역의 성에 제거는 자동차 제상 성능의 기준이 된다. 미국 수출용 차량의 경우, 미국교통안전국(NHTSA)의 시험규정¹²⁾에 따라 시험했을 때 시험실시 30분 후 가시영역 A는 전체 면적의 80%가 제상 되어야 하고 가시영역 C는 100% 제상이 되어야 한다. 본 연구에서 사용된 제어인자들은 자동차 전면 유리의 공기의 유동현상에 영향을 주는 노즐로부터 분사되는 공기의 분사각

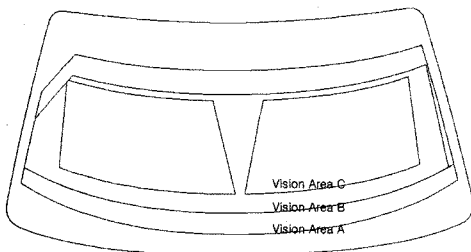


Fig. 1 Vision area of windshield glass

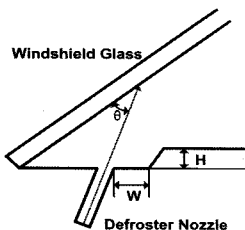


Fig. 2 Schematic of windshield glass and defroster nozzle

(Θ), 노즐 출구부의 높이(H) 그리고, 노즐 출구부의 폭과 높이의 비(W/H)이다. Fig. 2는 자동차 전면 유리에서 각 제어인자들에 대한 개략도이다.

2.2.2 격자구성

Fig. 3과 Fig. 4는 3차원 비정상해석에 사용된 제상 노즐과 차량부의 격자망이다. 제상 노즐은 약 24,000개, 차량 부분은 약 360,000개의 비정렬 삼각형 격자로 구성되었으며, 차량 전면 유리와 유리창의 성에는 각각 약 52,000개와 35,000개의 프리즘(prism) 격자를 사용하였다.

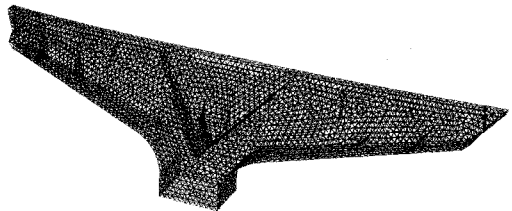


Fig. 3 Grid system of defroster nozzle

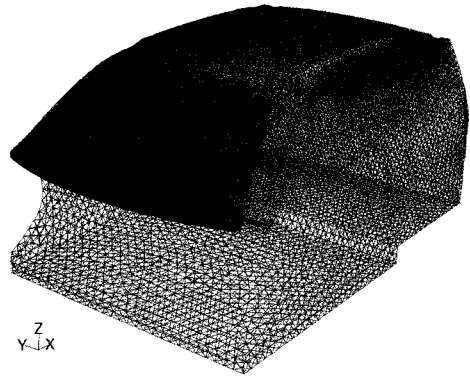


Fig. 4 Grid system of car body

2.2.3 경계조건

3차원 비정상해석에서 노즐 입구 공기 유속은 6m/s로 등속이지만 공기 온도는 시간에 따라 변화한다. 시간에 따라 변화하는 노즐 입구의 공기 온도는 실제 차량 실험을 통하여 얻은 데이터로써 Fig. 5에 나타나 있다. 실제 차량 실험조건은 외부공기 온도가 -30°C, 외기 풍속 50km/h이고, 엔진 회전속도가 2000rpm이다. 3차원 비정상해석에서 사용된 공기, 유리, 그리고 성에의 물성치는 Table 1에 나타나 있다.

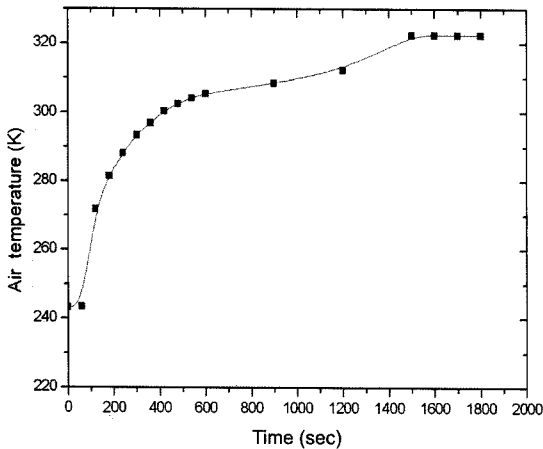


Fig. 5 Air temperature injecting from defroster nozzle

Table 1 Properties of frost, air, and glass

	Frost	Air	Glass
Density (kg/m ³)	920	1.4	2500
Specific heat (J/kg · K)	2040	1006	800
Thermal conductivity (W/m · K)	1.88	-	0.785
Dynamic viscosity (kg/m · s)	0.00553	0.0276	-
Melting latent heat (kJ/kg)	334.96		
Solidus temp. (K)	271		
Liquidus temp. (K)	273		

