

자동차 전방 유리면 성에 전산 해빙해석

박 만 성¹⁾ · 황 지 은¹⁾ · 박 원 규^{*2)} · 장 기 룡³⁾

부산대학교 기계공학과¹⁾ · 부산대학교 기계기술연구소²⁾ · 현대자동차³⁾

Numerical Study of Defrost Phenomenon of Automobile Windshield

Mansung Park¹⁾ · Jieun Hwang¹⁾ · Wanguy Park^{*2)} · Kilyong Jang³⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Pusan University, Busan 609-735, Korea

^{*2)}Department of Mechanical Engineering, Pusan University, Busan 609-735, Korea

³⁾Functional System Test Team 1, Hyundai Motor Company, Ulsan 683-791, Korea

(Received 14 August 2002 / Accepted 6 January 2003)

Abstract : This work was undertaken for the numerical analysis of defrosting phenomena of automobile windshield. To analyze the defrost, the flow and temperature field of cabin interior, heat transfer through the windshield glass, and phase change of the frost should be analyzed simultaneously. The flow field was obtained by solving the 3-D unsteady Navier-Stokes equation and the temperature field was computed by energy equation. The phase-change process of Stefan problem was solved by enthalpy method. For code validation, the temperature field of the driven cavity was calculated. The result of calculation shows a good agreement with the other numerical results. Then, the present code was applied to the defrosting analysis of a real automobile and, also, a good agreement with experiment was obtained.

Key words : Navier-stokes equation(내비어-스톡스 방정식), Energy equation(에너지 방정식), Enthalpy method(엔탈피 방법), Defrost analysis(제상해석), Phase change(상변화)

Nomenclature

$\bar{E}, \bar{F}, \bar{G}$: convective term
 $\bar{E}_v, \bar{F}_v, \bar{G}_v$: diffusion term
H, h : enthalpy (J)
k : heat conductivity (W/m °C)
L : latent heat (J)
Pe : pecllet number ($V \cdot l / \alpha$)
T : temperature(°C)
T_m : melting temperature (°C)

1. 서론

겨울철 전방 유리면에 결빙되는 성에는 운전자의 시야를 방해하므로 안전성의 측면에서 문제가 된다. 따라서 운전자의 시야 확보를 위해 성에의 적절한 제거가 필수적이다. 예를 들어, 북미수출용 차량의 경우 차량 외기 온도가 -40°C에서 Fig. 1의 A영역이 30분 이내에 80%이상, B영역의 95%이상, C영역의 100%에 해당하는 성에가 녹아야 하는 차량 안전 규정을 요구하고 있다. 따라서 이러한 규정을 만족하는 성에 제거 시스템의 개발에 있어 기간 단축과 효율성 측면에서 최근에는 전산유체해석 기법을 이용하고 있으며, 본 연구에서도 전산유체해석 기법을 이용하여 defrost노즐을 통해 분출된 고온의 공기

*To whom correspondence should be addressed.
wgpark@pusan.ac.kr

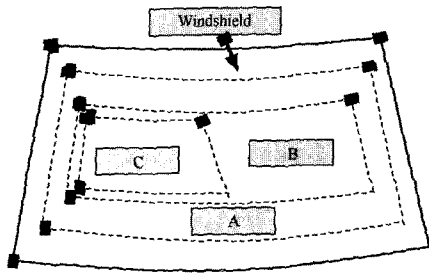


Fig. 1 Indication of the defrosting area on the windshield

에 의한 자동차 내부 유동 및 온도장 해석을 수행하여 성에의 해빙 현상을 해석해 보았다. 성에의 해빙 과정은 상변화를 동반하므로 상변화 문제(Stefan problem)를 수치적으로 해석하여야 하는데, 보통 엔탈피 방법을 이용하며 Bonacina¹⁾과 Voller²⁾의 연구결과는 엔탈피방법의 정확도가 상변화 위치에 크게 영향을 받고 있음을 밝혔고 Voller와 Cross³⁾는 이를 바탕으로 정확도를 개선하였다. 또한 음해법을 이용한 수치해석은 Mayer,⁴⁾ Shamsundar와 Sparrow,⁵⁾ Longworth,⁶⁾ Furzeland,⁷⁾ White,⁸⁾ 등에 의해 발전되어왔다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식과 이산화방법

