

자동차 내부 열유동해석 및 전방유리면의 해빙 전산해석

송 동 옥¹, 박 원 규^{2*}, 장 기 룡³

NUMERICAL ANALYSIS OF THERMAL FLOW OF CABIN INTERIOR AND DE-ICING ON AUTOMOBILE GLASS

D. W. Song , W. G. Park , K. L. Jang

The present work was undertaken to numerically analyze the defrosting phenomena of windshield glass. In order to analysis the phase change from frost to water on windshield glass by discharging hot air from a defroster nozzle, the flow and the temperature field of the cabin interior, the heat transfer through the windshield glass, and the phase change of frost should be solve simultaneously. In the present work, the flow field was obtained by solving 3-D incompressible Navier-Stokes equations, and the temperature field was computed from the incompressible energy equation. The phase change process was solved by the enthalpy method. For the code validation, the temperature and the phase change of the driven cavity were calculated. The calculation showed a good agreement with other numerical results. Then, the present code was applied to the defrosting problem of a real automobile, and a good agreement with the experimental data was also obtained.

Key Words: 내비어-스톡스 방정식(Navier-stokes equation), 에너지 방정식(Energy equation), 해빙해석(De-icing analysis), 상변화(Phase change), 엔탈피 방법(Enthalpy method)

1. 서 론

생활수준의 향상에 따른 자동차의 성능평가 시 엔진성능, 제동성능, 차체의 강도 등의 안전성과 관련된 부분 이외의 차내의 냉난방 성능 및 성에제거 등 과거에는 그다지 중요하지 않게 생각하던 사항들이 점점 중요하게 여기지는 추세이다. 또한 소비자들의 쾌적한 운전환경에 대한 요구에 따라 겨울철 유리창에 결빙된 성에나 응축 수증기는 운전자나 승객의 시야를 방해함으로써 안전운전이나 승객의 쾌적성을 위해 이들에 대한 손쉽고 빠른 제거가 설계 과정에서 고려되어야 한다. 특히, 북미나 유럽 등 수출용 차량에는 성에제거에 관한 차량 안전규정을 요구하고 있다. 따라서, 이러한 규정을 만족하는 성에 제거 시스템의 개발에 있어 기간 단축과 효율성 측면에서 최근에는 전산유체해석 기법을 이용하고 있으며, 본 연구

에서도 전산유체해석 기법을 이용하여, defrost노즐을 통해 분출된 고온의 공기에 의한 자동차 내부 유동 및 온도장 해석을 수행하여 성에의 해빙 현상을 해석하였다. 본 연구에서의 유동장 계산 시 분사노즐이 전방 유리면으로 유출되는 유동 값을 통해 비정상 에너지 방정식의 온도장의 해를 구한다. 본 연구에서는 cavity 유동장에 대한 온도장 해석을 시행하여 온도장 프로그램을 검증하였고, 열용량법에 관한 프로그램은 3차원 cavity 형상에서 전도 열전달 해석을 통해 1차원 analytical 해와 비교하였다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식과 이산화방법

본 연구는 승용차 전방유리면에 끼인 성에를 노즐에 의한 더운 공기를 이용하여 제거하는 것이 목적이므로 전방유리면 근처의 유동장 및 온도장 해석과 유리면에서 해빙해석이 요구된다. 따라서 유리면에서의 유동장 해석은 3차원 Navier-Stokes 방정식을 선택하였고, 온도장 해석 역시 3차원

1 학생회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

2 정회원, 부산대학교 기계공학부

3 현대자동차

* Corresponding author E-mail: wgpark@pusan.ac.kr

정상상태 에너지 방정식을 사용하였다. 해방해석 과정은 상변화를 동반하므로 잠열에 의한 에너지의 흡수량의 변화가 열원으로 작용하게 된다. 상변화의 거동을 해석하기 위한 열용량법을 사용하였으며 수식 전개는 다음과 같다[1-8].

