

<논 문>

착상 거동예측을 위한 이론적 모델

이관수* · 이태희** · 허정희**

(1995년 8월 26일 접수)

The Theoretical Model for Predicting the Behaviors of the Frost Formation

K. S. Lee, T. H. Lee and J. H. Heo

Key Words : Frost Formation(착상), Mass Transfer(물질전달), Refrigeration(냉동), Sublimation(승화)

Abstract

A theoretical model of the frost formation has been presented to investigate the characteristics of the growth of frost layer by considering molecular diffusion of water vapor and heat generation caused by sublimation of water vapor in the frost layer. The present model was compared with existing experimental data as well as a previous model. The difference between the present model and existing experimental data was found to be about 6 percent. An analysis for the behavior of frost formation using present model shows a good agreement with the trend for a number of experimentally observed features. The present analysis can also provide the physical understanding on the phenomena of the frost formation.

기 호 설 명	
b : 덕트 높이 [m]	T : 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
D : 확산계수 [m^2/s]	t : 시간 [s]
D_H : 수력지름 [m]	V : 속도 [m/s]
h_h : 열전달계수 [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]	W : 덕트 폭 [m]
h_m : 물질전달계수 [$\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$]	w : 절대습도 [kg/kg']
i : 엔탈피 [kJ/kg]	x : 두께 [m]
k : 열전도계수 [W/mK]	그리스문자
L : 냉각면의 유동방향 길이 [m]	α : 흡수계수 [s^{-1}]
L_H : 승화잠열 [kJ/kg]	Δ : 차이
\dot{m} : 질량유량 [kg/s]	ρ : 밀도 [kg/m^3]
Nu : Nusselt수	상첨자
P : 압력	" : 유속
Pr : Prandtl수	" : 생성
q : 열전달량 [W]	하첨자
Re : Reynolds수	0 : 초기, 무착상

*회원, 한양대학교 기계공학과

**회원, 한양대학교 대학원 기계공학과

- a* : 공기층, 공기
- abs* : 흡수
- f* : 서리층
- in* : 입구
- lat* : 잠열
- out* : 출구
- p* : 냉각면
- s* : 표면
- sat* : 포화상태
- sen* : 현열
- tot* : 총합
- w* : 수증기
- x* : 두께
- ρ : 밀도

1. 서 론

냉장고, 열펌프 등과 같은 냉동·공조기기에서 많이 발생하는 착상현상은 열전달의 감소와 압력손실이라는 기기의 성능저하를 수반하게 된다. 그러므로 착상과정에 대한 이해와 그에 대한 정확한 해석은 냉동시스템의 효율적 설계 및 운전을 위해 필수적이라고 할 수 있다.

지금까지 서리의 생성과 성장에 관해서 다양한 연구가 이루어져 왔지만 서리층 내부의 복잡한 메카니즘때문에 이론적 연구보다는 주로 실험적인 연구에 의존해 왔다. 실험적인 연구는 오랜기간 동안 많은 학자들에 의해 행하여졌고 그 분야 또한 다양하다. 이러한 실험적인 연구는 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫번째는 서리의 물성치에 관한 연구로서 최근까지 이루어진 연구는 연구자들에 따라 상이한 결과를 보여주고 있다. Reid 등⁽¹⁾은 냉각면의 온도가 낮을수록 서리층의 밀도가 높아진다고 하였으나, Trammel 등,⁽²⁾ Biguria 등⁽³⁾ 그리고 이관수 등^(4,5)은 냉각면의 온도가 높을수록 서리층의 밀도가 높아진다고 하였다. 또한 Trammel 등⁽²⁾은 서리층의 밀도는 공기의 온도에 거의 영향을 받지 않는다고 주장한 반면 이관수 등^(4,5)은 공기의 온도가 높을수록 고밀도의 서리층이 생성된다고 하였다.

두번째로는 착상조건하에서의 열 및 물질전달에 관한 연구로, 이 분야 또한 연구자들에 따라 다른 결론을 도출하고 있다. Stoecker,⁽⁶⁾ Hosoda 등⁽⁷⁾

그리고 Gatchilov 등⁽⁸⁾은 열전달이 착상초기에 증가하다 착상이 진행됨에 따라 다시 감소하는 것으로 보고한 반면 Rite 등⁽⁹⁾은 착상이 진행됨에 따라 열전달이 꾸준히 증가한다는 결론을 내렸으며, Aoki 등⁽¹⁰⁾은 착상초기에 감소를 보인 후 계속 증가한다는 결론을 얻었다. 이와 같이 연구자들마다 각각 다른 결론을 도출하고 있는 것은 연구대상이 된 열교환기의 형상이 각각 다르고 실험조건 또한 다르기 때문이다. 이러한 이유로 연구결과에 대해서 상호 비교가 어려운 실정이다.