본 연구는 승용차 전방 유리면에 생긴 성에가 defrost 노즐에서 나오는 더운 공기에 의해 녹아 제거되는 현상을 전산 시뮬레이션 하는 것으로 전방 유리면 근처의 유동장 및 온도장 해석과 유리면을 통한 열전달 해석, 그리고 성에의 해빙해석이 동시에 요구되어지는 매우 복잡한 전산해석 과정이 필요하다.

2.1.1 유동해석 방정식

전방 유리면 근처의 유동장 해석을 위해 3차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 풀었다.

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \xi} (\bar{E} - \bar{E}_v) + \frac{\partial}{\partial \eta} (\bar{F} - \bar{F}_v) + \frac{\partial}{\partial \zeta} (\bar{G} - \bar{G}_v) = 0 \quad (1)$$

여기서, \bar{q} 는 유동벡터, \bar{E} , \bar{F} , \bar{G} 는 대류 항이며, \bar{E}_v , \bar{F}_v , \bar{G}_v 는 점성 항을 의미한다. 식 (1)을 전산 방법으로 풀기 위하여 반복시간 행진법(Iterative

time marching method)^{9,10)}을 사용하였다.

2.1.2 에너지 방정식

차량 내부의 온도장을 풀기 위하여 다음의 비압축성 에너지 방정식을 풀게 되는데,

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho \vec{u} \cdot \nabla h - \nabla \cdot (k \nabla T) = 0 \quad (2)$$

여기서, h , ρ , k 는 각각 엔탈피, 밀도, 열전도도이며, \vec{u} 는 속도벡터를 의미하고 식 (1)의 유동방정식에서 구한 속도장을 대입하는데, 본 연구에서는 유동을 비압축성으로 가정하므로 유동 방정식과 에너지 방정식이 서로 decouple되어 있기 때문이다. 위 에너지 방정식은 온도에 대해 포물선형 편미분 방정식이므로 수치해석 방법으로 AF(Approximate Factorization)방법을 이용하여 풀게 되며 대류 항은 2차 정확도를 가지는 중앙차분을 이용하였다.

2.1.3 열용량법

성에의 상변화를 계산하기 위한 엔탈피(에너지) 방정식은 다음과 같다.

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (k \nabla T) + S = 0 \quad (3)$$

여기서, S 는 생성항을 의미한다. 이 방정식에서 상변화를 고려한 총 엔탈피 H 는 다음과 같이 정의된다.

$$H = h + \Delta H \quad (4)$$

여기서, ΔH 는 잠열을 의미하며 온도의 함수로 다음과 같다.

$$\Delta H = \begin{cases} L & T > T_m \text{ 일때} \\ 0 < \Delta H < L & T = T_m \text{ 일때} \\ 0 & T < T_m \text{ 일때} \end{cases} \quad (5)$$

여기서, L 은 용해잠열, T_m 은 용융온도이다. 잠열을 고려하기 위해 식 (3)을 총 엔탈피에 대한 식으로 나타내면

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\frac{k}{c} \nabla H \right) = 0 \quad (6)$$

여기서 c 는 비열을 의미한다. 식 (4)를 식 (6)에 대입하고 식 (3)과 비교하면 생성항 S 는 아래와 같아진다.

