

## 서리층 성장 예측을 위한 수치적 모델

### The numerical model for predicting frost layer growth

이 관 수\*, 지 성\*\*, 이 태 희\*\*\*  
 K. S. Lee, S. Jhee, T. H. Lee

**Key words :** Frost formation(착상), Frost layer growth(서리층 성장), Heat and mass transfer(열 및 물질전달), Inner temperature distribution(내부 온도 분포)

#### Abstract

In this study, a numerical model for analyzing frost formation phenomena on a cold flat plate has been developed. Both regions of air flow and frost layer have been coupled to calculate the amount of the heat and mass transfer between air flow and frost layer. Experiments have been also conducted to validate the numerical model. The present numerical results show a good agreement with the experimental data. The present numerical model also provides some useful data such as the temperature distribution inside the frost layer which could not be obtained through the experiments.

#### 기 호 설 명

|                                      |                              |
|--------------------------------------|------------------------------|
| $c_p$ : 정압비열[kJ/kg·K]                | $m_w$ : 수증기 질량 분율            |
| $D$ : 확산계수[m <sup>2</sup> /s]        | $p$ : 압력[Pa]                 |
| $H$ : 덕트 높이[m]                       | $Q$ : 열유속[W/m <sup>2</sup> ] |
| $h$ : 열전달 계수[W/m <sup>2</sup> ·K]    | $T$ : 온도[K]                  |
| $h_m$ : 물질전달계수[kg/m <sup>2</sup> ·s] | $t$ : 시간[s]                  |
| $k$ : 열전도 계수[W/m·K]                  | $u$ : x-방향 속도[m/s]           |
| $L$ : 냉각면의 유동방향길이[m]                 | $v$ : y-방향 속도[m/s]           |
| $Le$ : Lewis수, $\alpha/D$            | $W$ : 덕트 폭[m]                |
| $L_{II}$ : 승화 잠열[kJ/kg]              | $y_f$ : 서리 두께[m]             |
| $\dot{m}$ : 질량 유량[kg/s]              |                              |

#### 그리스 문자

|                                     |
|-------------------------------------|
| $\alpha$ : 열확산계수                    |
| $\alpha_f$ : 흡수계수[s <sup>-1</sup> ] |
| $\beta$ : 체팽창계수                     |
| $\Delta$ : 차이                       |

\* 정회원, 한양대학교 기계공학과  
 \*\* 한양대학교 대학원  
 \*\*\* 정회원, LG전자(주) 리빙시스템연구소

- $\mu$  : 점성계수[kg/m·s]
- $\rho$  : 밀도[kg/m<sup>3</sup>]
- $\omega$  : 절대 습도[kg/kg']

상 첨 자

- " : 유속(flux)

하 첨 자

- a : 공기층
- atm : 대기압
- eff : 유효치
- f : 서리
- fs : 서리 표면
- in : 입구(inlet)
- init : 초기(initial)
- lat : 잠열
- sat : 포화상태
- sen : 현열
- tot : 총합
- w : 냉각면
- y : 두께
- $\rho$  : 밀도
- $\omega$  : 수증기

1. 서 론

냉장고의 증발기등과 같은 저온 열교환기 표면에 형성되는 착상은 서리층에 의한 추가적인 열저항과 공기층의 압력손실을 유발하여 열교환기의 성능을 크게 감소시킨다. 따라서 이 문제를 해석하기 위한 많은 실험 및 이론적 연구가 진행되고 있다.

기존 연구자들의 실험결과<sup>(1),(2)</sup>에 의하면 서리층 성장 과정은 서리층 성장단계에 따라 서로 다른 특성을 나타내며, 또한 시간과 위치에 따라 서리의 표면 온도 및 물성치가 지속적으로 변화함을 보여 주고 있다. 따라서 서리층 성장 과정은 직접적으로 해석적인 해를 구하는 것이 불가능하며, 몇가지 가정을 도입함으로써 근사적인 예측이 가능하다.

서리층 성장 해석에 대한 기존 연구자들의 연구

동향을 살펴보면 다음의 세가지 부류로 나눌 수 있다. 첫번째는 실험에 의한 연구로서 다양한 실험조건에서 서리층의 두께를 측정후, 이 자료를 기초로 시간을 포함한 몇가지 변수들로 단순화하여 서리층 성장에 대한 실험관계식을 구성하였다<sup>(3),(4)</sup>. 두번째는 서리층 내부 해석으로서 확산 방정식을 이용하여 서리층의 성장을 예측하였고, 서리층 외부로부터의 열 및 물질전달량은 실험관계식을 이용하여 계산하였다<sup>(5)~(6)</sup>. 세번째는 서리층 외부 해석으로서 경계층 해석을 통하여 열 및 물질전달량을 계산하였고, 서리층 내부는 실험관계식을 이용하여 서리층 두께와 밀도를 계산하였다<sup>(9)~(11)</sup>.