2.1.1 유동해석 방정식

전방 유리면 근처의 유동장 해석을 위해 3차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 풀었다. 이를 무차원화 한 후 일반화 된 곡선좌표계로 나타내면 다음과 같다.

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

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 전산방법으로 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 이용하였으며, 중앙차분으로 인한 수치적 불안정성을 막기 위해서 4차 정확도의 explicit damping term을 추가하였다.

2.1.3 열용량법

전도에 의한 상변화를 계산하기 위한 비압축성 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 진동 현상이 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 계수 이다. 식 (8)을 통해서 잠열은 상변화 온도 차이에 의해 수정되므로 용해 시 잠열의 증가는 열원으로 작용하여 성애가 용해될 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

해석 대상은 차량 실내와 전방유리 및 성에로 구성된다. Fig. 1이 해석모델의 격자이다. 실제 제상 시 유동의 현상, 열 전달 및 성에의 상변화가 동시에 일어나므로 각 경우를 동시에 비정상 상태로 해석하는 것이 가장 정확한 해를 구하는 것이 되지만 수렴속도가 늦으므로 엄청난 계산시간이 요구된다. 또한 차량 내부에서 노즐에 의한 강제대류의 영향이 지배적이므로 유동장과 온도장을 분리하여 계산할 수 있다. 따라서 차량내부의 정상상태 유동장의 해를 이용하여 과도온도장의 해를 구하는 것이 효율적이다. 따라서, 성에의 상변화 과정에서 유동장이 일정하게 유지된다는 가정하에서 3차원 비정상 온도장과 상변화 해석을 수행한다. Table. 1은 경계조건과 초기조건을 나타낸다.

Table. 1 Initial & boundary condition

위치	경계조건	초기조건
노즐 출구	노즐 출구 실험온도	-20℃
전방유리	-20℃	
벽	단열조건	

3. 해석 프로그램 검증

3.1 온도장 해석 프로그램 검증

식 (2)의 에너지 방정식 코드를 검증하기 위해 driven cavity 유동을 계산하여 선행된 수치해석 결과 Leonard[13]와 비교하였다. 계산에 사용된 격자는 41×41×41로서 Fig. 1은 x와 z 방향의 중앙단면을 보여준다. Re 수는 200이며 Pr 수는 0.25 일때이다. 중앙의 단면에서의 2차원의 Leonard[13]의 결과와 비교하였다. Peclet수가 50일 때와 1000일 때의 온도 분포를 계산하였으며, 이들 계산 결과를 Leonard[13]의 계산 결과와 Fig. 2와 Fig. 3에서 각각 비교하였는데, 등온선이 비교적 서로 잘 일치함을 볼 수 있다.