$$S = \frac{\partial}{\partial t} (\rho \Delta H) \quad (7)$$

식 (3)은 식 (7)과 같이 반복 계산이 필요한데 계산 순서는 먼저 에너지 방정식인 식 (2)를 풀어 온도를 구하고 이 온도를 통하여 식 (5)와 식 (7)의 잠열을 수정하며 식 (3)을 계산하고 다시 식 (2)의 온도변화에 따라서 같은 계산을 반복한다. 그런데 잠열 수정 과정에서 식 (5)를 바로 쓰면 수치적 진동현상이 발생하여 수렴된 해를 얻기가 어려우므로 다음과 같이 제안된 수정 방법을 사용한다.^{11,12)}

$$(\Delta H)_{i+1} = (\Delta H)_i + c\lambda(T_i - T_m) \quad (8)$$

여기서 i 는 반복 횟수, λ 는 보정 계수이다. 식 (8)을 통해서 잠열은 상변화 온도 차이에 의해 수정되므로 융해 시 잠열의 증가는 열원으로 작용하여 성에가 융해될 때 상변화 온도를 고정시켜 주며, 상변화가 끝나면 잠열의 변화는 없으므로 그 값을 다음과 같이 고정시킨다.

$$\begin{cases} \Delta H_{i+1} < 0 \text{ 일때} & \Delta H_{i+1} = 0 \\ \Delta H_{i+1} > 0 \text{ 일때} & \Delta H_{i+1} = L \end{cases} \quad (9)$$

2.2 경계조건 및 초기조건

본 연구는 Fig. 2와 같은 실제 차량의 전방 유리면의 외부에 발생하는 성에 제거에 대한 연구로서 전산해석 영역은 Fig. 3과 같이 실내, 전방유리, 성에 막(frost layer) 및 차량 외부 공기 영역으로 구성된다. Defrost 노즐을 통해 나오는 고온 공기의 토출 유량, 유속 및 토출 방향 등의 데이터는 배인호 등¹³⁾의 계산 결과를 이용하였으며, defrost 노즐을 통해 나온 공기의 실내 유동장 분포는 강규태 등¹⁴⁾의 계산 결과를 이용하였다. 이들 계산 데이터는 실험이나 타 연구자의 계산결과와 비교하여 충분히 검증이 이루어진 것들이며, 추가적인 정보와 자료는 참고문헌을 참조하기 바란다. 이들의 데이터를 이용하여 전면 유리창 근처에서 고온 공기의 속도 분포가 결정되면 식 (2)를 이용하여 전면 유리창 근처의 온도 분포를 계산하고 전면 유리창과 실외의 온도 차이에 의한 열전도 현상으로 유리창을 통하여 성에에 열이 공급되며, 성에가 상변화를 일으키게 된다. 이때, 성에의 해빙해석은 식 (3)을 이용한다. 여기에 수치계산을 위해 부과되어진 경계조건은 Table 1과 같다.

