

착상 거동 해석을 위한 수치적 모델

이 관 수^{*}, 양 동 근^{*}, 지 성^{*}
 한양대학교 기계공학부, *한양대학교 대학원

Numerical Model for the Analysis of Frosting Behavior

Kwan-Soo Lee^{*}, Dong-Keun Yang^{*}, Sung Jhee^{*}

School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

^{*}Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received February 7, 2002; revision received February 25, 2002)

ABSTRACT: The integral boundary layer equation for the air side and the diffusion equation for the frost layer are numerically analyzed in order to predict the behavior of frost layer growth. The thickness and density of the frost layer obtained from the present study agree well with those of previous numerical results and experimental data with a maximum error of 13%. The characteristics of heat and mass transfer within the frost layer and the frost layer growth along the flow direction are investigated by performing numerical analysis. The effects of operating conditions on the frost layer growth are also examined.

Key words: Frost formation(착상), Integral boundary layer equation(적분형 경계층방정식), Heat and mass transfer(열 및 물질전달)

———— 기 호 설 명 ————

c_p : 정압비열 [kJ/kg · K]
 D : 확산계수 [m²/s]
 h_h : 열전달계수 [W/m²K]
 h_m : 물질전달계수 [kg/m² · s]
 h_{sv} : 승화 잠열 [kJ/kg]
 k : 열전도계수 [W/m · K]
 Le : Lewis 수, α/D
 m'' : 물질전달유속 [kg/m² · s]
 Pr : Prandtl 수, ν/α
 q'' : 열유속 [W/m²]
 Re : Reynolds 수, $u_{in}D_h/\nu$

T : 온도 [K]
 t : 시간 [min]
 u : 속도 [m/s]
 x : 유동 방향 거리 [m]
 y_f : 서리 두께 [mm]

그리스 문자

α_f : 흡수계수 [s⁻¹]
 δ : 속도경계층 두께 [m]
 δ_t : 열경계층 두께 [m]
 ρ : 밀도 [kg/m³]
 ω : 절대 습도 [kg/kg']

† Corresponding author

Tel.: +82-2-2290-0426; Fax: +82-2-2295-9021

E-mail address: ksleehy@hanyang.ac.kr

하첨자

a : 공기층

eff : 유효치
 f : 서리층
 fs : 서리층 표면
 in : 입구
 out : 출구
 lat : 잠열
 p : 냉각면
 sat : 포화상태
 sen : 현열
 tot : 총합
 w : 수증기
 ρ : 수증기 밀도

1. 서론

빙점 온도 이하로 유지되는 냉각면에 형성되는 착상은 저온용 열교환기나 냉동·공조기기 등의 많은 산업 분야에서 발생한다. 착상에 의한 다공성 서리층은 열저항 및 유동저항으로 작용하여 기기의 진열 성능을 저하시킨다. 따라서 착상 조건에서 운전되는 열교환기의 효율적인 설계와 사용을 위해 다양한 운전 조건에 대한 서리층의 성장 거동 해석이 필요하다.

착상과 관련된 기존 연구들을 살펴보면 크게 실험적 연구와 수치적 연구로 나누어진다. 먼저 실험적인 연구에서 Hosoda et al.⁽¹⁾과 Hayashi et al.⁽²⁾은 일정한 실험 조건에서 수행된 실험값을 이용하여 서리 밀도와 열전달계수 등에 관한 상관식을 유도하였다. 그러나 상관식은 실험 조건을 벗어나면 만족스럽지 못하고 서리층 성장에 대한 열 및 물질전달 특성을 파악하기 어렵다.

수치해석과 관련된 연구들은 공기층과 서리층 내부의 해석 방법의 차이에 따라 두 가지로 나누어진다. 공기층은 실험 상관식을 이용하고 서리층 내부는 확산방정식을 해석하는 방법⁽³⁻⁵⁾과 공기층은 경계층방정식을 해석하고 서리층 내부 계산은 실험 상관식을 이용하는 방법⁽⁶⁻⁷⁾이 있다. 이때, 경계층방정식은 미분형과 적분형 경계층방정식으로 나누어지는데 미분형 경계층방정식은 적분형 경계층방정식과 달리 과도한 해석시간이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 공기층은 적분형 경계층방정식을 해석하여 서리층으로 열 및 물질전달량

을 계산하고, 서리층 내부는 해석의 정확성을 지닌 확산방정식을 해석한다. 이를 통해 기존 모델 및 실험 결과와 비교하여 수치모델을 검증하고, 서리층 성장과 열 및 물질전달 특성에 미치는 운전 조건의 영향을 예측한다.