3. 결과 및 고찰

3.1 수치해석 결과 검증

Fig. 6은 자동차 전면 유리의 제상 성능에 대한 비정상 수치해석 결과이며, Fig. 7은 수치해석과 동일한 모델의 실제 차량에 대한 실험결과이다. 수치해석 및 실험의 제어인자 조건은 H=8mm, $\Theta=20^\circ$ 이다. 수치해석 결과와 실험결과를 비교해 보면, 제상 시스템 가동 15분까지 수치해석에서 나타난 결과가 비교적 실험결과와 잘 일치하지만 실험보다 수치해석에서 나타난 제상시간이 다소 느리게 나타난다. 이것은 실험에서 성에층이 녹으면 물이 생기게 되고 그것이 성에층의 액화를 촉진하기 때문이다.

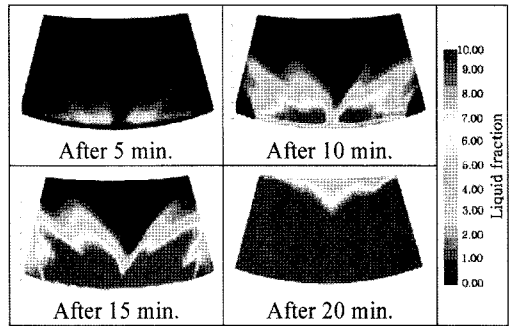


Fig. 6 Melting pattern of frost on windshield glass by numerical analysis

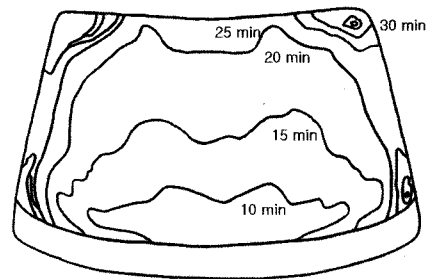


Fig. 7 Melting pattern of frost on windshield glass by experiment

3.2 3차원 비정상해석

3.2.1 노즐의 공기 분사각(Θ) 영향

Fig. 8은 H=12mm일 때 분사각 변화에 따른 수치해석 결과이다. 노즐의 공기 분사각이 18° 인 경우, 시간에 따른 완전 제상 영역이 같은 시간대의 다른 분사각에 비해 작게 나타나 제상성능이 떨어진다. 즉, 공조 시스템 가동 20분 후, $\Theta=18^\circ$ 가 가시영역 A, B에서 성에가 아직 완전히 녹지 않은 부분이 $\Theta=23^\circ, 28^\circ$ 보다 더 넓게 존재한다. 제상 그리고 분사각이 $23^\circ, 28^\circ$ 일 경우는 두 경우가 대체로 비슷한 성능을 보였으나 분사각이 23° 인 경우가 다소 우수하였다.

3.2.2 노즐 출구부의 높이(H) 영향

Fig. 9는 $\Theta=23^\circ$ 인 경우 노즐 출구부의 높이 변화에 따른 해석 결과이다. H=0mm와 8mm는 비슷한 제상 성능을 나타내었으며, H=16mm는 다른 두 경우와 비교했을 때 동일한 시간경과에 대하여 가시영역 A, B, C의 liquid fraction이 모두 뚜렷이 높았다. 따라서 노즐 출구부의 높이가 높을수록 제상 성능이 우수하였다.