반면에 이론적 연구는 실험으로부터 얻어진 서리층의 열전도계수와 무착상상태에서의 열전달계수를 수정한 식 그리고 무착상상태에서의 압력강하식을 수정한 식을 적용하여 수행되고 있는 것이 일반적이다.⁽¹⁰⁾ 그러나, 열전달계수 및 압력강하식이 부정확하고 그 적용범위 또한 제한되어 있기 때문에 해석의 정확도가 상당히 떨어지고 있다. 그리고 서리층 내부에 대한 해석 이론 또한 많은 문제점을 내포하고 있으므로 서리층의 성장에 대한 예측의 신뢰도 역시 낮은 편이다.⁽¹¹⁾ White 등⁽¹²⁾은 서리층으로 확산되어 들어가는 수증기의 질량유속중 절반은 서리밀도에, 그리고 나머지 절반은 서리두께에 영향을 준다고 하였다. 또 다른 연구자들^(13~15)은 이 이론을 수정하여 습공기중에서 서리층으로 확산되어 들어가는 수증기의 질량유속중 일정한 양이 서리밀도 증가에 영향을 미치며 그 나머지가 서리두께의 성장에 영향을 미친다고 하였는데 이것이 지금까지 착상해석에 대한 지배적인 이론이다. 그러나 이 이론은 서리 표면온도의 계산시 부정확성 때문에 전체적으로 실험결과와 상당한 오차를 유발하고 있다.

따라서 본 연구에서는 서리층 내부에서 일어나는 수증기의 분자확산과 승화에 의한 열생성을 고려하여 서리 표면온도를 계산하고, 서리두께와 서리밀도 등과 관련된 착상의 제현상을 예측하는 해석방법을 제시하고자 한다.

2. 이론해석

서리층의 성장을 예측하기 위하여 Fig. 1과 같은 사각 덕트에서 검사체적을 선정하여 질량보존의 법칙, 운동량보존의 법칙, 그리고 에너지보존의 법칙을 적용한다. 이 때 해석을 위하여 도입된 가정은 다음과 같다.

기가 냉각면에 수직한 방향으로만 확산된다고 가정한다. 이 그림은 서리층 내부에서 일어나는 수증기의 이동과 서리층 내부로의 흡수를 도시한 것이다. 즉 검사체적으로 들어온 수증기의 일부는 확산에 의해 검사체적 밖으로 빠져나가고, 그 중 일부는 검사체적 내부로 흡수된다. 여기서, 검사체적 내부로 흡수되는 수증기의 양은 그 검사체적에서의 수증기 밀도에 비례한다고 가정하였으며 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$d\dot{m}_p'' = \alpha_f \rho_w dx \quad (5)$$

여기서, 비례상수로 도입된 α_f 는 흡수계수라 정의하였으며, 단위는 $[s^{-1}]$ 이다. 이와 같은 수증기 분자의 확산에 대한 해석을 통하여 서리층 내부에서의 물질전달과정을 알 수 있다. 서리층 내부에서의 확산방정식을 세우면 다음과 같다.

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

식 (6)을 풀기 위한 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x=0 \text{에서} \\ \rho_w = \rho_{w,sat}(T_p) \\ \frac{d\rho_w}{dx} = 0 \\ x=x_f \text{에서} \\ \rho_w = \rho_{w,sat}(T_{f,s}) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, 경계조건 $d\rho_w/dx=0$ 은 서리층 내부로 확산된 수증기가 냉각면을 통해서 확산되지 못한다는 것을 의미한다. 식 (6)에 식 (7)의 경계조건을 대입하여 풀면 다음과 같이 서리층 내부의 수증기 밀도 분포와 흡수계수를 구할 수 있다.

$$\rho_w(x) = \rho_{w,sat}(T_p) \cosh \gamma x \quad (8)$$

$$\alpha_f = D \cdot \left[\frac{1}{x_f} \cosh^{-1} \left\{ \frac{\rho_{w,sat}(T_{f,s})}{\rho_{w,sat}(T_p)} \right\} \right]^2 \quad (9)$$

