

엔탈피방법을 이용한 결빙 및 응축 메커니즘 해석

김성환[†] · 허민웅* · 박원규** · 정성해***

Numerical Analysis of Icing and Condensation Mechanism Using Enthalpy Method

S. H. Kim, M. W. Heo, W. G. Park, S. H. Jung

Key Words: Icing(결빙), Condensation(응축), Energy equation(에너지 방정식), Enthalpy method(엔탈피 방법), Phase Change(상 변화)

Abstract

A solver for icing and condensation of water has been developed. The phase change process was solved by the enthalpy method. For the code validation, the temperature and the phase change from water to ice of the driven cavity were calculated. Also, the melting process of the frost on the windshield glass of an automobile has been simulated. The calculation showed a good agreement with analytical solution and other numerical results. Using the present validated code, the condensation of water vapor has been first tried. The computed results provided some physical features of condensation phenomena even though experimental data and other numerical data were not available. For future work, it is recommended to thoroughly investigate the effects of boundary conditions on the solution.

1. 서 론

기호설명

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

물질간의 열교환으로 인한 상변화 현상은 이슬의 맺힘이나 결빙 등과 같은 자연적인 경우로부터 냉장고나 에어컨 등의 냉동공조 시스템 같은 인위적인 경우까지 매우 다양하며 인간생활과 밀접하다. 특히, 냉동공조 기술의 발달은 인간을 보다 쾌적한 환경에서 생활할 수 있게 하였으며, 앞으로도 점점 중요하게 여겨지는 추세이다. 그러나 보다 정확하고 효율적인 냉동공조 기술개발을 위해서는 상변화 메커니즘을 정확히 해석하는 것이 선행되어야하나 현재까지는 실험적인 결과에만 의존하여 시간적으로나 금전적으로 많은 비용이 드는 실정이다. 따라서 이러한 상변화 메커니즘을 규명하기 위해 기간 단축과 효율성 측면에서 최근에는 전산유체해석 기법에 관심을 가지게 되었으며, 본 연구에서도 전산유체해석 기법을 이용하여 물의 결빙과정 및 습공기의 응축과정과 같은 상변화 현상을 해석해 보았다.

[†] 학생회원, 부산대학교 기계공학과 대학원
E-mail : ksh99@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-3064 FAX : (051)512-5236
* 부산대학교 기계공학과 대학원
** 정회원, 부산대학교 기계공학과
*** (주) LG전자 DA 사업부

물의 결빙과정이나 습공기의 응축과정에 대한 해석을 위해서는 상변화 문제를 수치적으로 해석하여야 하는데, 보통 엔탈피방법(Enthalpy Method)을 이용하며, 본 연구에서도 엔탈피 방법을 이용하여 프로그램 모듈을 개발하고 이를 2차원 단순형상에서 물의 결빙현상에 대한 검증을 거친 후, 습공기의 응축과정에 대한 해석을 수행하였다.

2. 지배방정식과 수치해석

2.1 유동해석 방정식

상변화면 근처의 유동장 해석을 위해 3차원 비압축성 Navier-stokes 방정식을 풀었다.

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

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)을 사용하였다.

2.2 에너지 방정식

상변화면 근처의 온도장을 풀기 위한 비압축성 에너지 방정식은 다음과 같다.

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

여기서, h, ρ, k 는 각각 엔탈피, 밀도, 열전도를 의미하고, \vec{u} 는 속도벡터를 나타내며 식 (1)의 유동방정식에서 구한 속도장을 대입하여 푼다. 위 에너지 방정식은 온도에 대해 포물선형 편미분 방정식(Parabolic partial differential equation)이므로 수치해석 방법으로 AF(Approximate Factorization)방법을 이용하여 풀게 되며 대류 항은 2차 정확도를 가지는 중앙차분을 이용하였다.

2.3 엔탈피방법

물질의 상변화를 계산하기 위해 다음의 엔탈피 방법을 이용하였다.

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

S 는 생성항을 의미하며, 상변화를 고려한 총 엔탈피 H 는 다음과 같이 정의된다.

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

ΔH 는 잠열을 의미하며 온도의 함수로 다음 조건을 가진다.