위에 제시된 각 방법들은 서리층 내부 또는 외부 어느 한 방향에 대해서 실험관계식을 이용하고 있다. 그러므로, 각 실험조건에 따라 적합한 관계식을 사용하여야 하며, 이들 관계식에 대한 해의 의존성이 매우 크다.

따라서 본 연구에서는 서리층 성장에 대한 실험 관계식을 최대한 배제하고 서리층 외부에 대해서 경계층에 관한 편미분 지배 방정식, 그리고 서리층 내부에 대해서 수증기 확산에 대한 모델 방정식을 제시하여 수치해석을 수행한다. 초기 서리 밀도의 수치적 모델에 대한 영향을 조사하고, 이에 따라 열 및 물질 전달량을 계산한다. 또한 서리층 내부 해석 모델링에서 이용되는 열 및 물질전달 상사성의 관계에 대해서 조사한다.

2. 이론 해석

본 연구에서는 Fig.1에 나타낸 것과 같이 일정유속  $U_m$ 으로 유입되는 습공기가 빙점 이하의 온도  $T_w$ 로 유지되는 수평 평판의 표면과 접하면서 발생

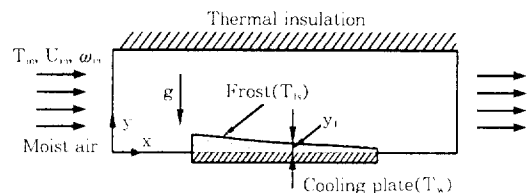


Fig.1 Schematic diagram on the flow of a moist air over a frost layer

하는 착상 현상을 해석하고자 한다. 서리층 성장 과정에 대한 계산을 위하여 해석 모델을 공기층 및 서리층으로 구성하여 서리층 성장 및 주위 유동으로부터의 열 및 물질전달에 대한 수치 해석을 한다.

### 2.1 지배 방정식

착상 현상에 대한 열 및 물질전달을 해석하기 위하여 다음과 같은 가정을 도입한다.

- (i) 모든 과정은 2차원 준정상상태(quasi-steady state)에서 일어난다.
- (ii) 유동은 비압축성 층류이며, 점성 소산은 무시할 수 있다.
- (iii) 부력항은 Boussinesq 근사를 만족한다.
- (iv) 어떠한 순간에 서리층 내부 밀도는 냉각면에 수직인 방향으로 일정하다.
- (v) 서리층 내부에서 수증기는 냉각면에 수직인 방향으로만 확산한다.

이와 같은 가정에 기초하여 공기층과 서리층에 대한 지배 방정식을 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

#### (I) 공기층

〈연속 방정식〉

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

〈운동량 방정식〉

$x$ -방향 운동량 방정식;

$$\rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

$y$ -방향 운동량 방정식;

$$\rho \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \rho g \beta (T - T_\infty) \quad (3)$$

〈에너지 방정식〉

$$\rho c_p \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_s \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_a \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (4)$$

〈수증기 질량 분율 방정식〉

$$\rho \left( u \frac{\partial m_w}{\partial x} + v \frac{\partial m_w}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho D \frac{\partial m_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho D \frac{\partial m_w}{\partial y} \right) \quad (5)$$

#### (II) 서리층

〈수증기 확산 방정식〉

검사체적 내부로 흡수되는 수증기의 양은 그 검사체적에서의 수증기 밀도에 비례한다고 가정하면 다음과 같다<sup>(5)</sup>.

$$D \frac{d^2 \rho_w}{dy^2} = \alpha_f \rho_w \quad (6)$$

〈에너지(열전달) 방정식〉

서리층 내부에서는 습공기 유동의 영향이 미미하므로, 현열 전달을 무시할 수 있다. 따라서 내부에서 일어나는 수증기의 상변화에 의한 잠열을 고려하면, 열전달 방정식은 다음과 같다.

$$k_f \frac{d^2 T}{dy^2} = -\alpha_f L_H \rho_w \quad (7)$$

### 2.2 경계조건

Fig.1의 좌표계에 대하여 각 지배 방정식과 관련된 경계조건은 다음과 같다.

#### (I) 입구 조건

유동장의 조건으로 다음과 같은 입구 유동 경계 조건을 사용한다.

$$u = U_\infty, v = 0, p = 0, m_w = m_{w,\infty}, T = T_\infty \quad (8)$$

#### (II) 출구 조건

본 해석에서 서리층 외부의 유동 조건은 입구에서 주어지므로, 출구에서의 유동 조건을 직접적으로 알 수 없다. 따라서 출구에서의 각 변수의 구배를 0으로 가정하는 출구 유동 경계조건을 사용한다. 즉,

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \frac{\partial p}{\partial x} = 0, \frac{\partial m_w}{\partial x} = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