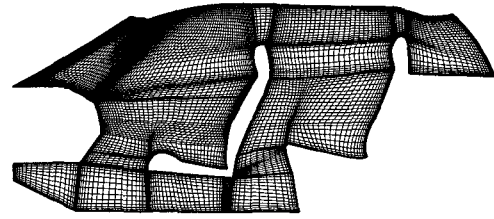


Fig. 2 Grid system within the cabin of automobile

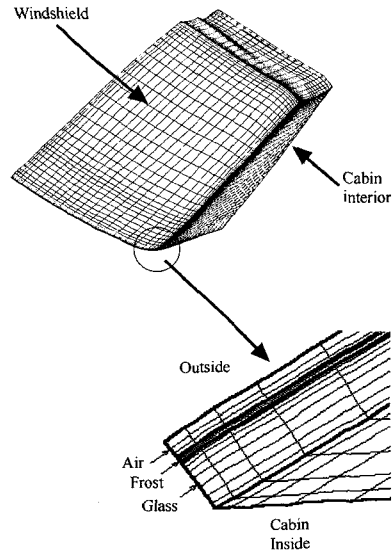


Fig. 3 Grid generation for defrost analysis

Table 1 Boundary condition

위 치	경계조건
노즐 출구	실험온도 값
전방유리	일정 열 유속 조건
실내면	단열조건
성에경계면	일정 열 유속 조건

3. 해석 프로그램 검증

3.1 온도장 해석 프로그램 검증

식 (2)의 에너지 방정식 코드를 검증하기 위해 driven cavity 유동을 계산하여 선행된 수치해석 결과와 비교하였다. 계산에 사용된 격자는 41×41 로서 Fig. 4는 cavity의 격자 형상이다. Peclet수가 50일 때와 1000일 때의 온도 분포를 계산하였으며, 이들 계산 결과를 Leonard¹⁵⁾의 계산 결과와 Fig. 5와 Fig. 6에서 각각 비교하였는데, 등온선이 비교적 서로 잘 일치함을 볼 수 있다.

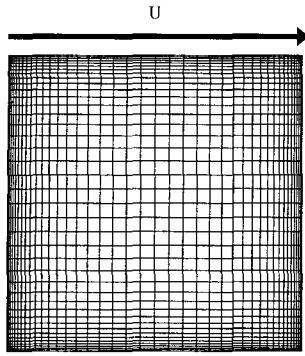


Fig. 4 Geometry of the driven cavity

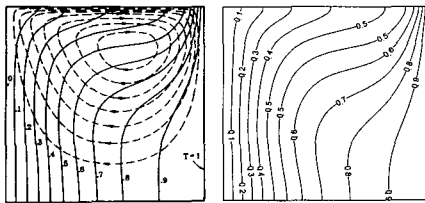


Fig. 5 Isotherms at Pe=50

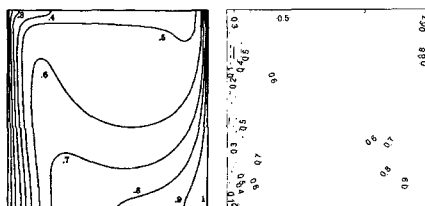


Fig. 6 Isotherms at Pe=1000

3.2 해빙해석 프로그램 검증

본 프로그램과 Voller^[12]의 알고리즘은 거의 동일하나 잠열이 발생하는 부분에 있어 ΔH 의 정의와 계산이 본 프로그램이 간편하고 계산 량이 적어서 효율적이다. 형상과 부과된 경계조건은 Fig. 7과 같으며 계산에 사용된 물성치는 Table 2와 같다. 초기 온도는 무차원 온도로 표현하여 $T^* = 0.5$ 로 주어졌다. 여기서 무차원 온도(T^*)와 무차원 시간(t^*)의 정의는 다음과 같다.

$$T^* = \frac{T - T_m}{T_B - T_m}, \quad t^* = \frac{t \cdot \alpha}{l^2}$$

여기서,

T : 실차원 온도, T_m : 용융온도, $T_B = T_R - T_L$, T_R : 오른쪽 경계의 온도, T_L : 왼쪽 경계의 온도, $\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c}$, l : 대표길이, t : 실차원 시간을 의미한다.

Fig. 8은 무차원 시간 $t^* = 500$ 일 때 온도분포를 그린 것으로 본 연구 결과와 Voller^[12]의 계산 결과가 매우 잘 일치함을 보여 주고 있고 해석적 결과와도 비교적 잘 일치하고 있다. 그러나 Fig. 7에서 $X=1.0$ 인 우측 경계면에서 Dirichlet 경계조건으로 주어져 있는 $T^* = 0.5$ 를 현재 계산결과와 Voller의 계산 결과는 정확히 만족하고 있는데 비해, 해석적 결과는 만족하고 있지 않음을 볼 수 있는데, 이것은 있을 수 없는 해석적 결과로서 해석적 해를 어떻게 구하였는지 전혀 밝혀져 있지 않아 원인을 정확히 설명할 수 없어 아쉽다. Fig. 8에 의하면 $X=0 \sim 0.3$ 까지 무차원

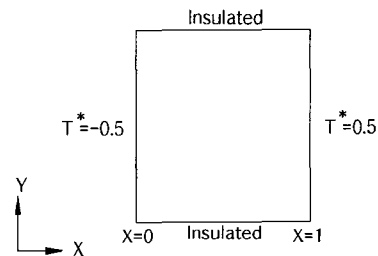


Fig. 7 Boundary conditions of melting

Table 2 Parameters used in calculation

k(열전도도, W/m · °C)	0.001
ρ (밀도, Kg/m ³)	1.
c(비열, J)	1.
L(잠열, J)	1.