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

여기서, L 은 상변화 시 잠열, T_m 은 상변화 시 온도를 나타낸다. 잠열을 고려하기 위해 식 (3)을 총 엔탈피에 대한 식으로 나타내면 다음과 같은 식을 얻는다.

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

여기서, c 는 비열을 의미하며, 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 이온도를 통하여 식 (5)와 식 (7)의 잠열을 수정하며 식 (3)을 계산하고 다시 식 (2)의 온도변화에 따라서 같은 계산을 반복한다. 그런데 잠열 수정과정에서 식 (5)를 바로 쓰면 수치적 진동현상이 발생하여 수렴된 해를 얻기가 어려우므로 다음과 같이 제안된 수정 방법을 사용한다.

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

여기서 i 는 반복횟수, λ 는 보정계수이다. 식 (8)을 통해서 잠열은 상변화 온도 차이에 의해 수

정되므로 용해 시 잠열의 증가는 열원으로 작용하여 해빙 시 상변화 온도를 고정시켜 주며, 상변화가 끝나면 잠열의 변화는 없으므로 그 값을 다음과 같이 고정시킨다.

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

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. 1은 driven cavity 유동의 격자 형상이다. Peclet 수가 50일 때와 1000일 때의 온도분포 계산결과를 Leonard의 계산결과와 Fig. 2와 Fig. 3에서 각각 비교하였는데, 등온선이 거의 일치함을 알 수 있었다.

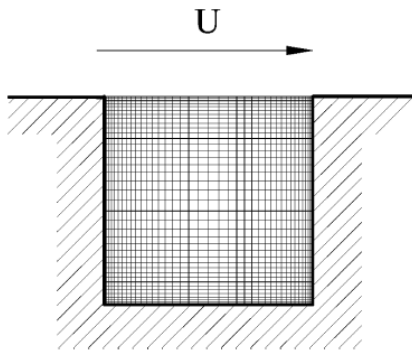


Fig. 1 Geometry of the driven cavity

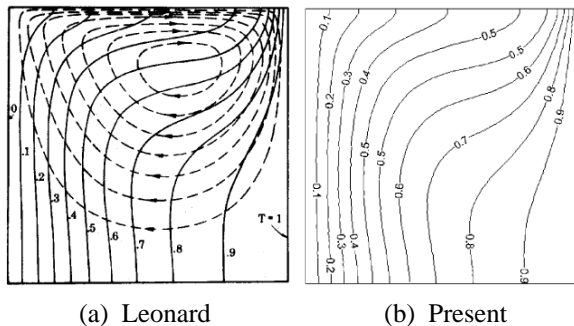
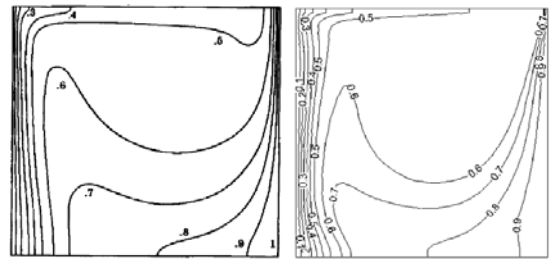


Fig. 2 Isotherms at $Pe = 50$



(a) Leonard (b) Present

Fig. 3 Isotherms at $Pe = 1000$

3.2 상변화 프로그램의 결빙현상에 대한 검증

본 프로그램의 엔탈피방법의 타당성을 검증하기 위해 결빙 현상을 수치해석하여 Voller의 수치해석 결과와 비교하였다. 본 프로그램과 Voller의 알고리즘은 거의 동일하나 잠열이 발생하는 부분에 있어 ΔH 의 정의와 계산이 본 프로그램이 간편하고 계산 량이 적어서 효율적이다. 형상과 부과된 경계조건은 Fig. 4와 같으며 계산에 사용된 물성치는 Table 1에 나타내었다. 온도는 무차원으로 표현하였으며, 여기서 무차원 온도(T^*)와 무차원 시간(t^*)의 정의는 다음과 같다.