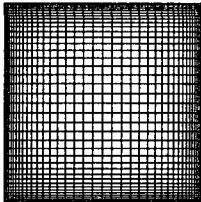


Fig. 1 Geometry of the driven cavity

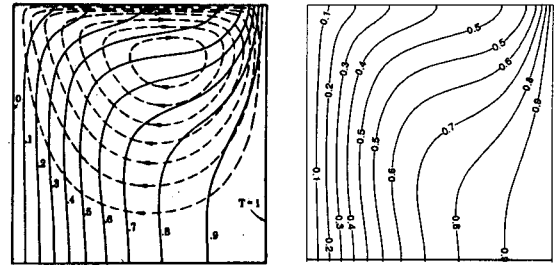


Fig. 2 Isotherms at Pe=50

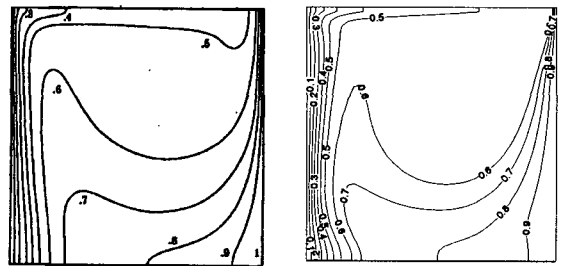


Fig. 3 Isotherms at Pe=1000

3.2 해빙해석 프로그램 검증

3차원 열용량법을 해석하기 위한 프로그램에서 잠열에 해당되는 Source term의 처리가 타당한지의 여부를 판단하기 위하여 analytical value와 voller[12]의 계산결과와 현재의 계산결과를 비교하였다. 형상은 3차원 cavity이며 3차원 열전도 현상으로 물성치는 Table. 2와 같다. 초기 온도는 -0.5이며 형상과 경계조건은 Fig. 4와 같다. 계산에 사용된 격자는 21×21×21이며 시간 간격은 0.1이다. 초기 이른 시간에 cavity에서의 온도장의 해는 중간지점에서 일차원의 해와 거의 비슷하다. Fig. 5를 보면 그 해가 거의 일치함을 알 수가 있다.

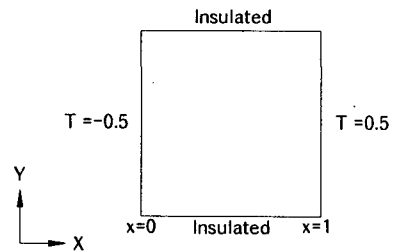


Fig. 4 Boundary condition of melting

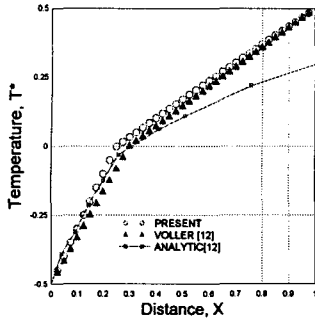


Fig. 5 Temperature profile at t=500s

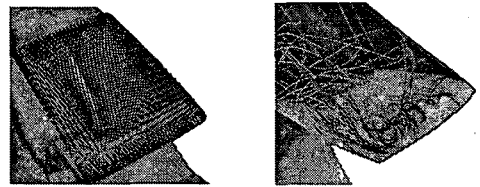
Table. 2 Parameters used in calculation

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

4. 결과 및 고찰

본 연구에서 차량의 전방 유리면에 대한 성에 제거 실험은 차량의 실내의 온도가 -15°C인 상태에서 전방 유리면에 0.5mm의 균일한 두께로 성에가 생성되었으며, 이 상태에서 자동차 엔진을 시동하면 defrost 노즐을 통해 공기가 Fig. 6와 같은 유동 양상을 가지고 토출되며 공기 토출 온도는 엔진 시동부터 Fig. 7과 같이 시간이 경과함에 따라 -18°C부터 점차적으로 온도가 상승하여 시동 후 약 20분이 경과하면 토출 온도가 약 50°C까지 상승하게 된다. 이에 따라 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 자동차 실내의 유동장과 온도장을 구하면 Fig. 8과 Fig. 9의 해를 얻게 된다. Fig. 8(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. 8(b)에서는 측면 defrost 노즐과 Fig. 6(a)의 강한 상 방향 대각선 방향의 유동에 의하여 실내 중간 높이 영역에서는 앞좌석의 장애물 역할에 의한 와류 유동을 확인할 수 있다. Fig. 9는 자동차 실내 온도 분포를 그린 것으로 그림 우측의 막대는 절대온도(K)를 나타낸다. Fig. 9(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. 9(b)의 실내 중간 높이의 횡단면 온도장에서는, 측면 defrost 노즐에 의해 운전석 측면 앞쪽에 역시 고온 영역이 발생하고 있음을 볼 수 있다. Fig. 9(c)는 defrost노즐을 통해 더운 공기 토출 후 20분

경과후의 자동차 전면의 온도 분포로서 Fig. 6(a)에서 보듯이 상 방향 대각선 방향으로 강한 유속이 흐름으로 인해서 온도 역시 대각선 방향으로 높은 온도가 분포하고 있음을 볼 수 있다. Fig. 10은 Fig. 9(c)와 같은 온도분포를 가지고 전면 유리창에 발생한 성에가 녹는 현상을 앞에서 기술한 열용량 법으로 해석한 것이다. 그리고 Fig. 11의 실험[14]을 통해 얻어진 해빙 형상과 서로 비교 하였는데 비교적 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.