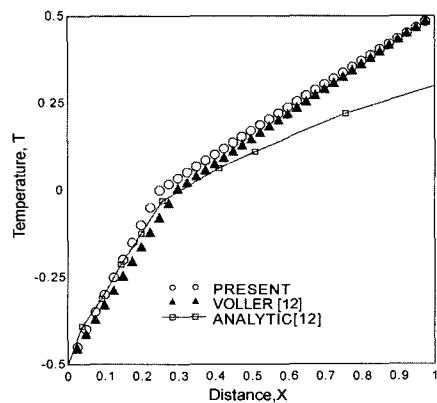


Fig. 8 Temperature profile at $t^* = 500$

온도가 0이하로서 이 영역에서는 결빙되어 있음을 알려주고 $X=0.3 \sim 1.0$ 에서는 무차원 온도가 0이상이므로 해빙되어 액체 상태가 되었음을 알 수 있다.

4. 결과 및 고찰

본 프로그램은 FORTRAN언어로 작성되었고, 계산은 PC로 수행되었으며 Pentium III(CPU 500MHZ)의 성능을 가졌다. 계산시간은 전면 유리창의 성에가 완전히 해빙될 때의 시간까지 대략 168시간이 소요되었다. 차량의 전방 유리면에 대한 성에 제거 실험은 차량의 실내의 온도가 -15°C 인 상태에서 전방 유리면에 0.5mm의 균일한 두께로 성에가 생성되었으며, 이 상태에서 자동차 엔진을 시동하면 defrost 노즐을 통해 공기가 Fig. 9와 같은 유동 양상을 가지고 토출되며¹⁶⁾ 공기 토출 온도는 엔진 시동부터 Fig. 10과 같이 시간이 경과함에 따라 -18°C 부터 점차적으로 온도가 상승하여 시동 후 약 20분이 경과하면 토출 온도가 약 50°C 까지 상승하게 된다. 이에 따라 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 자동차 실내의 유동장과 온도장을 구하면 Fig. 11과 Fig. 12의 해를 얻게 된다.¹⁴⁾ Fig. 11(a)는 자동차 실내의 대칭 단면에서 그려 본 속도장으로서 defrost 노즐을 통해 강하게 토출된 공기는 전면 유리창을 따라 실내 위 천장까지 흘러가며 이러한 강한 토출류의 영향으로 앞좌석에서는 동반류(entrainment)를 볼 수 있으며, 뒷좌석 공간에서는 와류를 볼 수 있다. Fig. 11(b)에서는 측면 defrost 노즐과 Fig. 9(a)의 강한 상 방향 대각선 방향의 유동에 의하여 실내 중간 높이 영역에서는 앞좌석의 장애물 역할에 의한 와류 유동을 확인할 수 있다. Fig. 12는 자동차 실내 온도 분포를 그린 것으로 그림 우측의 막대는 절대 온도(K)를 나타낸다. Fig. 12(a)의 실내 대칭단면에서 온도장을 보면 전방 유리면 근처에서 온도 구배가 매우 큰 것을 알 수 있고 이 전방 유리면 부근의 고온은 유리면으로 열전도가 잘 일어나게 하며 결국 성에를 제거하게 된다. Fig. 12(b)의 실내 중간 높이의 횡단면 온도장에서는, 측면 defrost 노즐에 의해 운전석 측면 앞쪽에 역시 고온 영역이 발생하고 있음을 볼 수 있다. Fig. 12(c)는 defrost노즐을 통해 더운 공기 토출 후 20분 경과후의 자동차 전면