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

$$T_B = T_R - T_L$$

T : 실차원 온도, T_m : 용융온도

T_R : 오른쪽 경계의 온도, T_L : 왼쪽 경계의 온도

l : 대표길이, t : 실 차원 시간

Fig. 5는 시간에 따른 온도분포를 보여주는데, 결빙점이 왼쪽에서 오른쪽으로 서서히 이동함을 알 수 있다. Fig. 6은 $t^* = 500$ 일 때 온도분포이며 본 연구 결과와 Voller의 계산 결과가 매우 잘 일치함을 보여주고 있고 해석적 결과와도 비교적 잘 일치하고 있다. 그러나 Fig. 4에서 $X = 1.0$ 인 우측 경계면에서 Dirichet 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. 6에 의하면 $X = 0. \sim 0.3$ 까지 무차원 온도가 0이하로서 이 영역에서는 결빙되어 있음을 알려주고

$X = 0.3 \sim 1.0$ 에서는 무차원 온도가 0 이상이므로 여전히 액체 상태임을 알 수 있다.

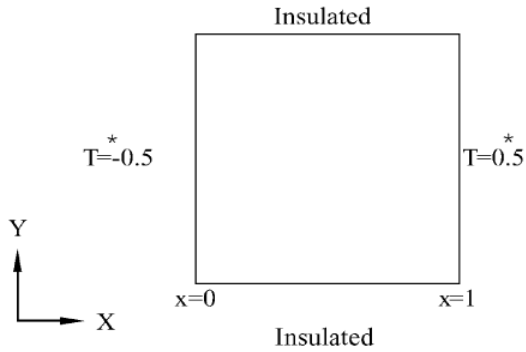


Fig. 4 Boundary conditions of icing

Table 1 Parameters used in calculation

k (열전도도, $W/m \cdot ^\circ C$)	0.001
ρ (밀도, Kg/m^3)	1.
c (비열, J)	1.
L (잠열, J)	1.

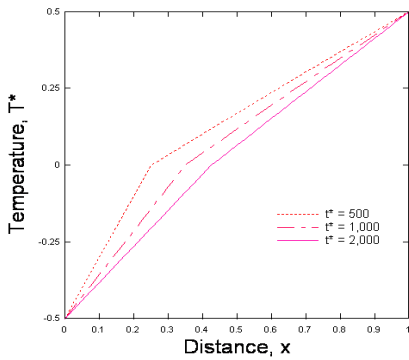


Fig. 5 Temperature profile at $t^* = 500, 1,000$ and $2,000$

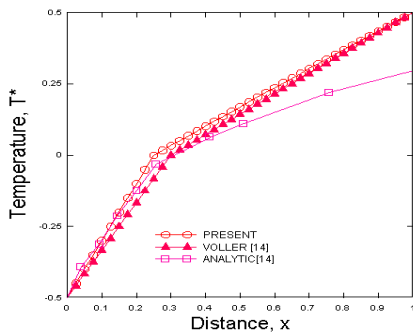


Fig. 6 Temperature profile at $t^* = 500$

4. 응축메커니즘 해석 결과 및 고찰

기존 Voller의 계산결과에 쓰였던 solid(얼음)과 liquid(물)의 2상이 아니라, liquid(물)과 moist air(습 공기) 사이의 2상에 대해 Enthalpy method를 적용시킨 프로그램을 2차원 cavity에서 검증하였다. 계산에 사용된 격자는 41×41 이며 시간간격은 0.001이다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 Cavity 좌측 경계 온도는 $30^\circ C$ 이고, 초기 cavity 내부의 온도는 $65^\circ C$ 이며, 상대 습도(Relative humidity)는 90%로 설정하였다. Fig. 8에서 노점온도(Dew point temperature)가 시간이 지날수록 전체 평판에서 오른쪽으로 진행되어짐을 알 수 있다. 노점 온도의 왼쪽은 습공기가 물로 응축된 영역이며, 노점온도의 오른쪽 영역은 아직 응축되지 않은 수증기의 영역이라 할 수 있다. 이는 앞서 검증한 결빙에 대한 수치해석에서 solid와 liquid의 두 영역에서 적용한 결과와 동일하며, 응축된 물의 영역은 앞서 결빙해석에서의 냉각된 얼음의 영역과 동일하게 보면 된다. 시간에 따른 상대습도변화가 Fig. 9에 나타나 있는데, 시간이 지날수록 상대습도가 1이 되는 영역, 다시 말해 응축된 물의 영역이 cavity의 우측으로 진행되어짐을 알 수 있다.