(a) Velocity vectors (b) Streamlines

Fig. 6 Flow pattern on the glass of windshield

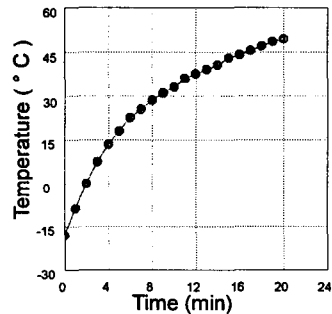
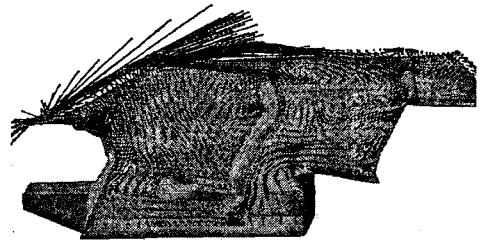
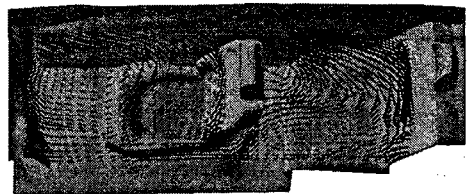


Fig. 7 Temperature of the discharged air

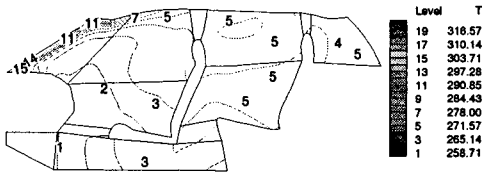


(a) In symmetry plane

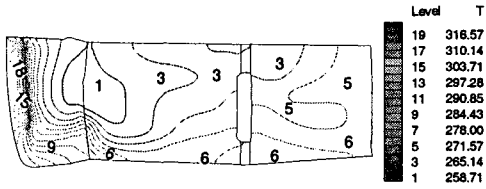


(b) In transverse plane at y=H/2

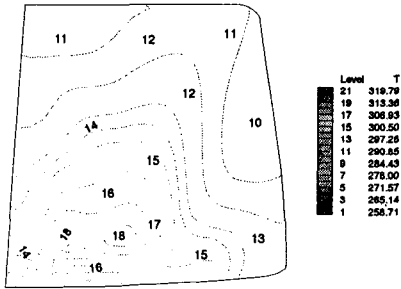
Fig. 8 Velocity vectors of the cabin interior



(a) In symmetry plane

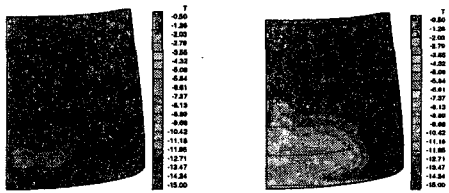


(b) In transverse plane at $y=H/2$



(c) On the glass

Fig. 9 Temperature field of the cabin interior



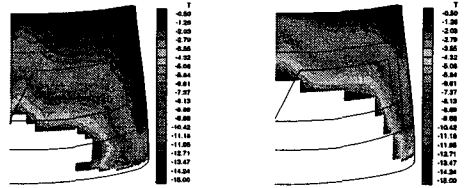
(a) 5 min

(b) 7 min

Fig. 10 Numerical contours of defrosting at several time elapsed

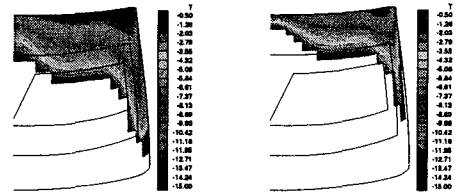
5. 결론

본 연구는 제상과정을 해석하기 위한 3차원 열유량법과 온도장 프로그램을 검증하였다. Defrost 노즐의 실험결과와 전방 유리 인접의 유동장의 해석 결과를 바탕으로 온도장을 해석하였다.