의 온도 분포로서 Fig. 9(a)에서 보듯이 상 방향 대각선 방향으로 강한 유속이 흐름으로 인해서 온도 역시 대각선 방향으로 높은 온도가 분포하고 있음을 볼 수 있다. Fig. 13은 Fig. 12(c)와 같은 온도분포를 가지고 전면 유리창에 발생한 성에가 녹는 현상을 앞에서 기술한 열용량 법으로 해석한 것이다. 그림에서 백색영역이 성에가 녹은 영역을 의미하며 그림 우측의 막대는 섭씨온도($^{\circ}\text{C}$)를 의미한다. 그리고 Fig. 14의 실험¹⁶⁾을 통해 얻어진 해빙 형상과 서로 비교 하였는데 비교적 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 실험과 다소 차이가 나는 이유는 성에의 두께가 0.5mm로 균일하다고 가정 한 것에 비해 실제로는 균일하지 않으며 전면유리창 부근의 유속 분포와 온도 분포가 실험값이 존재하지 않아 비교가 불가능 하였으나 수치해석에 의한 Fig. 9와 Fig. 12의 계산 결과와 실제의 값들과 일치하지 않기 때문인 것으로 여겨진다. 그리고 Fig. 10의 토출 온도 역시 defrost 노즐 측면 방향으로 일정하지 않은 것도 이유가 된다.

