

## 열용량법을 이용한 자동차 전방 유리면의 제상성능 해석

### Numerical defrost analysis of automobile windshield using enthalpy method

황지은\*<sup>1</sup>, 박만성\*<sup>1</sup>, 박원규\*<sup>2</sup>

J. E. Hwang, M. S. Park, W.G. Park.

For windshield defrosting, flow analysis of inner room(vehicle) and heat conduction on the windshield surface are undertaken. Simulaion for defrosting enthalpy method is usedand verificationof heat and fluid flow analysis for room is done in cavity flow. The defrosting process is three dimensional phenomena and phase is changing. The result of defrosting analysis are well presenting the phase change and these results offer basic design data for defrosting phenomena.

**Key words** : defrost , windshield, enthalpy method, phase change, cavity flow

## 1. 서론

겨울철 유리창에 결빙된 성에나 응축 수증기는 운전자나 승객의 시야를 방해함으로 안전운전이나 승객의 안락감에 큰 문제가 되고 있다. 더구나 수출용 차량에는 성에제거에 관한 차량의 안전 규제가 포함됨으로 이들에 대한 손쉽고 빠른 제거가 설계 과정에서 반드시 고려되어야 할 필수 사항이다. 그러나 현재 국내 자동차 업계에서는 실험과 시제품을 통한 그 결과를 예측하고 있다. 이러한 방법은 차량개발이 어느 정도 완료된 단계에서나 가능하므로 제상성능의 능력을 개선하

기 위한 설계변경 및 시제품 재제작 등의 많은 어려움이 따른다.

이러한 시험 평가의 어려움을 극복하기 위한 방안으로 본 연구에서는 수치해석기법을 이용하여 성에 제거시간을 예측하고자 한다.

제상패턴을 해석하기 위해 열용량법(enthalpy method)을 이용하는데, 차량내부 특히 유리면에 인접한 영역의 유동장 해석이 중요하므로 유리

와 더운 공기 사이의 대류열전달과 성에의 상변화를 고려한 전도 열전달 해석시 이용된다. 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 이산화 방법

#### 2.1.1 에너지 방정식

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 비압축 점성성유동의 정상상태 Navier-Stokes 방정식을 선택하였고, 온도장 해석 역시 3차원 정상상태 에너지 방정식을 사용하였다. 해빙해석

1) 부산대학교 기계공학과 대학원

2) 부산대학교 기계공학부

과정은 상변화를 동반하므로 잠열에 의한 에너지의 흡수량의 변화가 열원으로 작용하게 된다. 상변화의 거동을 해석하기 위한 열용량법을 사용하였으며 수식 전개는 아래와 같다.

먼저 차량 내부 유동에 의한 에너지 장을 풀기 위한 비압축성 에너지 방정식은 아래와 같다.

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla h - \nabla \cdot (k \nabla T) = 0 \quad (1)$$

위 에너지 방정식의 대류항은 2차 정확도를 가지는 중앙차분을 점성항은 4차의 정확도를 가지는 역시 중앙차분을 시행하였으며, 중앙차분으로 인한 수치적 불안정성을 막기 위한 4차 정확도의 explicit 댐핑항을 추가하였다.

### 2.1.2 열용량법

전도에 의한 상변화를 계산하기 위한 비압축성 에너지 방정식은 다음과 같이 정의된다.

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

여기서,  $h$ ,  $\rho$ ,  $k$  는 각각 엔탈피, 밀도, 열전도도이다.

위 방정식에서 상변화를 고려한 총 엔탈피는 다음과 같다.

$$H = h + \Delta H \quad (3)$$

여기서,  $\Delta H$  는 잠열을 의미하며 온도의 함수로 표현되며 다음과 같다.

$$\Delta H = \begin{cases} L & T > T_m \text{ 일때} \\ 0 < \Delta H < L & T = T_m \text{ 일때} \\ 0 & T < T_m \text{ 일때} \end{cases} \quad (4)$$

여기서,  $L$ 은 용해잠열,  $T_m$ 은 용융 온도이다.

잠열을 고려하기 위해 총 엔탈피에 대한 (1)의 식은 다음과 같이 표현된다. (단  $c$ 는 비열)

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} - \nabla \cdot \left( \frac{k}{c} \nabla H \right) + S = 0 \quad (5)$$

(3)의 식을 (5)에 대입하여 (2)의 식과 비교하면 source term은 아래와 같다.

$$S = \frac{\partial}{\partial t} (\rho \Delta H) \quad (6)$$

이다.