2. 이론해석

본 연구에서는 수평 평판의 냉각면에 형성되는 서리층에 대한 열 및 물질전달 해석을 통해 서리 두께와 서리 밀도에 대한 운전인자의 영향을 예측하고자 한다. 서리층 성장과정은 일반적으로 Fig. 1과 같이 공기층과 서리층 내부를 열 및 물질전달 평형관계를 고려하여 각각 해석한다. 공기층에 대해서는 적분형 경계층방정식을 이용하여 유동장과 온도장을 해석하고 서리층 내부에 대해서는 수증기 확산방정식을 해석한다.

수평 평판에서의 열 및 물질전달을 해석하기 위해 다음과 같이 가정한다.

- (1) 서리층 형성과정은 준정상상태(quasi-steady state)이며, 공기의 흐름은 층류이다.
- (2) 서리층 표면으로부터 냉각면으로의 열전달은 순수한 1차원 열전도이다.
- (3) 서리층의 내부 밀도는 냉각면에 수직한 방향으로 일정하다.
- (4) 서리층 내부에서의 수증기는 냉각면의 수직한 방향으로만 확산된다.
- (5) 서리층 표면에서의 열 및 물질전달은 서로 상사성이 성립한다.

2.1 공기층 해석

습공기가 냉각된 수평 평판에 노출될 때, 냉각면과 공기 사이의 온도 구배로 인해 열교환이 일

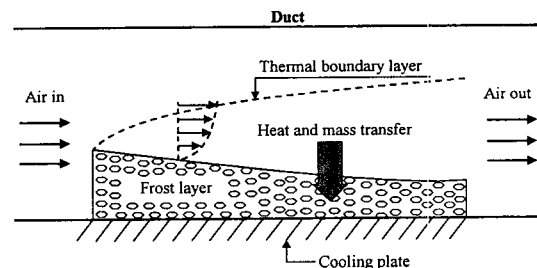


Fig. 1 Physical model for the analysis of frost layer growth.

어난다. 따라서 본 연구에서는 온도 구배가 존재하는 열경계층 영역에서 실질적인 열전달이 일어난다고 판단하여 공기층의 해석 영역을 열경계층으로 한정한다. 수평 평판 위를 흐르는 공기의 속도와 온도 분포는 다음과 같다.⁽⁸⁾

$$u = u_m \left[\frac{3}{2} \frac{y}{\delta} - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{\delta} \right)^3 \right] \quad (1)$$

$$T = T_p + (T_a - T_p) \left[\frac{3}{2} \frac{y}{\delta_t} - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{\delta_t} \right)^3 \right] \quad (2)$$

여기서 속도경계층(δ)과 열경계층의 두께(δ_t)는 다음과 같다.

$$\delta = \frac{5x}{\text{Re}_x^{1/2}} \quad (3)$$

$$\delta_t = \frac{5x}{1.026} \text{Re}_x^{-1/2} \text{Pr}^{-1/3} \quad (4)$$

이때 공기층으로부터 서리층으로의 열전달은 온·습도차로 인해 발생하는 현열과 잠열 전달을 고려하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} q_{tot}'' &= q_{sen}'' + q_{lat}'' \\ &= h_h(T_a - T_{fs}) + h_m h_{sv}(w_a - w_{fs}) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 열전달계수(h_h)는 다음과 같이 구해지며,

$$h_h = \frac{-k(\partial T/\partial y)_{fs}}{T_{fs} - T_a} \quad (6)$$

물질전달계수(h_m)는 열전달과 물질전달의 상사성을 고려하면 다음과 같다.

$$h_m = \frac{h_h}{\rho c_p \text{Le}^{2/3}} \quad (7)$$

2.2 서리층 내부 해석

서리층 내부에서는 열 및 물질전달을 예측하기 위해 수증기 확산방정식과 에너지방정식으로 나누어 해석한다. 먼저, 서리층 내부로 흡수되는 수

증기는 수증기 밀도에 비례한다고 가정하면 서리층 내부의 수증기 확산방정식은 다음과 같다.⁽⁵⁾

$$D \frac{d^2 \rho_w}{dy^2} = \alpha_f \rho_w \quad (8)$$

냉각면과 서리층 표면에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$y = 0 : \rho_w = \rho_{w,sat}(T_p), \quad \frac{d\rho_w}{dy} = 0 \quad (9)$$

$$y = y_f : \rho_w = \rho_{w,sat}(T_{fs}) \quad (10)$$

서리층 내부에서의 상변화를 고려하면 열전달에 대한 방정식은 다음과 같다.