#### (III) 서리표면 조건

서리층 표면에서는 점착 조건을 사용하고, 수증

기는 포화상태에 있다고 가정한다. 또한, 수증기 확산으로 인한 법선속도가 유동장에 미치는 영향은 무시할 수 있을 정도로 작다<sup>(9)</sup>. 따라서 서리표면 조건은

$$u=0, \quad v=0, \quad m_w = m_{w, fs}, \quad T = T_{fs} \quad (10)$$

(IV) 덕트 표면 조건

덕트 표면에서도 유동장에 대해서는 점착 조건을 사용하며, 덕트는 외부와 단열되었다고 가정한다.

$$u=0, \quad v=0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (11)$$

(V) 냉각면 조건

냉각면의 온도는  $T_u$ 로 유지되며, 수증기는 포화 상태에 있다고 가정한다. 또한, 냉각면으로의 물질 전달은 없으므로 냉각면에서의 수증기 밀도 구배는 0으로 한다.

$$m_w = m_{w, sat}(T_u), \quad \frac{dm_w}{dy} = 0, \quad T = T_u \quad (12)$$

2.3 물질전달 해석

공기측으로부터 흡수된 수증기의 양( $\dot{m}_f''$ ) 중의 일부는 다공성의 서리층 내부로 흡수되어 서리층의 밀도를 증가시키며, 그 나머지 부분( $\dot{m}_v''$ )은 서리층의 두께를 증가시키는데 이용된다.

2.3.1 총물질전달

Fig.2는 공기측으로부터 서리층 표면으로의 총 물질전달량을 계산하기 위하여 선정한 검사체적을 나타낸 것이다. 검사체적에 대하여 질량 보존 방정

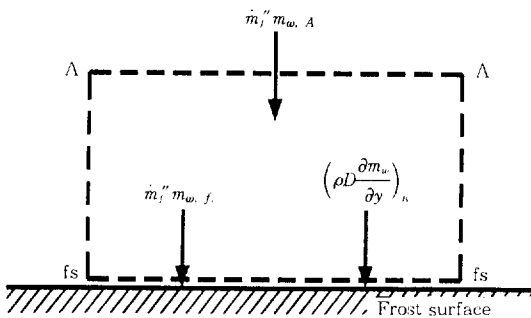


Fig.2 Control volume at the frost surface interface for the mass-diffusion equation

식을 전개하면 다음과 같다.

$$\dot{m}_f'' m_{w, fs} + \left( \rho D \frac{\partial m_w}{\partial y} \right)_{fs} - \dot{m}_v'' m_{w, A} = 0 \quad (13)$$

여기서, 면 A는 유동장에서 농도 및 온도의 구배가 없는 곳에 위치한다. 고려하고 있는 성분이 유일한 전달 물질인 경우  $m_{w, A}$ 는 1이므로 표면으로 흡수되는 수증기의 양은 식 (13)으로부터 다음과 같이 된다.

$$\dot{m}_f'' = \frac{\left( \rho D \frac{\partial m_w}{\partial y} \right)_{fs}}{1 - m_{w, fs}} \quad (14)$$

윗식에 나타난 서리층 표면에서의 수증기의 질량 분율( $m_{w, fs}$ )은 공기와 서리층의 경계에서 수증기가 포화상태에 있다는 가정으로부터 얻어진다.

$$\omega_{fs} = 0.62198 \frac{p_{w, sat}}{p_{atm} - p_{w, sat}} \quad (15)$$

$$m_{w, fs} = \frac{\omega_{fs}}{1 + \omega_{fs}} \quad (16)$$

2.3.2 서리층 밀도 및 두께

서리층 내부의 지배 방정식에 대해서 서리 표면 및 냉각면에 관한 경계조건을 대입하면 다음과 같이 서리층 내부 수증기 밀도 분포와 흡수계수에 대한 해석적인 해를 구할 수 있다.

$$\rho_w(y) = \rho_{w, sat}(T_u) \cosh \gamma y \quad (17)$$

$$\alpha_f = D \cdot \left[ \frac{1}{y_f} \cosh^{-1} \left\{ \frac{\rho_{w, sat}(T_{fs})}{\rho_{w, sat}(T_u)} \right\} \right]^2 \quad (18)$$

여기서,

$$\gamma = \sqrt{\frac{\alpha_f}{D}} \quad (19)$$

서리층 내부에 대한 수증기 밀도 분포와 흡수계수를 구하였으므로, 각 시간 구간에서 서리층의 밀도는 냉각면에 수직한 방향으로 일정하다는 가정에 의하여 서리층 밀도와 두께를 다음과 같은 방법으로 계산할 수 있다.