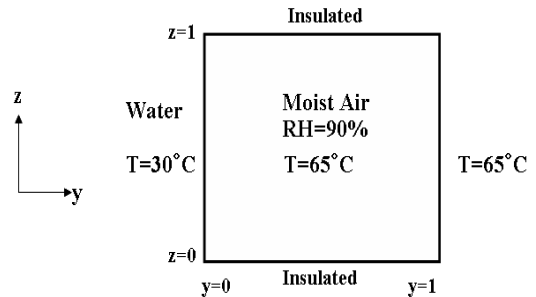


Fig. 7 Boundary conditions of condensation

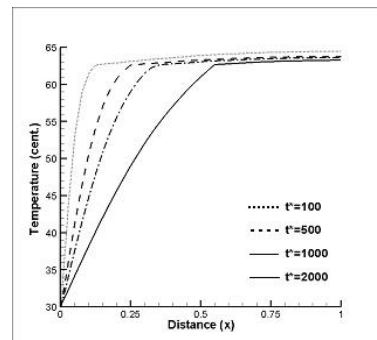


Fig. 8 Temperature profile at $t^* = 100, 500, 1,000$ and $2,000$

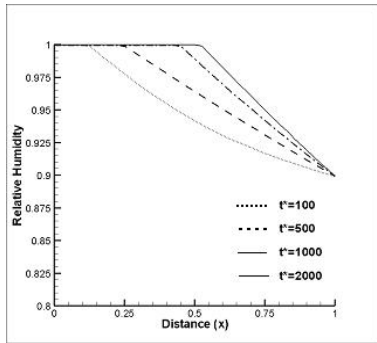


Fig. 9 Relative humidity at $t^* = 100, 500, 1,000$ and $2,000$

Fig. 10은 cavity 일정부분의 상대습도가 1.0이 되면 그 부분의 응축수와 습공기를 격자 외부로 배출해내는 과정을 나타내고 있다. (b)와 같이 $X=0.0$ 지점부터 $X=0.25$ 지점까지 응축이 진행 되면 (c) 그래프에 나와 있듯이 응축된 부분은 외부로 배출되고, 아직 응축되지 않은 습공기가 그 자리를 채우고 있다. 그래프 왼쪽에 변곡점이 있는데, 이는 배출된 영역만큼 초기조건 $T=65^\circ\text{C}$, $RH=0.9$ 의 습공기가 변곡점의 오른쪽에서 내부로 유입됨을 나타낸다. 이러한 과정을 반복하면서 시간에 따른 배출된 응축수의 양을 Fig. 11에 나타내었다.