의 식과 (6)의 식이 서로 연계되어 있으므로 수치계산에서는 두 식의 반복계산이 필요하다. 먼저 에너지 방정식을 통한 온도를 구하고 이 온도를 통하여 (4)의 식에 의해 잠열을 수정하며 이틀다시 에너지 방정식을 계산하는 즉 반복 과정을 통해 해를 구하게 된다. 그런데 잠열 수정 시 (4) 식을 바로 쓰면 진동현상이 발생하여 수렴된 해를 얻기가 어려우므로 Voller가 제안한 수정방법을 사용한다. [1,2]

$$(\Delta H)_{i+1} = (\Delta H)_i + c\lambda (T_i - T_m) \quad (7)$$

여기서  $i$ 는 반복 횟수,  $\lambda$ 는 보정계수 이다.

(7)의 식을 통해서 잠열은 상변화 온도 차이에 의해 수정되므로 용해 시 잠열의 증가는 열원으로 작용하여 성에 가 용해될 때 상변화 온도를 고정시켜주며, 상변화가 끝나면 잠열의 변화는 없으므로 그 값을 고정시킨다.

$$\begin{cases} \Delta H_{i+1} < 0 \text{ 일때} & \Delta H_{i+1} = 0 \\ \Delta H_{i+1} > 0 \text{ 일때} & \Delta H_{i+1} = L \end{cases} \quad (8)$$

위 (2)의 식 역시 4차의 정확도를 가지도록 중앙차분을 시간은 explicit time marching으로 시행하였다.

## 2.2 경계조건 및 초기조건

해석 대상은 차량 실내와 전방유리 및 성에로 구성된다. Fig 이 해석 모델의 격자이다.

실제 제상 시 유동의 형상, 열전달 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 1 경계조건과 초기조건이다.



Table 1. Initial &amp; boundary condition

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

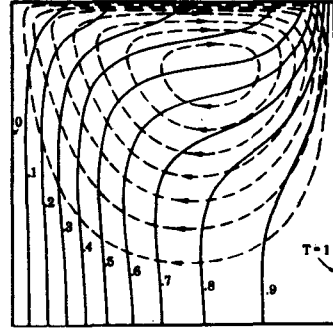


Fig. 2 2-D Isotherms, Pe=50 Leonard result

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 열 유동해석 프로그램 검증

개발된 온도장 프로그램의 검증을 위해 3차원 Cavity Flow를 계산하여 선행된 수치결과 Leonard[4]와 비교하였다.

계산에 사용된 격자는  $41 \times 41 \times 41$ 로서 Fig. 1은 x와 z 방향의 중앙단면을 보여준다. Re 수는 200이며 Pr 수는 0.25 일때이다. 중앙의 단면에서의 2차원의 Leonard[4]의 결과와 비교하였다. Fig. 2와 Fig. 3을 비교해보면 등온선이 비교적 잘 일치됨을 볼 수 있다.

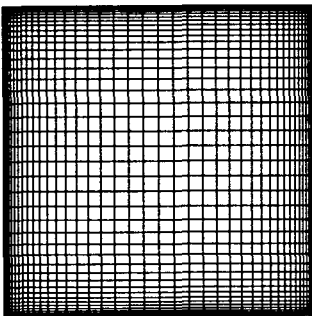


Fig. 1 in x-z direction middle cross section

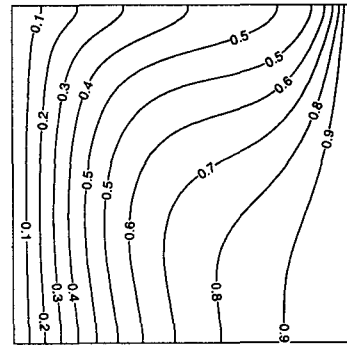


Fig. 3 3-D Isotherms, Pe=50 present result

#### 3.2 해빙해석 프로그램 검증

3차원 열용량법을 해석하기 위한 프로그램에서 잠열에 해당되는 Source term의 처리가 타당한지의 여부를 판단하기 위하여 analytical value와 voller의 계산결과와 현재의 계산결과를 비교하였다. 형상은 3차원 cavity이며 3차원 열전도 현상으로 물성치는 Table 1과 같다. 초기 온도는 -0.5이며 형상과 경계조건은 다음과 같다. 계산에 사용된 격자는  $21 \times 21 \times 21$ 이며 시간 간격은 0.1 이다. 초기 이른시간에 cavity에서의 온도장의 해는 중간지점에서 일차원의 해와 거의 비슷하다. Fig. 2를 보면 그 해가 거의 일치함을 볼 수 있다.