$$k_{f,eff} \frac{d^2 T}{dy^2} = -\alpha_f h_{sv} \rho_w \quad (11)$$

냉각면과 서리층 표면에 대한 경계조건은 다음과 같다.

$$y = 0 : T = T_p \quad (12)$$

$$y = y_f : k_{f,eff} \frac{dT}{dy} = q_{tot}'' - \dot{m}_{\rho}'' h_{sv} \quad (13)$$

여기서 서리의 유효 열전도계수는 이관수 등⁽⁹⁾이 제안한 다음 식을 이용한다.

$$\begin{aligned} k_{f,eff} &= 0.132 + 3.13 \times 10^{-4} \rho_f \\ &\quad + 1.6 \times 10^{-7} \rho_f^2 \end{aligned} \quad (14)$$

\dot{m}_{ρ}'' 는 서리층 내로 흡수되는 서리층의 밀도를 증가시키는 수증기의 질량유속이며 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{m}_{\rho}'' = D \frac{d\rho_w}{dy} \Big|_{fs} = \int_{y=0}^{y=y_f} \alpha_f \rho_w dy \quad (15)$$

3. 수치해석

본 연구에서는 수치해석을 위해 유동 방향으로

는 일정한 격자를 생성하고 서리층 성장 방향으로는 열경계층까지를 해석 영역으로 설정한다. 수치해석 결과의 격자와 시간 간격에 대한 의존성을 조사하기 위해 유동 방향으로 10, 20, 40개의 격자계를 생성하여 30, 60, 120초 간격으로 나누어 수치해석하였다. 이때 각 격자계와 시간 간격에서 서리 밀도와 두께의 오차가 2% 이내이므로 20개의 격자와 60초의 시간 간격으로 수치해석을 수행하였다. 공기층과 서리층 내부 해석을 통해서 열 및 물질전달 평형 관계를 만족시킬 때까지 서리 표면 온도를 반복 계산한다. 서리 표면 온도의 상대오차가 0.0005% 이내이면 수렴된 것으로 판단하고 임의의 시간에서 서리 밀도와 두께를 계산한다.

4. 실험

본 연구에서 사용된 실험 장치는 공기를 순환시키는 순환부, 순환되는 습공기의 온·습도를 조절하는 항온 항습실, 냉각면 온도를 조절하는 냉각부, 착상 현상을 관찰하는 시험부(길이 30 cm, 너비 15 cm, 높이 15 cm)로 구성되어 있으며, 각 부분은 독립적으로 제어할 수 있다.⁽¹⁰⁾

실험에 앞서 시험부 내의 수평 평판의 표면을 깨끗이 닦고, 길이 15 cm, 너비 4.95 cm의 서리 무게 측정용 알루미늄 테잎을 부착한다. 냉각면의 표면 온도가 설정 온도에 도달하기 전에 착상되는 것을 방지하기 위해 평판의 표면을 비닐랩(vinyl wrap)으로 완전히 감싸고, 관측창을 제외

한 시험부의 모든 부분에 단열재를 부착한다. 시험부에 대한 준비가 완료되면 냉동기, 냉매 순환용 펌프, 항온항습실을 작동시켜 냉각면의 온도와 공기의 온·습도를 제어하고, 순환부 내의 송풍기를 가동하여 시험부 입구 공기 유속을 조절한다. 시험부 입구 공기의 온·습도 조건과 수평 평판의 표면 온도가 설정한 조건에서 정상상태에 이르면 냉각면의 비닐랩을 제거하고, 착상 실험을 시작한다. 15, 30, 60, 90, 120, 150분에서 서리층 두께는 디지털 마이크로미터를 사용하여 측정하고, 알루미늄 테잎을 서리가 떨어지지 않게 떼어낸 후 정밀 전자 저울(chemical balance)을 사용하여 무게를 측정한다. 서리층 두께와 무게로부터 서리 밀도를 계산한다.