여기서,

$$\gamma = \sqrt{\frac{\alpha_f}{D}}$$

2.2.2 열전달

서리층 내부에서 일어나는 수증기의 상변화에 의한 잠열을 고려하여 미소체적에 대해서 열전달에 관한 방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$k_f \frac{d^2 T}{dx^2} = -\alpha_f \cdot L_H \cdot \rho_w \quad (10)$$

식 (8)에서의 수증기의 밀도분포를 식 (10)에 적용하고, 식 (11)로 표현되는 경계조건을 사용하면 서리층 내부에서의 온도분포를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} x=0 \text{에서} \\ T = T_p \\ x=x_f \text{에서} \\ k_f \frac{dT}{dx} = q_{tot}'' - \dot{m}_p'' \cdot L_H \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, \dot{m}_p'' 는 서리층 내로 들어오는 수증기중에서 밀도를 증가시키는 수증기의 질량유속이다. 식 (10)에 식 (11)의 경계조건을 대입하여 풀면 다음과 같이 서리층 내부에서의 온도분포에 관한 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} T(x) = T_p + \frac{q_{tot}''}{k_f} x \\ - \frac{\alpha_f L_H \rho_{w,sat}(T_p)}{k_f \gamma^2} (\cosh \gamma x - 1) \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)에 $x=x_f$ 를 대입하면 서리층 표면에서의 온도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} T_{f,s} = T_p + \frac{q_{tot}''}{k_f} x_f \\ - \frac{\alpha_f L_H \rho_{w,sat}(T_p)}{k_f \gamma^2} (\cosh \gamma x_f - 1) \end{aligned} \quad (13)$$

2.2.3 착상량

단위시간당, 단위면적당의 착상량은 습공기의 절대습도와 서리표면의 절대습도의 차이에 의하여 다음과 같이 계산한다.

$$\dot{m}_f'' = h_m (w_a - w_{f,s}) = \dot{m}_x'' + \dot{m}_p'' \quad (14)$$

2.2.4 서리층의 밀도

습공기로부터 서리층 표면으로 전달된 수증기중에서 일부는 다공성의 서리층 내부로 흡수되어 서리층의 밀도를 증가시키는데 그 수증기의 양은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{m}_p'' = D \frac{d\rho_w}{dx} \Big|_{f,s} = \int_{x=0}^{x=x_f} \alpha_f \rho_w dx \quad (15)$$

여기서, D 는 공기중에서의 수증기의 확산계수이다.

식 (15)에서 구한 서리밀도의 질량유속을 이용하여 각 시간 구간에 대해 서리밀도를 구하면 다음과 같다.

$$\rho_f^{t+\Delta t} = \rho_f^t + \frac{\dot{m}_p''}{x_f} \Delta t \quad (16)$$

2.2.5 서리두께

식 (15)에서 구한 \dot{m}_o'' 를 식 (14)에 대입하면 \dot{m}_x'' 를 구할 수 있다. 이렇게 구한 \dot{m}_x'' 를 이용하여 각 시간 구간에 대해 서리두께를 구하면 다음과 같다.

$$x_f^{t+\Delta t} = x_f + \frac{\dot{m}_x''}{\rho_f} \Delta t \tag{17}$$

2.3 보조 관계식

공기층의 열전달과 서리층 내부의 온도분포를 구하기 위해서 필요한 보조 관계식은 다음과 같다.

2.3.1 열 및 물질전달계수

착상에 관한 실험을 통하여 여러 연구자들이 열전달관계식을 도출하였지만 시험부의 기하학적 형상 및 유동특성이 제한되어 있기 때문에 적용하는데 어려움이 따른다. 여기서는 다음과 같은 Yamakawa 등⁽¹⁷⁾의 관계식을 사용하였다.

$$h_h = 0.034 Re^{0.8} \frac{k_a}{D_H} \tag{18}$$

또한 열 및 물질전달 상사성에 의해서 물질전달계수는 다음과 같이 나타낸다.

$$h_m = \frac{h_h}{C_{p,a}} \tag{19}$$

2.3.2 서리의 열전도계수

서리층의 밀도나 서리두께의 시간에 따른 증가율을 계산하기 위해서는 서리의 열전도계수가 필요하다. 서리의 열전도계수는 특히 서리밀도와 상관관계를 갖고 있다. 서리의 열전도계수는 이관수 등⁽⁶⁾이 제안한 다음 식을 사용한다.

$$k_f = 0.132 + 3.13 \cdot 10^{-4} \cdot \rho_f + 1.6 \cdot 10^{-7} \cdot \rho_f^2 \tag{20}$$

2.3.3 수증기의 확산계수

서리층 내부로의 분자 확산과정을 설명하기 위해

서는 공기중에서의 수증기의 확산계수가 필요하다. Table 1에 대기압하에서의 확산계수를 나타내었다. 표에 없는 온도에 대한 확산계수는 보간법을 이용하여 구한다.