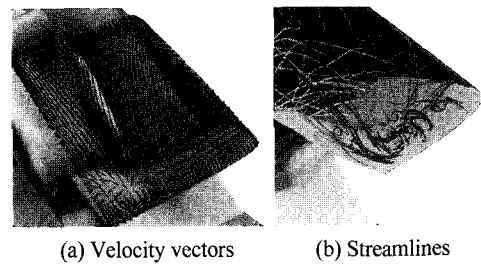


Fig. 9 Flow pattern on the glass of windshield

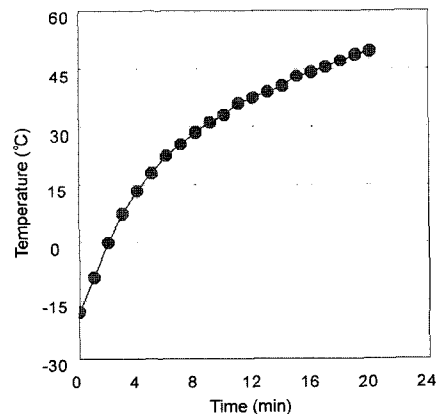


Fig. 10 Temperature of the discharged air

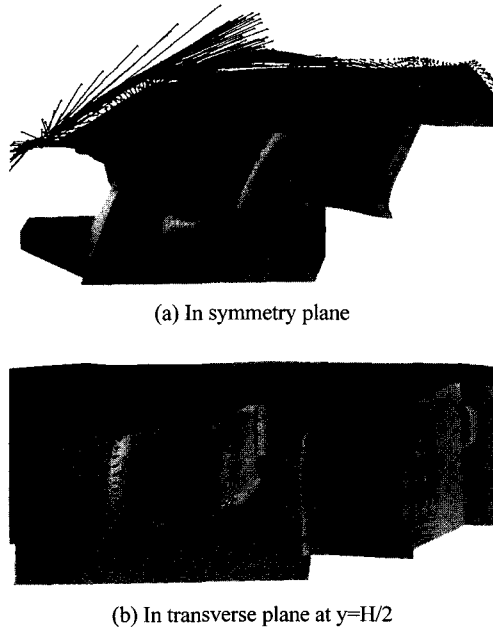


Fig. 11 Velocity vectors of the cabin interior

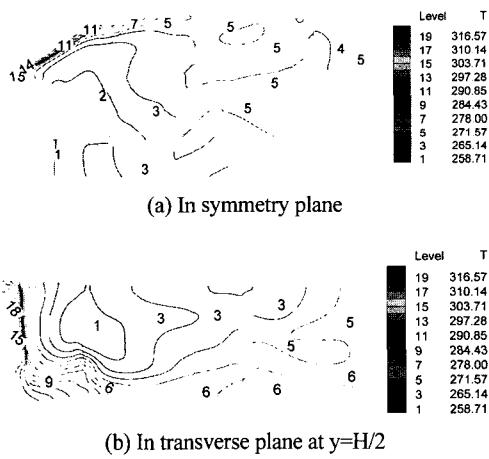
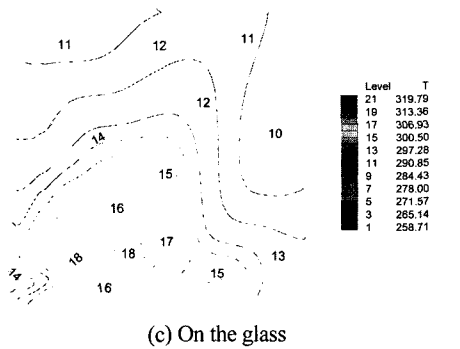