5. 결과 및 고찰

본 연구에서 제시한 수치적 모델의 비교·검증을 위해 Jones and Parker⁽³⁾의 실험 조건에 대한 기존 연구자의 수치해석 결과와 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. Jones and Parker의 모델은 저습과 고습의 조건 모두에서 서리 두께를 과소 예측하였다. 그리고 Sherif et al.⁽⁷⁾과 Lee et al.⁽⁵⁾의 결과는 고습 조건으로 변화할 때 습도 변화에 의한 서리층 성장률의 변화를 예측하지 못하며 Sami and Duong⁽⁴⁾의 모델도 역시 본 연구에서 사용한 수치 모델보다 결과의 정확성이 떨어졌다. 전체적으로 서리 두께의 예측에 있어서 기존 연구자의 모델이 실험결과와 15~30%의 오차를 보이는

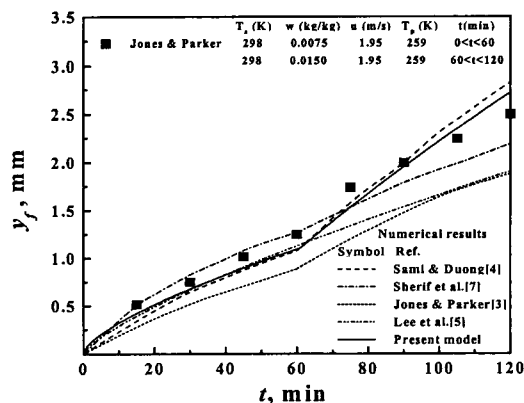


Fig. 2 Comparison of the frost layer thickness for various numerical models.

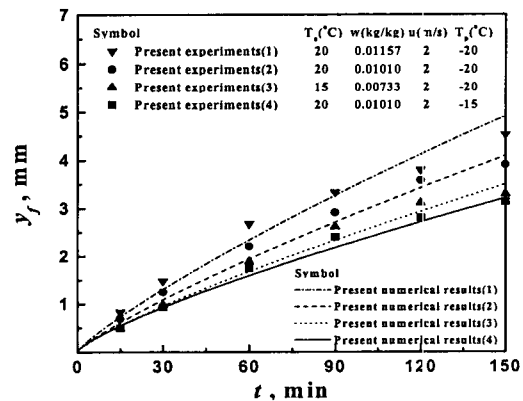


Fig. 3 Comparison of the present numerical results with present experimental data on the frost layer thickness.

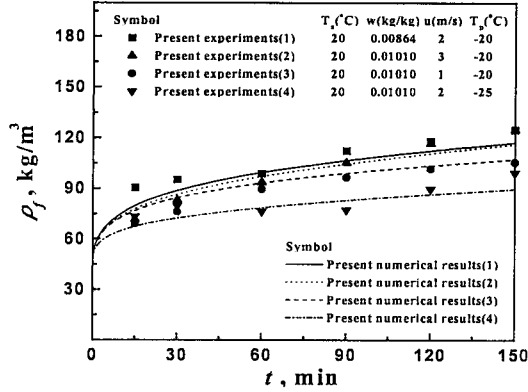


Fig. 4 Comparison of the present numerical results with present experimental data on the frost layer density.

데 비해, 본 연구의 모델은 최대 12%의 오차 이내에서 예측하였다.

Fig. 3과 Fig. 4에는 본 연구에서 사용한 수치 모델의 결과 중에 일부를 실험 결과와 비교하여 도시하였다. 기존 해석 모델들은 서리층 밀도를 거의 예측하지 못하였지만 현 수치 모델은 서리 두께와 밀도를 실험값과 13%의 오차 이내에서 예측하였다. Fig. 3에서 보면 공기 절대 습도가 증가하거나 냉각면 온도가 감소하는 경우 모두 서리 두께가 증가한다. 이는 두 조건의 변화에 따라 서리층 표면에서 습도차가 증가하여 서리층의 성장이 촉진되기 때문이다. Fig. 4의 결과에서는 공기 속도의 증가에 따라 서리층 내부로 전달되는 수증기의 양이 증가하여 서리 밀도의 성장

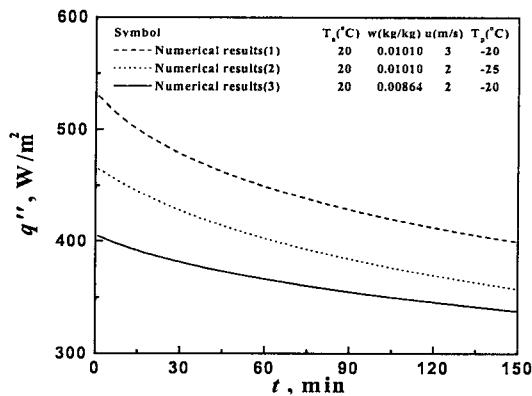


Fig. 5 Temporal variation of heat flux with various conditions.