3. 수치해석 및 타당성 검증

3.1 수치해석

본 연구에서는 Fig. 1에 나타낸 해석모델에 대해서 유동방향으로 일정한 격자로 구성하고, 공기층에 대해서 에너지보존법칙을 적용하여 각 격자의 출구조건이 다음 격자의 입구조건이 되도록 하였다. 서리층 내부에 대해서는 각 격자에 대해서 확산방정식을 적용하였다. 이러한 해석방법을 통하여 열 및 물질전달계수를 가지고 반복법을 이용하여 열 및 물질전달량과 서리 표면온도를 구하였고, 여기서 구한 서리 표면온도에서의 여러가지 열역학적 물성치를 계산하여 서리두께와 서리밀도 등을 구하였다. 그리고 요구되는 시간까지 이 과정을 반복하였다.

3.2 타당성 검증

본 연구에서 개발된 프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 Parker 등⁽¹³⁾의 실험 및 이론결과와 비교하여 Fig. 3에 이를 나타내었다. Fig. 3은 시간에 따른 서리두께의 성장을 나타내고 있으며, 60분이 경과한 후 Parker 등의 모델이 그들의 실험치와 27%의 오차를 보이는데 반해 본 연구에서 제시한 모델은 약 6%의 오차를 보이고 있다. 이와 같이 본 연구에서 개발된 모델이 기존의 모델에 비해서 Parker 등의 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

Table 1 Diffusion coefficients for water-air⁽¹⁸⁾

Temp.	cm ² /s	Temp.	cm ² /s	Temp.	cm ² /s
-45.6	0.163	-23.3	0.190	-1.1	0.220
-40.0	0.169	-17.8	0.198	4.4	0.228
-34.4	0.176	-12.2	0.205	10.0	0.236
-28.9	0.183	-6.7	0.213	15.6	0.243

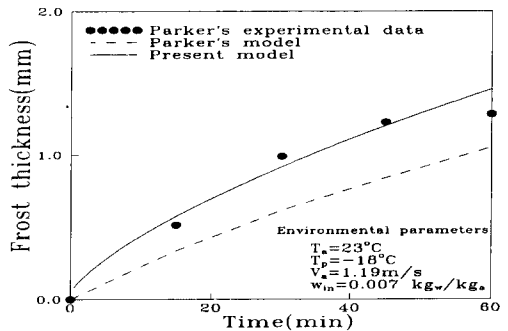


Fig. 3 Comparison between Parker's experimental data, Parker's model and present model

여기서, 기존의 모델이 실험결과와 큰 오차를 보이는 것은 기존의 모델이 서리층 내부를 해석할 때 서리층 내부에서의 열생성항을 식 (21)과 같이 가정하였기 때문이다. 이러한 가정은 서리층 내부에서 고르게 열이 생성된다는 의미이다.

$$\dot{q}''' = \frac{\dot{m}_e''}{x_f} L_H \quad (21)$$

반면 본 연구에서는 식 (22)와 같이 열생성항을 서리층 내부의 각 위치에서의 수증기 밀도와 흡수계수의 곱수로 나타내었다.

$$\dot{q}''' = \alpha_f \rho_w L_H \quad (22)$$

또한 \dot{m}_e'' 를 계산하는 과정에서도 기존의 모델은 수증기의 밀도 구배를 이상기체의 상태방정식을 이용하여 해석하였으나, 본 연구에서는 식 (15)와 같이 서리층 내부에서의 흡수계수와 수증기 밀도분포를 이용한 확산방정식을 세워서 구하였기 때문에 기존 모델에 비해서 개선된 값을 얻을 수 있었다고 생각된다.

4. 결과 및 고찰

실험 및 기존의 이론모델과의 비교를 통하여 그 타당성이 검증된 프로그램을 통하여 서리 표면온도, 열유속 그리고 착상률 등을 구하였다. 또한 유동방향으로의 서리두께와 서리 밀도분포를 알아보았으며, 실험상에서 운전이 난이한 조건에 대한 서리의 성장과정도 살펴 보았다.