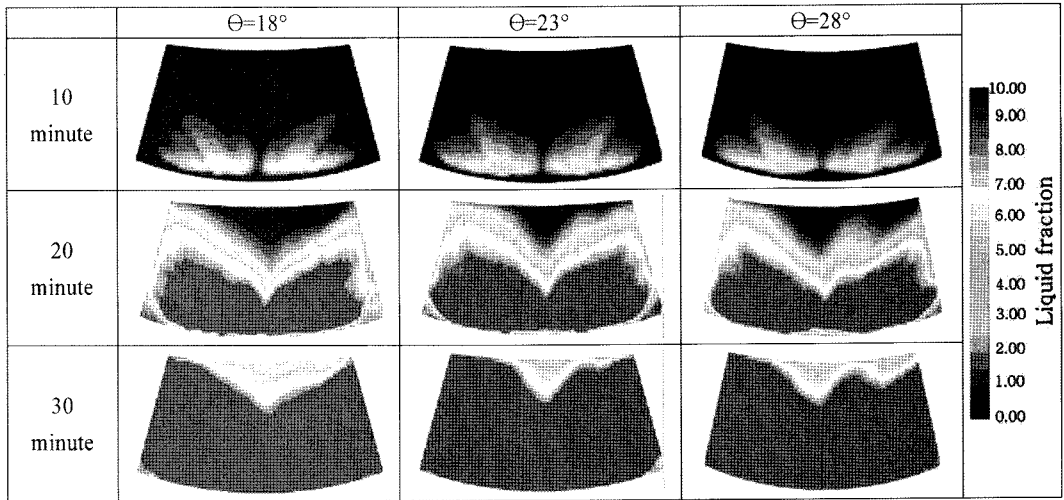


Fig. 8 Melting pattern of frost on windshield glass according to injection angle of nozzle

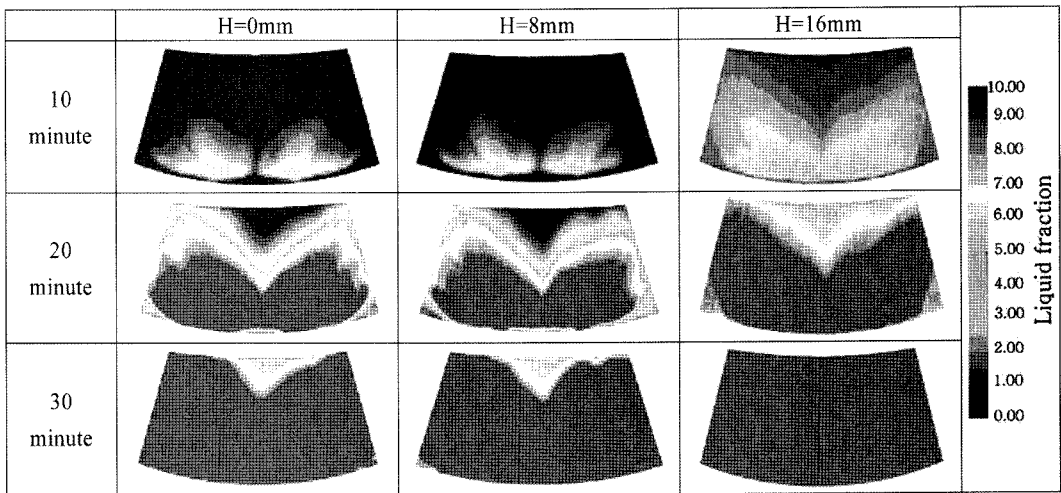


Fig. 9 Melting pattern of frost on windshield glass according to height of nozzle outlet

3.2.3 노즐 출구부의 폭과 높이의 비(W/H) 영향

Fig. 9는 H=16mm, $\Theta=23^\circ$ 일 경우에 폭(W)과 높이(H)의 비(W/H)의 변화에 따른 해석 결과이다. W/H=0.7이 W/H=0, 1.6보다 동일 시간대에서 가시영역 A, B, C의 liquid fraction이 낮았다. 또한, W/H=0인 경우(H=0)와 1.6인 경우를 비교하면, 공조 시스템 가동 후, 약 20분까지는 가시영역 C에서 W/H=1.6이 다소 좋은 성능을 보이지만 그 이후, 가시영역 A, C에서 제상성능은 W/H=0이 다소 우수하였다.

4. 결론

본 연구에서는 자동차 전면 유리에서 발생하는 제습 및 제상 성능향상을 위해 제상성능과 관련된 제어인자들을 선정한 후 상용 프로그램을 이용한 수치해석을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 제상노즐로부터 분사된 공기가 전면 유리에 부딪히는 각이 작을수록 유리 내부면 근처 유동이 실내 쪽으로 넓게 확산되어, 유리면으로의 열전달이 줄어들게 된다.