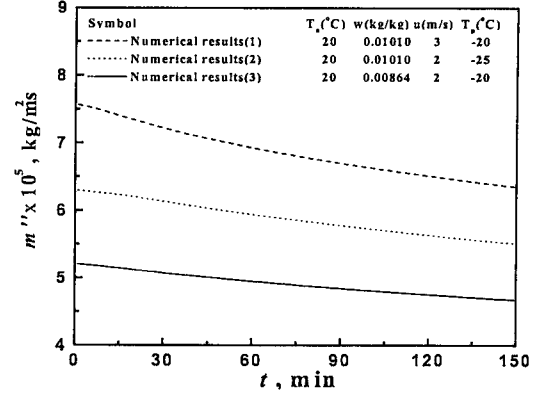


Fig. 6 Temporal variation of mass flux with various conditions.

을 촉진시키는 것을 알 수 있다. 또한 냉각면 온도가 낮아지면 공기와 서리층 표면에서 온·습도 차의 증가로 인해 서리층이 급격히 성장하기 때문에 상대적으로 조밀하지 못한 서리층이 형성된다.

서리층의 성장은 서리층 내부의 열 및 물질전달 특성과 깊은 관련이 있다. Fig. 5는 서리층 성장시 시간에 따른 열유속의 변화를 도시한 것으로 운전 시간이 경과함에 따라 열유속이 감소한다. 이는 서리층 성장에 따른 서리 표면 온도의 상승으로 인해 현열전달이 계속해서 감소하기 때문이다. 또한 운전 조건의 변화에 따라 열유속이 큰 조건에서는 서리층 성장이 급격히 이루어지고 이에 따라 열저항의 증가로 인해 열유속이 빠르게 감소한다. 운전 조건과 시간에 따른 물질전달

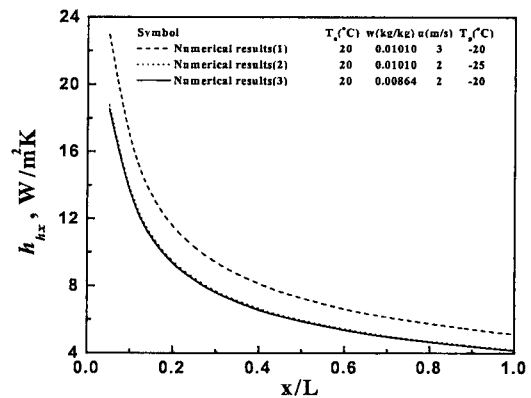


Fig. 7 Variation of heat transfer coefficients along the distance from the inlet at $t=150$ min.

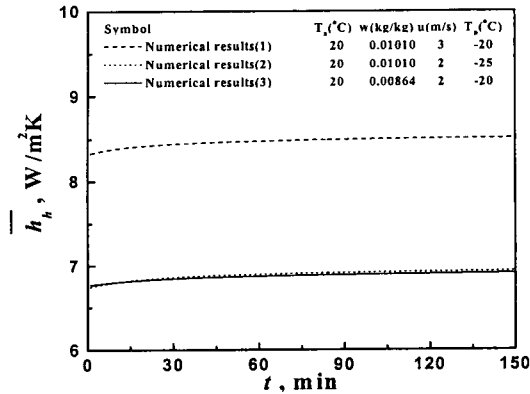


Fig. 8 Temporal variation of average heat transfer coefficients with various conditions.

의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 서리층 성장시 물질전달의 변화도 열전달과 비슷한 경향을 갖고 있으나 열전달과 달리 그 변화율은 크지 않다. 이는 저온의 서리층 표면에서 온도 상승으로 인한 포화습도의 변화량이 작아서 습도차가 거의 일정하기 때문이다.

Fig. 7은 운전 시간 150분에서 유동 방향에 따른 열전달계수의 변화를 도시한 것이다. 열전달계수는 평판의 입구에서 출구로 갈수록 감소한다. 이는 평판의 입구로부터 멀어질수록 온도 구배가 감소하고, 물질전달도 열전달과 유사성으로부터 거의 같은 경향을 가지며 이에 따라 서리층의 성장 속도는 감소한다. 평균 열전달계수는 Fig. 8에 나타난 바와 같이 서리층 성장에 따라 공기 속도가 빨라지므로 미소하게 증가하지만 Fig. 5에서 보듯이 열유속은 서리층 성장에 따라 감소한다. 이는 평균 열전달계수의 증가에 불구하고 서리 표면 온도의 상승으로 인해 공기와의 온도차가 감소하여 전체적으로 열전달은 줄어들기 때문이다.