( I ) 서리층 밀도

서리층 내부로 흡수되어 서리층의 밀도를 증가시키는 수증기의 양은 다음과 같이 계산한다.

$$\dot{m}_\rho'' = D \frac{d\rho_w}{dy} \Big|_s = \int_{y=0}^{y=y_f} \alpha_f \rho_w dy \quad (20)$$

따라서 각 시간 구간에서의 서리층 밀도는 아래와 같이 얻어진다.

$$\rho_f |_{t+\Delta} = \rho_f |_t + \frac{\dot{m}_\rho''}{y_f} \Delta t \quad (21)$$

( II ) 서리층 두께

서리층 두께를 증가시키는 수증기 질량유속  $\dot{m}_v''$ 는 공기측으로부터 흡수한 총물질유속에서 서리층 밀도를 증가시키는 질량유속을 빼면 된다. 즉,

$$\dot{m}_v'' = \dot{m}_f'' - \dot{m}_\rho'' \quad (22)$$

따라서 각 시간 구간에 대해서 서리층의 두께를 구하면 다음과 같다.

$$y_f |_{t+\Delta} = y_f |_t + \frac{\dot{m}_v''}{\rho_f} \Delta t \quad (23)$$

2.4 열전달 해석

습공기가 서리 표면과 접하게 되면 공기와 서리 표면사이의 온·습도차로 인하여 열전달이 일어난다. 그리고 서리층 내부에서는 서리 표면과 냉각면의 온도 차이로 인하여 열전달이 발생한다.

( I ) 외부 열전달

공기와 서리층 표면사이의 총열유속은 현열전달과 잠열전달의 합으로 다음과 같다.

$$Q_{tot} = Q_{conv} + Q_{lat} \quad (24)$$

대류열전달에 의한 현열유속은 가정한 서리 표면 온도에 대한 열경계층 해석을 통해서 얻어진 표면 근방에서의 온도 구배를 Fourier의 법칙에 적용하여 표면으로의 열전달 계수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$h = \frac{Q_{conv}}{(T_s - T_\infty)} = \frac{-k_a \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_s}{(T_s - T_\infty)} \quad (25)$$

수증기의 잠열유속은 유동 해석에서 얻어진 표면으로의 총물질전달량과 수증기의 잠열에 의해 계산된다.

$$Q_{lat} = \dot{m}_f'' L_H \quad (26)$$

( II ) 내부 열전달

서리층 내부 에너지(열전달) 방정식을 해석하기 위해서는 내부에서의 열전도계수를 알아야 한다. 그러나 어떤 순간에 서리층 수직 방향으로의 열전도계수의 변화를 측정하는 것은 현실적으로 거의 불가능하다. 따라서 임의의 순간에 서리층 내부 밀도는 냉각면에 수직인 방향으로는 일정하며, 서리의 유효 열전도계수는 밀도만의 함수로 가정한다.

유효 열전도계수와 냉각면 및 서리 표면에 대한 온도 경계조건을 서리층에서의 에너지 방정식에 적용하면, 다음과 같이 서리층 내부 온도 분포를 구할 수 있다.

$$T(y) = T_w + \frac{(T_s - T_w)}{y_f} y + \frac{\alpha_f L_H \rho_w \text{sat}(T_w)}{k_{t,eff} \gamma^2} \left[ \frac{y}{y_f} (\cosh \gamma y_f - 1) - (\cosh \gamma y - 1) \right] \quad (27)$$

2.5 보조 관계식

서리층 외부로부터의 열전달과 서리층의 표면 온도를 계산하기 위해서 다음과 같은 보조관계식이 필요하다.

( I ) 서리층의 유효 열전도계수

서리층의 유효 열전도계수는 특히 서리밀도와 상관관계를 갖고 있으며, 여기서는 이관수 등<sup>(12)</sup>이 제안한 다음 식을 사용한다.

$$k_{t,eff} = 0.132 + 3.13 \cdot 10^{-4} \cdot \rho_f + 1.6 \cdot 10^{-7} \cdot \rho_f^2 \quad (28)$$

( II ) 포화 수증기압

서리층 경계에서의 수증기의 포화압력은 서리 표면 온도의 함수로 다음과 같이 표현할 수 있다<sup>(13)</sup>.

$$\log_e(P_{\omega, sat}) = C_1/T_{fs} + C_2 + C_3T_{fs} + C_4T_{fs}^2 + C_5T_{fs}^3 + C_6T_{fs}^4 + C_7\log_e(T_{fs}) \quad (29)$$

여기서

$$C_1 = -5674.5359,$$

$$C_2 = 6.3925247,$$

$$C_3 = -0.9677843 \times 10^{-2},$$

$$C_4 = 0.62215701 \times 10^{-6},$$

$$C_5 = 0.20747825 \times 10^{-6},$$

$$C_6 = -0.9484024 \times 10^{-12},$$

$$C_7 = 4.1635019$$

### (III) 수증기의 확산계수

서리층 내부로의 확산과정을 해석하기 위해서는 공기중에서의 수증기의 확산계수가 필요하다. 여기서는 참고문헌<sup>(13)</sup>의 자료를 사용하였다.