Fig. 12 Temperature field of the cabin interior



162 한국자동차공학회는문집 제11권 제2호, 2003

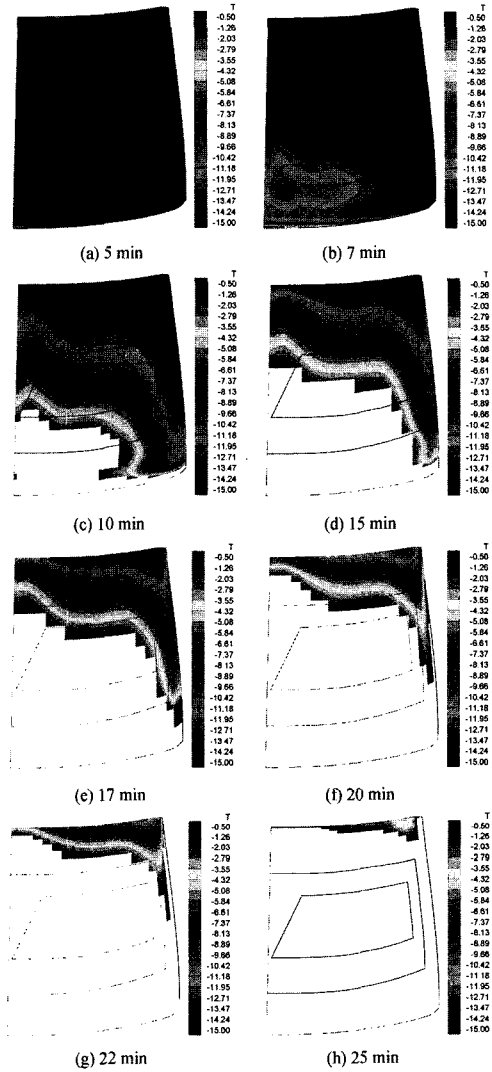


Fig. 13 Numerical contours of defrosting at several time elapsed

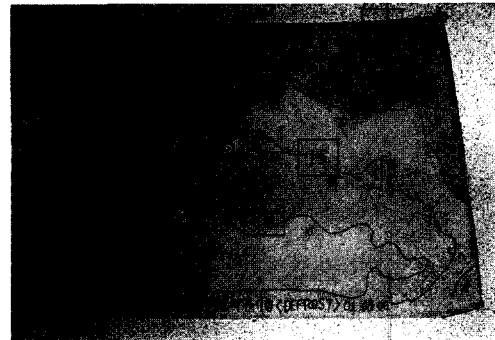


Fig. 14 Defrosting pattern by experiment¹⁶⁾

5. 결론

자동차 전면 유리창에 발생하는 성에의 defrost 시 플레이션을 위한 전산 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램의 타당성 검증에 위해 driven cavity 형상에 대해 온도장해석 및 해빙해석을 수행하였으며 타 연구자와 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 그리고 본 방법을 이용하여 실제 차량의 전방 유리면 성에 제거 예측을 위한 계산을 수행 하였으며, 역시 실험 결과와 비교적 잘 일치하는 계산 결과를 얻을 수 있었다. 성에 해빙의 진전양상은 defrost노즐의 토출 유속이 크고 온도가 큰 상 방향 대각선 방향으로 제상이 진전됨을 확인할 수 있었다.

References

- 1) C. Bonacina, G. Comini, A. Fasano, M. Primicerio, "Numerical Solutions of Phase Change Problems," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.16, pp.1825-1832, 1973.
- 2) V. R. Voller, M. Cross, P. Walton, Assessment of the Weak Solution Technique for Solving Stefan Problems, *Numerical Methods in Thermal Problems*, Pineridge Press., 1979.
- 3) V. R. Voller, M. Cross, "An Explicit Numerical Method to Track a Moving Phase Change Front," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.26, pp. 147-150, 1983.
- 4) G. H. Meyer, "Multi-dimensional Stefan Problems," *SIAM J. Num. Analysis*, Vol.10, pp. 522-538, 1973.
- 5) N. Shamsundar, E. M. Sparrow, "Analysis of Multi-dimensional Conduction Phase Change via the Enthalpy Model," *J. Heat Transfer*, Vol. 97, pp.33-340, 1975.
- 6) D. Longworth, A Numerical Method to Determine the Temperature Distribution Around a Moving Weld Pool, *Moving Boundary Problems in Heat and Diffusion*, Oxford Press., 1975.
- 7) R. M. Furzeland, "A Comparative Study of Numerical Methods for Moving Boundary Problems," *J. Inst. Maths Applies*, Vol.26, pp. 411-429, 1980.
- 8) R. E. White, "An Enthalpy Formulation of the Stefan Problem," *SIAM J. Num. Analysis*, Vol.19, pp.1129-1157, 1982.
- 9) D. M. Kang, Y. R. Jung, W. G. Park, "Numerical Flow Analysis of the Automobile with Crosswind Effects," *Korean Society of Computational Fluid Engineering*, Spring Conference Proceeding, pp.144-154, 1999.
- 10) W. G. Park, Y. R. Jung, "Numerical Viscous Flow Analysis around a High-speed Train with Crosswind Effects," *AIAA Journal*, Vol.36, No.3, pp.477-479, 1998.
- 11) J. G. Lee, Y. Jiang, A. J. Przekwas, M. Sioshansi, "Automotive Windshield Ice Clearing Analysis," *SAE International Congress and Exposition*, SAE 930289, Detroit, Michigan, 1993.
- 12) V. R. Voller, "An Enthalpy Method for Convection Diffusion Phase Change," *International Journal for Numerical Method in Engineering*, Vol.24, pp.271-284, 1987.
- 13) I. H. Bae, K. T. Kang, J. E. Hwang, W. G. Park, K. L. Jang, "Numerical Study of the Design Factor for Flow Analysis of Automotive Defrost Nozzle," *Autumn Conference of KSAE*, pp.578-583, 2001.
- 14) K. T. Kang, I. H. Bae, J. E. Whang, W. G. Park, "3-D Numerical Analysis of Flow and Temperature Field in the Cabin of Automobile with Defrost Nozzle Discharged Air," *Korea Society of Computational Fluids Engineering*, Autumn Conference Proceeding, pp.31-36, 2001.
- 15) B. P. Leonard, "A Stable and Accurate Convective Modeling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation," *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, Vol.19, pp.59-98, 1979.
- 16) Experimental Data, Hyundai Motor Company, 2002.