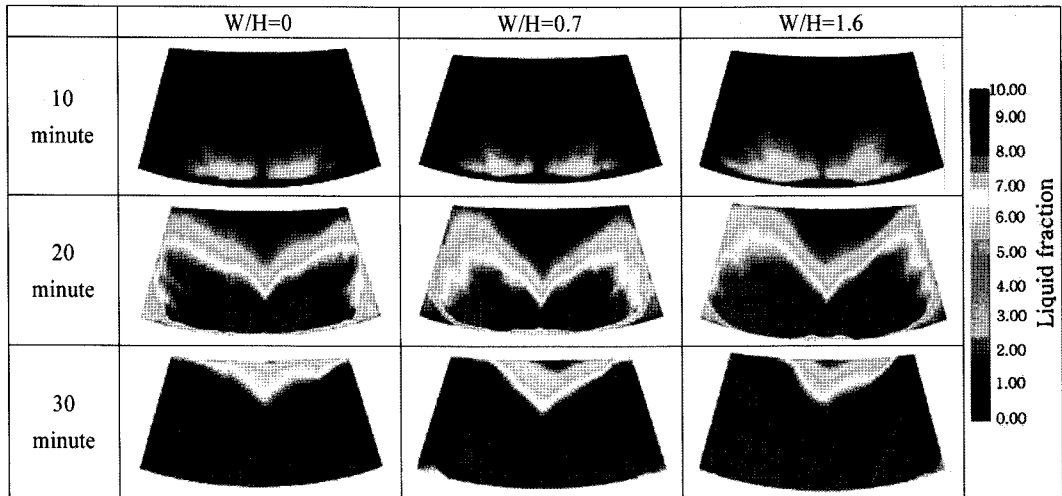


Fig. 10 Melting pattern of frost on windshield glass according to ratio of the width to the height of a nozzle outlet

- 2) 노즐 출구부 높이(H)는 분사각이 클수록 작게 하는 것이 좋다. 그 이유는 노즐출구부의 높이가 낮을 경우는 노즐로부터 분사된 공기가 노즐 출구부 끝단의 영향을 받아서 유동이 자동차 실내 쪽으로 확산된 속도분포를 보인다. 그러나 H가 증가할수록 유동이 실내 쪽으로 퍼져나가는 효과보다, 유동을 유리면으로 잘 도달할 수 있도록 해주는 효과가 커지게 되어, 유리면으로의 열전달을 증가시킨다.
- 3) 제상노즐 출구부의 높이(H)와 단의 폭(W)에 대한 비, W/H를 1보다 작게 설계하면, 제상성능이 떨어진다. 그 이유는 폭(W)에 대하여 높이(H)가 낮을 경우는 노즐 출구부단이 노즐로부터 분사되는 유동에 미치는 영향이 작지만, 높이(H)가 높을 경우는 노즐로부터 분사되는 공기가 노즐 출구부단의 영향을 받아 따뜻한 공기가 유리면으로부터 넓게 퍼져나가 공기가 전해줄 수 있는 에너지가 줄어들기 때문이다.

References

- 1) B. S. AbdulNour, "Numerical Simulation of Vehicle Defroster Flow Field," SAE 980285, 1998.
- 2) B. S. AbdulNour, "Hot-Wire Velocity Measurements of Defroster and Windshield Flow," SAE 970109, 1997.
- 3) R. A. Brewster, S. Frick and F. Werner, "Computational Analysis of Automotive Windshield De-icing with Comparison to Test Data," SAE 971833, 1997.
- 4) S. Roy, K. Nasr, P. Patel and B. AbdulNour, "An Experimental and Numerical Study of Heat Transfer Off an Inclined Surface Subject to an Impinging Airflow," International Journal of Heat Transfer, Vol.45, pp.1615-1629, 2002.
- 5) Y. Ikeda, N. Katoh, N. Ishii and T. Kuriyama, "Numerical Analysis of the Airflow on Windows from Defroster Nozzle (in Japanese with English summary)," Proceedings of JSAE, No. 924076, 1992.
- 6) M. Sugano, T. Yamada, Y. Takesue and T. Yasuki, "Numerical Analysis of Defroster Cleaning Pattern," JSAE 9432912, 1994.
- 7) Y. Satoh, "Numerical Analysis of Defroster Clear-up Pattern," JSAE Review 18, pp.57-82, 1997.
- 8) A. Alexandrov, V. Kudriavtsev and M. Reggio, "Analysis of Flow Patterns and Heat Transfer in Generic Passenger Car Mini-environment," Proceedings 9th Annual Conference of the CFD Society of Canada, Edition G. E. Schneider, Waterloo, ON, pp.167-173, 2001.
- 9) N. G. Hur and W. K. Cho, "3-D Numerical

- Simulation of Flows Inside a Passenger Compartment of a Model Vehicle for Heating, Air-Conditioning and Defrosting Modes,” Transactions of KSAE Vol.1, No.2, pp.60-68, 1993.
- 10) D. W. Yeon and H. T. Cho, “Prediction Windshield Defroster Nozzle Performance through CFD,” Proceedings of the SAREK Winter Annual Conference, pp.644-649, 2001.
 - 11) M. Park, J. Hwang, W. Park and K. Jang, “Numerical Study of Defrost Phenomenon of Automobile Windshield,” Transactions of KSAE, Vol.11, No.2, pp.157-163, 2003.
 - 12) Laboratory Test Procedure for FMVSS 103 Windshield Defrosting and Defogging Systems, U. S. Department of Transportation National Highway Traffic Safety Administration, 1996.