### 3. 수치해석 절차 및 방법

서로 연관된 서리층 외부 유동 및 내부 해석을 위하여 다음과 같은 순서에 의하여 수치 해석을 수행하였다.

- (i) 서리층의 표면 온도를 가정하고 이에따른 표면에서의 수증기 질량분율을 계산한다.
- (ii) 유동장 해석을 통하여 공기층의 온도, 속도 및 농도 분포를 계산한다.
- (iii) 서리 표면에서의 열 및 물질전달량을 계산한다.
- (iv) 서리층 외부의 열전달량과 서리층 내부로의 열전달량으로부터 새로운 서리 표면 온도를 계산한다.
- (v) 서리 표면 온도가 수렴할 때까지 과정 (ii)~(iv)를 반복한다.
- (vi) 표면 온도가 수렴하면 서리층 내부 모델링을 통하여 계산 시간에서의 서리층의 두께 및 밀도를 계산한다.
- (vii) 해석하고자 하는 시간대에 도달할 때까지 과정 (i)~(iv)을 반복하여 계산한다.

해석을 위하여 공기층에 대한 각각의 지배 방정식은 Patankar에 의하여 제시된 유한 체적법에 근거한 검사 체적법을 이용하여 이산화되며, 온도

와 압력에 대한 검사 체적은 속도와 엇갈려져 나타난다. 이산화방정식은 선순법과 SIMPLER 알고리즘을 사용하여 반복적으로 계산하였다.

격자는  $46 \times 36$  비균일 격자를 사용하였고, 서리 표면 주위에 격자를 밀집시켰다. 시간 간격의 영향을 고려하기 위하여, 6, 10, 12, 30, 60초의 간격에 대하여 계산을 수행하였으며, 시간 간격 10초 이하의 계산 결과에서는 큰 차이가 없었다. 따라서 이후에 기술되는 내용들은 시간 간격 10초에서 계산결과를 사용하기로 한다. 서리층 열전달 관계식을 통하여 계산한 서리 표면 온도의 상대변화가 0.0005% 내에 들 때 수렴한 것으로 간주하였다.

### 4. 실험

본 연구에서 제시된 해석 모델을 검증하고 해석 결과의 정확도를 비교할 자료를 얻기 위하여 참고문헌(12)와 같은 실험장치를 이용하여 실험을 수행하였다. 실험장치는 서리층 성장을 관찰하는 시험부, 공기를 순환시키는 순환부, 습공기의 온·습도를 조절하는 항온항습실, 그리고 냉각면의 온도를 조절하는 냉각부로 구성되어 있다.

서리층의 두께는 시험부 앞면의 아크릴 판에 micrometer의 탐침이 들어갈 수 있는 구멍을 뚫어 측정하였고, 밀도는 착상면 표면에 두께  $50 \mu\text{m}$ , 너비  $0.01\text{m}$ 의 알루미늄 테이프를 부착하여 그 위에 축적된 서리의 질량을 정밀 저울로 측정하였다. 서리층의 표면 온도는 아크릴 판에 뚫려 있는 구멍에 적외선 복사 온도계를 삽입하여 각 위치에서의 서리층의 표면 온도를 측정하였다.

### 5. 결과 및 고찰

본 연구에서 제시된 수치적 모델에 대한 초기 서리 밀도의 영향을 검토하였다. 수치해석을 통하여 열 및 물질전달에 대한 계산 결과를 실험결과와 비교하였고, 계산 결과를 이용하여 열 및 물질전달의 상관관계에 대해서 조사하였다.