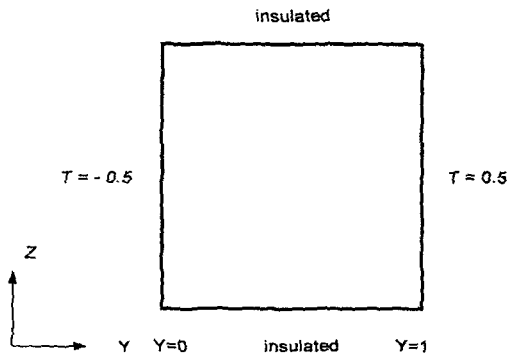


Fig. 4 in x-z direction middle cross section & Boundary condition

Table 2 Parameters used in calculation Test

k	0.001
$\rho$	1.
c	1.
L	5.

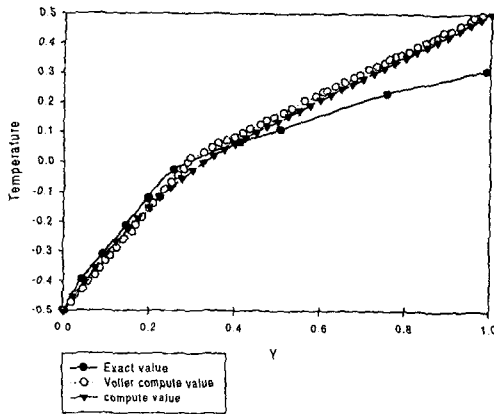


Fig. 5 Temperature profile at t=500s

### 3.3 결과

Fig. 6 은 본 계산에 사용된 격자로서  $25 \times 51 \times 30$  이며, 레이놀즈 수는 3970, Prantl 수는 0.707 시간 간격은 0.001 이다. Fig. 7 단면에 대한 속도분포로서 노즐에서 나온 더운 공기가 전방유리면에 부딪힌 후 퍼져나가는 양상을 잘

보여 준다. Fig.8 는 노즐에 의한 유동값, 전방 유리 인접영역의 정상상태의 유동값, 노즐 출구 개구부의 실험 온도값을 이용하여 온도장을 계산한 결과이다.

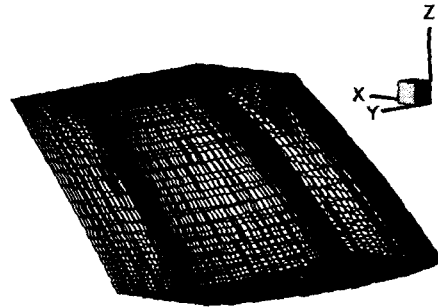


Fig. 6 Computational domain

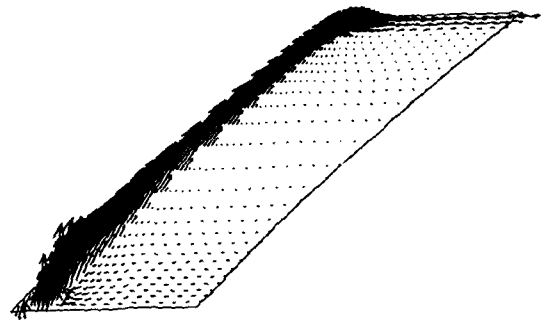


Fig. 7 Velocity vectors at side

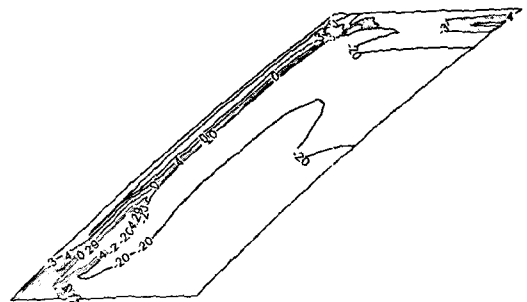


Fig. 9 At side in time 1 min.



#### 4. 결론

본 연구는 제상과정을 해석하기 위한 3차원 열용량법과 온도장 프로그램을 검증하였다. defrost 노즐의 실험결과와 전방유리 인접의 유동장의 해석 결과를 바탕으로 온도장을 해석하였다.

#### 5. 참고문헌

- [1] V.R. Voller, "An enthalpy method for convection diffusion phase change," international journal for numerical methods in engineering, vol. 24, 1987, pp. 271-284
- [2] J. G. Lee, Y. Jiang, A. J. Przekwas, M. Sio shansi, "Automotive windshield ice clearing analysis", SAE international congress and exposition, SAE paper 930289, Detroit, Michigan
- [3] J. R. Sellars, M. Tribus, and J. S. Klein, "Heat transfer to laminar flow in a round tube or flat conduit-the graetz problem extended, trans. ASME, vol. 78, pp. 142-144, 1977
- [4] B.P. Leonard, "A stable and accurate con-vective modeling procedure based on quadratic upstream interpolation", computer methods in applied mechanics and engineering, vol. 19, pp. 59-98, 1979