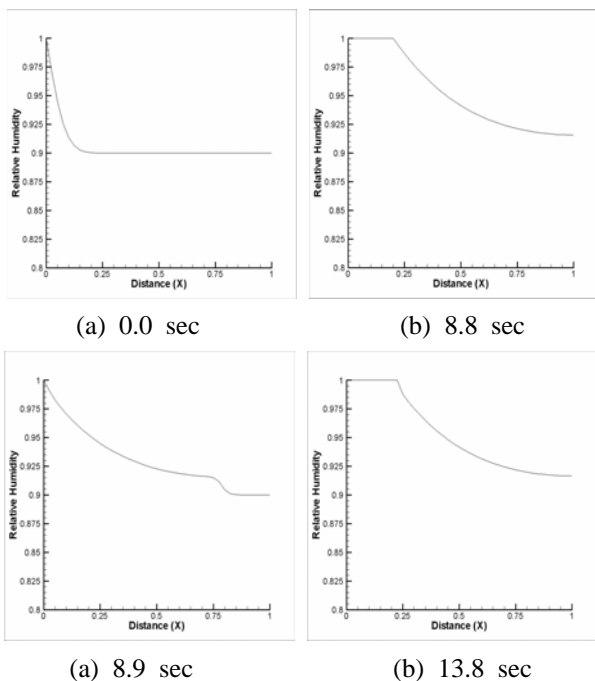


Fig. 10 Condensation and drain cycle

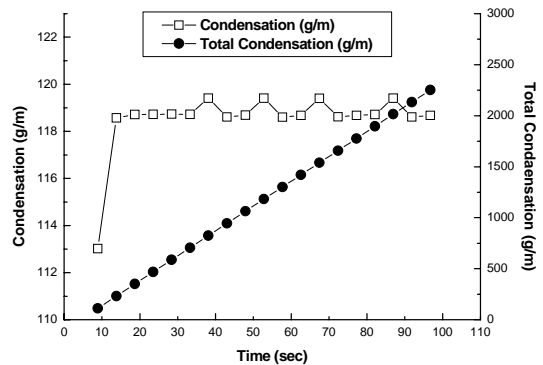


Fig. 11 Drain of Condensation-water

Fig. 11에서 왼쪽은 매회 응축수 배출량을 뜻하고, 오른쪽은 누적되고 있는 응축수의 총량을 나타낸다. 응축수의 단위는 g/m 로 표시되었는데, 이는 cavity가 2차원이기 때문이다. 첫 회 응축수 배출 이후 두 번째부터는 응축수 배출 Cycle이 Steady-state로 도달하여, 배출량이 거의 일정함을 알 수 있으며, 또한 응축수 배출량이 일정함으로 앞으로 배출될 총량을 예측할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 물질의 열교환에 따른 상변화 메커니즘의 시뮬레이션을 위한 전산 프로그램을 개발하였다. 상변화 메커니즘의 수치적 해석을 위해 엔탈피방법을 적용하였으며 개발된 프로그램의 타당성 검증을 위해 driven cavity 및 결빙 수치해석을 수행하여 타 연구자와 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 그리고 본 프로그램을 이용하여 물과 습공기 사이의 응축메커니즘 시뮬레이션을 수행하여 비교적 타당한 수치해석 결과를 얻을 수 있었다. 물과 접하는 부분부터 응축되기 시작하며, 응축수 배출 Cycle이 거의 Steady-state에 도달함에 따라 시간에 따른 응축수 배출 총량을 예측할 수 있었다. 본 연구의 보다 정확한 검증을 위해 실제 형상에서의 실험 및 수치해석이 요구된다.

후기

본 연구는 2006년도 부산대학교 BK21 사업의 지원금에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Lee, S. K., 2005, "Experimental study on the direct contact condensation of steam vertically injected into water through a mini nozzle," *Pohang University of Science and Technology*.
- (2) Choi, K. Y., 1998, "Direct-contact condensation heat transfer with noncondensable gases and interfacial shear for Co-current stratified wavy flow in nearly-horizontal channels," *KAIST*.
- (3) Youngs, D. L., Morton, K. W. and Baines, M. J., "Time-Dependent Multi-Material Flow with Large Fluid Distortion," *Numerical Methods for Fluid Dynamics. Academic Press*.
- (4) Park, M. S., Hwang, J. E., Park, W. G. and Jang, K. L., 2003, "Numerical Study of Defrost Phenomenon of Automobile Windshield," *Transactions of Korean Society of Automotive Engineers*, Vol 11, No. 2, pp.157-163.
- (5) Park, W. G., Park, M. S., Jung, Y. R. and Jang, K. L., 2005, "Numerical Study of Defrosting Phenomenon of Automotive Windshield Glass," *Numerical Heat Transfer, Part A*, 47: 725-739.
- (6) Park, W. G., 1998, "Computational Fluid Dynamics Vol. I," pp.153-188, pp.226-260.
- (7) Voller, V. R. and Cross, M., 1983, "An Explicit Numerical Method to Track a Moving Phase Change Front," *Int. J. Num. Analysis*, Vol.26, pp.147-150.
- (8) Voller, V. R., 1987, "An Enthalpy Method for Convection Diffusion Phase Change," *Int. J. Numerical Method in Engineering*, Vol.24, pp.271-284.
- (9) Voller, V. R. and Prakash. C, 1987, "A Fixed Grid Numerical Modeling Methodology for Convection, diffusion Mushy Region Phase Change Problems," *Int. J. Heat mass transfer*, Vol. 30, pp.1709-1719.
- (10) 1997, ASHRAE Fundamentals HANDBOOK (SI), pp.6.3-6.12.
- (11) AbdulNour. B. S. and Foss, J. F., 1997, "Computational and Experimental Predictions of Automotive Windshield Flow," *FEDSM '97*, June 22-26.