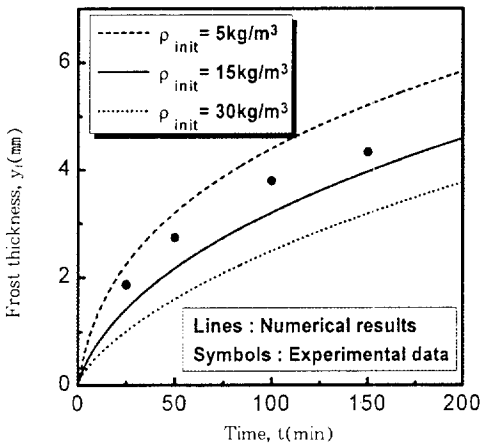
#### 5.1 수치적 모델에 대한 초기 서리 밀도의 영향

서리층 성장 예측을 위하여 무착상 상태에서부터

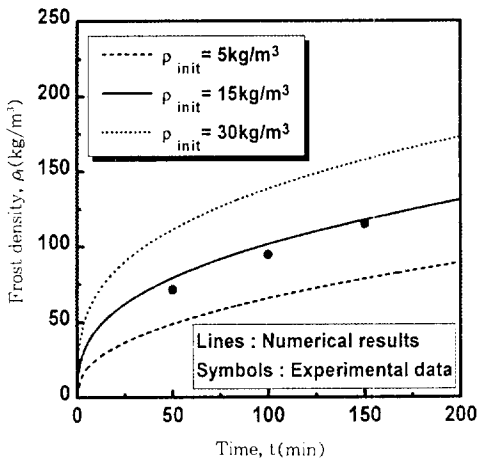
수치 모델의 계산을 진행하면 수치적으로 불연속이 발생하기 때문에 착상과 관련된 현재까지의 모든 수치 모델은 서리층의 밀도와 두께에 대해서 초기 값을 반드시 필요로 하고 있다. Parker등<sup>(5)</sup>은 초기 계산 밀도를 8~48kg/m<sup>3</sup>로 변화시켜 계산을 수행한 결과 서리 두께는 큰 변화가 없으므로 서리의 두께와 밀도에 대해서 충분히 작은 값을 계산의 초기값으로 사용할 수 있다고 주장하였다. 그러나 그의 모델은 초기 서리 밀도의 변화에 따라 서리의

밀도에 있어서 큰 오차를 수반하게 된다. 또한 Parker등의 모델이 서리층 두께에 대해서 그들의 실험결과와 30~40%의 오차를 보이는 데에 반해서 본 연구에서 제시한 모델은 16kg/m<sup>3</sup>의 초기값을 적용하여 계산한 결과 약 10%의 오차를 보이며 잘 일치하였다.

Fig.3은 본 연구에서 수행한 수치 모델의 초기 서리 밀도의 영향을 나타낸 것이다. Fig.3(a)는 시간에 따른 서리층 두께의 변화를 나타낸 것이며,



(a)



(b)

Fig.3 Effect of initial frost density(experimental conditions :  $T_a=8^{\circ}\text{C}$ ,  $u_{in}=3.9\text{m/s}$ ,  $Rh_{a,in}=70\%$ ,  $T_w=-15^{\circ}\text{C}$ )

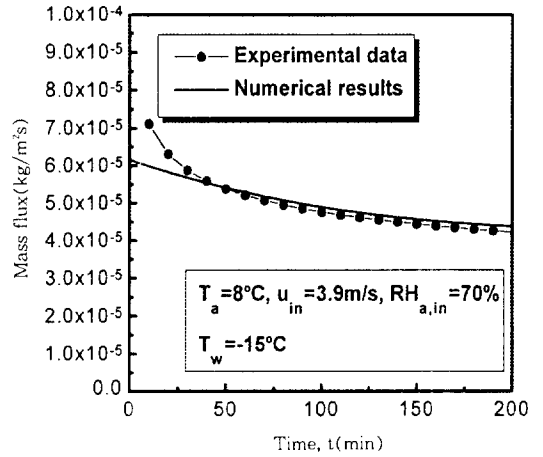


Fig.4 The temporal variation of mass flux

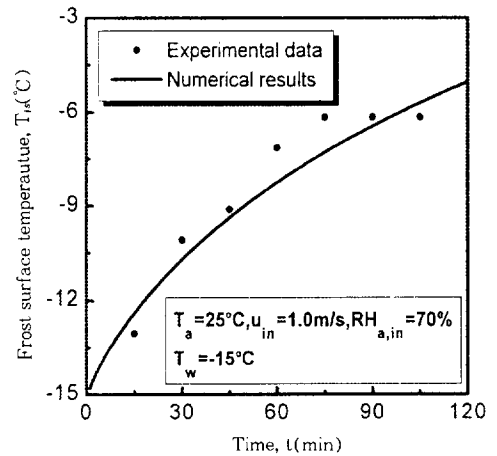


Fig.5 Comparison of numerical results and experimental data on the frost surface temperature