Table 1 Effect of operating factors on the frost layer growth

Factors	Thickness(y_f)	Density(ρ_f)
T_a	↑	↘
w	↑	↘
u	↑	↑
T_b	↑	↑

(↑: increase, ↓: decrease, ↘: slight decrease)

본 연구에서 제시한 수치모델을 사용하여 수평 평판의 냉각면에 형성되는 서리층의 성장 거동에 미치는 운전 인자의 영향을 파악하고자 기준 조건에 대해 서리 두께와 밀도를 비교하여 Table 1에 정리하였다. 수치해석의 기준 조건은 $T_a=20$ °C, $w=0.01010$ kg/kg, $u=2$ m/s, $T_b=-20$ °C이며 공기 온도, 공기 절대 습도, 공기 속도, 냉각면 온도를 변화시키면서 그에 대한 영향을 비교하였다. 운전 조건 중에서 공기 온도는 서리 두께의 성장에 대한 영향이 상대적으로 미미하다. 이는 공기 온도가 높아져도 공기 절대 습도가 일정하므로 서리 표면에서 습도차가 증가하지 않기 때문이다. 또한 공기 온도의 상승은 공기 속도, 냉각면 온도의 증가에 함께 조밀한 서리층을 형성시킨다.

6. 결론

본 논문에서는 서리층 성장 예측을 위해 공기 측은 적분형 경계층방정식을 해석하여 서리층으로 열 및 물질전달량을 계산하고, 서리층 내부는 수증기 확산방정식을 해석하는 모델을 제시하였다. 수치해석 방법의 검증을 위해 기존에 제시된 수치 모델 및 실험 결과와 비교하였으며, 서리층 성장과 열 및 물질전달 특성에 미치는 운전 조건의 영향을 조사하였다. 사용한 수치모델은 서리 두께와 밀도를 최대 13%의 오차 이내에서 예측하였다. 수치해석 결과에서 보면 서리 두께는 공기 절대 습도, 공기 속도의 증가와 냉각면 온도의 감소에 따라 서리층 성장이 촉진되어 증가한다. 서리 밀도는 공기 온도, 공기 속도, 냉각면 온도의 상승에 따라 증가한다. 서리층의 성장시 열 및 물질전달은 운전 시간이 경과함에 따라 감소하며 서리층 성장이 빠른 조건에서는 급격한 열저항의 증가로 인해 열유속이 빠르게 감소한다. 유동 방향에 따른 국소 열전달계수는 입구로부터 멀어질수록 감소하며, 시간이 경과함에 따라 공기측의 평균 열전달계수는 다소 증가한다.

후 기

이 논문은 2000년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2000-041-E00099).

참고문헌

1. Hosoda, T. and Uzuhashi, H., 1967, Effects of frost on the heat transfer coefficient, Hitachi Review, Vol. 16, No. 6, pp. 254-259.
2. 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.
3. Jones, B. W. and Parker, J. D., 1975, Frost formation with varying environmental parameters, J. Heat Transfer, Vol. 97, pp. 255-259.
4. 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.
5. Lee, K. S., Kim, W. S. and Lee, T. H., 1997, A one-dimensional model for frost formation on a cold flat surface, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 40, No. 18, pp. 4359-4365.
6. Parish, H. C. and Sepsy, C. F., 1972, A numerical analysis of frost formation under forced convection, ASHRAE Trans., No. 2331, pp. 236-251.
7. Sherif, S. A., Raju, S. P., Padki, M. M. and Chan, A. B., 1990, A semi-empirical transient method for modeling frost formation on a flat plate, ASME, Heat Transfer Division, Vol. 139, pp. 15-23.
8. Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 1996, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4th ed., Wiley, New York.
9. Lee, K. S., Lee, T. H. and Kim, W. S., 1994, Heat and mass transfer of parallel plate heat exchanger under frosting condition, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 6, No. 2, pp. 155-165.
10. Lee, K. S., Kim, Y. C. and Jhee, S., 2001, Correlations of frost properties considering the environmental parameters over a cold flat plate, Korean Journal of KSME, Vol. 25, No. 8, pp. 1046-1052.