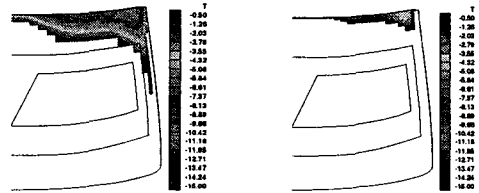
(c) 10 min

(d) 15 min



(e) 17 min

(f) 20 min



(g) 22 min

(h) 25 min

Fig. 10 Continued

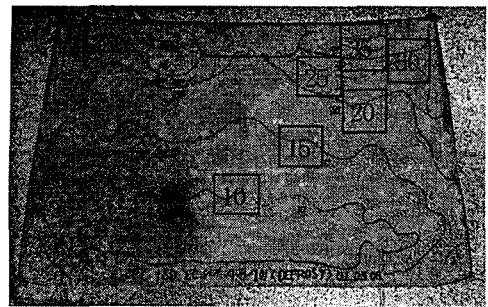


Fig. 11 Defrosting pattern by experiment

6. 참고문헌

- [1] C. Bonacina, G. Comini, A. Fasano, M. Primicerio, 1973, "Numerical Solutions of Phase Change Problems", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.16, p.1825-1832.
- [2] V. R. Voller, M Cross, P. Walton, 1979, Assessment of the Weak Solution Technique for Solving Stefan Problems, *Numerical Methods in Thermal Problems*, Pineridge Press.
- [3] V. R. Voller, M. Cross, 1983, "An Explicit Numerical



- Method to Track a Moving Phase Change Front", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.26, p.147-150.
- [4] G. H. Meyer, 1973, "Multi-dimensional Stefan Problems", *SIAM J. Num. Analysis*, Vol.10, p.522-538.
- [5] N. Shamsundar, E. M. Sparrow, 1975, "Analysis of Multi-dimensional Conduction Phase Change via the Enthalpy Model", *J. Heat Transfer*, Vol.97, p.333-340.
- [6] D. Longworth, 1975, A Numerical Method to Determine the Temperature Distribution Around a Moving Weld Pool, *Moving Boundary Problems in Heat and Diffusion*, Oxford Press.
- [7] R. M. Furzeland, 1980, "A Comparative Study of Numerical Methods for Moving Boundary Problems", *J. Inst. Maths Applies*, Vol.26, p.411-429.
- [8] R. E. White, 1982, "An Enthalpy Formulation of the Stefan Problem", *SIAM J. Num. Analysis*, Vol.19, p.1129-1157.
- [9] D. M. Kang, Y. R. Jung, W. G. Park, 1999, "Numerical Flow Analysis of the Automobile with Crosswind Effects", *Korean Society of Computational Fluid Engineering*, Spring Conference Proceeding, p.144-154
- [10] W. G. Park, Y. R. Jung, 1998, "Numerical Viscous Flow Analysis around a High-speed Train with Crosswind Effects", *AIAA Journal*, Vol.36, No.3, p.477-479.
- [11] J. G. Lee, Y. Jiang, A. J. Przekwas, M. Sioshansi, 1993, "Automotive Windshield Ice Clearing Analysis", *SAE International Congress and Exposition*, SAE 930289, Detroit, Michigan.
- [12] V. R. Voller, 1987, "An Enthalpy Method for Convection Diffusion Phase Change", *International Journal for Numerical Method in Engineering*, Vol.24, p.271-284.
- [13] B. P. Leonard, 1979, "A Stable and Accurate Convective Modeling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation", *Computer Method in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.19, p.59-98.
- [14] Experimental Data, 2002, Hyundai Motor Company.