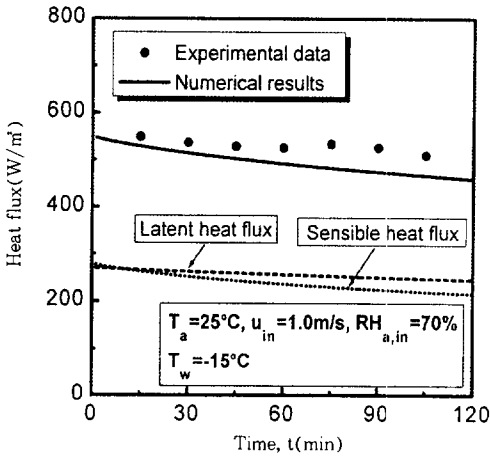


Fig.6 The temporal variation of heat flux

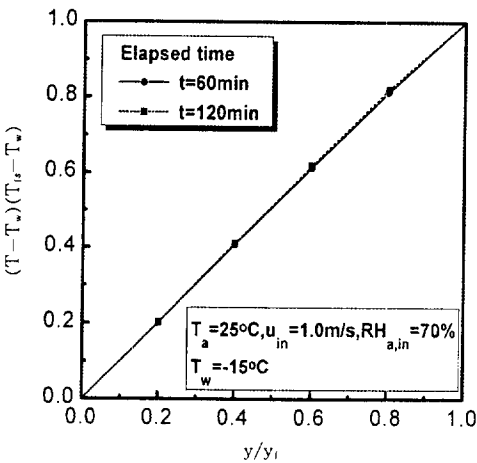


Fig.7 Dimensionless temperature distribution inside the frost layer

(b)는 시간에 따른 서리층 밀도의 변화를 도시한 것이다. 수치 모델에서 초기 서리 밀도를 크게 하면 실험결과와 비교하여 서리층의 밀도는 과다하게 계산되고 서리층의 두께는 작게 예측되었다. 초기 밀도 15~30kg/m<sup>3</sup>의 범위에서 전체 착상량은 약 15% 정도의 차이를 보였다. 특히 15kg/m<sup>3</sup>의 초기 밀도를 사용한 경우 전체 착상량에 있어서 6% 이내에서 잘 일치하고 있으며, 서리 두께와 밀도 모두가 실험결과와 15% 이내의 차이만을 나타내었다.

비교적 높은 밀도의 서리가 성장하는 Fig.5~ Fig.7에 대해서는 45kg/m<sup>3</sup>의 초기 밀도를 사용하여 계산을 수행하였으며, 이 경우 전체 착상량은 비교적 잘 일치하지만 서리 두께는 크고 밀도는 작게 예측하는 경향을 보이고 있다. 따라서 수치적 모델의 정확성을 높이기 위해서는 계산 조건에 알맞은 초기 서리 밀도의 선택이 필요하다. 높은 밀도가 성장하는 착상 조건에서 상대적으로 큰 오차를 보이는 것은 현 모델이 서리층 내부의 서리 밀도가 어떤 순간에 냉각면에 수직인 방향으로는 일정하다고 가정하였기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다.

### 5.2 착상률

Fig.4는 시간에 따른 착상율의 변화를 나타낸 것이다. 착상 초기 약 20분까지는 실험치와 비교적인 차이를 보이지만, 그 이후는 약 5% 정도의 오차를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 이는 수치적 모델이 계산 초기에 어느 정도의 서리 밀도치와 두께치를 갖고 계산을 시작하기 때문에 그에 따른 오차가 나타나는 것으로 판단된다. 서리 두께가 얇은 착상 초기에는 서리 표면 수직 방향으로 온도차가 큰 열경계층이 형성되고, 상대적으로 큰 값의 수증기 밀도 구배가 존재하므로 이에따른 착상 추진력이 커져 착상율이 크게 나타난다. 따라서 서리 밀도와 두께의 증가율도 크게 나타나 시간이 경과하면서 서리 표면 온도가 상승하게 되고, 표면에서의 수증기 밀도 구배가 줄어들면서 착상율이 점차 감소하여 일정해지고 있다. 이에따라 서리층의 밀도와 두께의 증가율은 감소하게 된다.

### 5.3 서리층 열전달

Fig.5에는 시간 경과에 따른 서리 표면 온도의 변화를 나타낸 것이다. 착상 초기에는 서리층 생성에 의한 열저항의 증가로 표면 온도가 급격히 증가하지만, 시간이 경과할수록 서리층의 밀도가 증가하여 큰 값의 열전도계수를 나타내어 표면 온도의 증가폭이 점차 감소하게 되고 이에따라 표면 온도가 일정한 온도로 접근해가게 된다.

Fig.6은 시간에 따른 열유속의 변화를 나타낸 것이다. 현열전달은 초기에는 비교적 큰 폭으로 감소



하지만 시간이 경과함에 따라 서서히 그 폭이 줄어 든다. 그러나 물질전달에 의한 잠열전달은 현열전달에 비하여 착상 초기부터 완만히 감소한다. 따라서 유동장과 서리 표면 사이의 전체 열유속은 지속적으로 감소한다. 착상 초기에 현열전달이 큰 폭으로 감소하는 이유는 낮은 밀도의 서리층이 성장하여 서리 표면 온도가 상대적으로 빠르게 상승하기 때문이다. 그러나 시간이 경과함에 따라 서리층의 밀도가 커지게 되고 서리층 두께의 증가율이 둔화됨에 따라 서리 표면 온도가 완만히 상승하게 되어 열전달량의 감소폭은 점차 줄어들게 된다.

Fig.7은 서리층 내부에서의 무차원 온도 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 각각의 무차원 위치에서 계산된 내부 무차원 온도 분포는 시간에 관계없이 거의 선형적인 분포를 보이고 있다. 이는 서리층 내부에서 잠열에 의한 영향이 전도에 의한 영향보다 작기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 실제 내부의 온도 분포에 있어서는 서리층 수직 방향으로의 밀도 변화에 의해서 열전도 계수가 변화하므로 그림에서 나타난 것보다는 약간 더 변형된 온도 분포를 갖을 것으로 예상된다.

5.4 열 및 물질전달의 상사성

착상 과정중 공기와 서리 표면 사이에서 일어나는 열 및 물질전달은 다음과 같이 서로 상사성을 갖는다.

$$\frac{h}{h_M} = \rho_c \left( \frac{\alpha}{D} \right)^{(1-n)} = \rho_c Le^{(1-n)} \quad (30)$$

기존의 많은 연구자들<sup>(3), (6), (9), (11)</sup>은  $Le$ 수가 1이라는 가정을 도입하여 물질전달 계수를 계산하였다. 그러나 실제에 있어서  $Le$ 수는 약 0.87 정도이며, 매끄러운 평판에 대해서 해석적으로  $n=0.33$ 의 값을 갖는다. 따라서 기존 연구자들은 해석의 편의를 위해 서리 표면에 대해서  $Le^{1-n}$ 이 1이라고 가정하였다.

위의 가정을 검사하기 위하여 시간에 다른 열전달계수 및 물질전달계수의 변화를 계산한 결과  $Le^{1-n}$ 은 0.88~0.93의 값을 나타내어 1로 가정한 기존의 연구와는 차이를 나타내고 있다. 따라서 이러한 차이는 기존의 해석 모델이 본 연구에서 제시된

모델보다 큰 오차를 유발하게 되는 원인 중의 하나인 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 서리층 내·외부 해석을 동시에 고려하여 착상현상을 예측하는 모델을 제시하였으며, 실험결과를 통하여 이 해석방법을 검증하였다. 수치적 모델에 대한 초기 서리 밀도의 영향을 조사한 결과, 계산 조건에 적절한 초기값을 사용할 경우 모델의 정확도를 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서 제시한 모델은 전체적으로 실험결과와 약 15% 이내의 오차만을 나타내며 서리층 성장을 비교적 잘 예측하고 있다. 제시된 수치적 모델을 개선하기 위해서는 서리층 수직 방향으로의 밀도 분포와 열전도 계수 분포에 대한 연구가 선행되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 열 및 물질전달의 현상을 단순화하기 위하여 기존의 모델과 같이  $Le^{1-n}$ 값을 1로 가정한 것은 바람직하지 않다.

후 기

이 연구는 1995년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 : ME95-F-11)에 의하여 연구되었으며, “착상 모델링을 위한 실험적 연구”의 일부임을 밝힌다.

참 고 문 헌

1. Hayashi, Y., Aoki, a., Adachi, S., and Hori, K., 1977, “Study of Frost Properties Correlating With Frost Formation Types”, *J.Heat Transfer*, Vol. 99, pp. 239~245.
2. Aoki, K., Hattori, M., and Hayashi, K., 1979, “Frost Formation On A Cylinder Surface Under Forced Convection”, *15th International Congress of Refrigeration Proceedings* Vol. II, pp. 389~394.
3. Schneider, H. W., 1978, “Equation of the Growth Rate of frost Forming on Cooled Surfaces”, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 21, pp. 1019~1024.

4. O'Neal, D. L., 1982, "The Effect of Frost Formation on the Performance of a Parallel Plate Heat Exchanger", Ph. D. Thesis, Purdue University.
5. Jones, B. W. and Parker, J. D., 1975, "Frost Formation With Varying environmental Parameters", *J. Heat Transfer*, Vol. 97, pp. 255~259.
6. Sami, S. M., and Duong, T., 1989, "Mass and Heat Transfer during Frost Growth", *ASHRAE Trans.*, Vol. 95, Part. 1, No. 3218, pp. 158~165.
7. Sahin, A. Z., 1991, "Density of Frost Layer During The Crystal Growth Period", *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 16, No. 4A, pp. 485~493.
8. 이관수, 이태희, 허정희, 1996, "착상 거동예측을 위한 이론적 모델", 대한기계학회논문집 제20권 제3호, pp. 1096~1105.
9. Parish, H. C., and Sepsy, C. F., 1972, "A Numerical Analysis of Frost Formation Under Forced Convection" *ASHRAE Trans.*, No. 2331, pp. 236~251.
10. Sherif, S. A., Abdel-Wahed, R. M., and Hifni M. A., 1988, "A Mathematical Model For The Heat And Mass Transfer On A Flat Plate Under Frosting Conditions", *ASME Proceedings of the 1988 National Heat Transfer Conference*, HTD-Vol. 96, Vol. 3, pp. 301~306.
11. Sherif, R., and Padki, C. 1990, "A Semi-Empirical Transient Method for Modeling Frost Formation on a Flat Plate", *ASME, Heat Transfer Division*, Vol. 139, pp. 15~23.
12. 이관수, 이태희, 김우승, 1994, "착상조건하에 평형평판 열교환기의 열 및 물질전달", 공기조화·냉동공학회논문집 제6권 제2호, pp. 155~165.
13. *ASHRAE HANDBOOK*, 1993, Fundamentals. ASHRAE Atlanta.