4.1 서리 표면온도, 열유속, 착상률

4.1.1 서리 표면온도

서리 표면온도는 열 및 물질전달량 등을 계산할 때 꼭 필요한 값이다. 또한 실험상에서도 측정이 가장 어려운 부분이므로 서리 표면온도의 계산은 중요한 부분이라 할 수 있다. Fig. 4와 Fig. 5에 서리 표면온도에 대한 입구 공기유속 및 공기습도의 영향에 대하여 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 서리 표면온도는 유속이 증가할수록 그리고 습도가 높을수록 높아짐을 볼 수 있다. 이는 유속이 증가할수록 열전달이 활발하게 일어나 서리층의 성장이 빨라짐으로 인해서 서리층의 열저항이 증가하기 때문이다. 또한 습도가 높아질수록 물질전달의 추진력이 커지기 때문에 서리층이 빨리 자라고 이로 인

해 열저항이 증가하여 서리 표면온도는 증가하게 된다. 또한 유속이 1.0 m/s인 경우를 제외하고는 대부분의 경우 착상 초기에 서리층의 열저항증가로 인하여 서리 표면온도가 급격히 증가한다. 그러나 곧 그 증가폭이 감소하여 어느 일정 시간이 지난 후에는 비교적 일정한 온도로 유지됨을 볼 수 있다.

4.1.2 열유속

Fig. 6에는 열교환기 전체에 대해 시간이 경과함에 따른 열유속을 나타내었다. 시간이 경과함에 따라 온도차에 의한 현열전달은 큰 폭으로 감소하고, 습도차에 의한 잠열전달은 서서히 감소한다. 이에 따라 공기측과 서리층 사이의 전체 열유속은 감소하는 경향을 보였다. 착상초기에 열전달량이 큰 폭으로 감소하는 것은 낮은 밀도의 서리층이 비교적 빠른 속도로 성장하여 서리 표면온도가 급격히 상

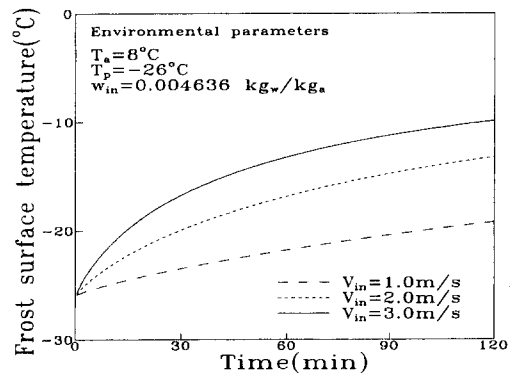


Fig. 4 The effect of air velocity on the frost surface temperature

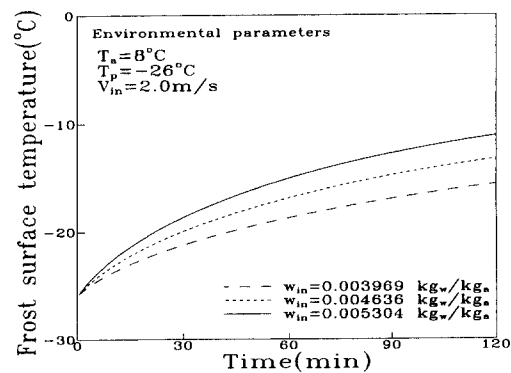


Fig. 5 The effect of air humidity ratio on the frost surface temperature

승하기 때문이다. 그러나 초기상태를 지난 후에는 서리밀도의 증가로 인하여 서리 표면온도의 증가가 둔화되기 때문에 열전달량은 서서히 감소하게 된다. 전체 열전달량중 잠열전달이 차지하는 비율은 25% 정도이며, 이는 이관수 등⁽⁶⁾의 실험에서의 결과와 일치한다. 이와 같이 상변화에 의한 물질전달 과정을 수반하는 착상현상에서는 잠열전달을 무시할 수 없음을 알 수 있다.

4.1.3 착상률

Fig. 7은 입구 공기 유속에 따른 서리의 성장속도를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 유속이 2 m/s 인 경우에는 거의 일정하게 유지되지만, 4 m/s와 6 m/s인 경우에는 착상 초기에 비교적 급격히 감소함을 볼 수 있는데 이것은 착상 초기에 서리층이 생성되면서 이에 따라 열저항이 급격히 증가하였기 때문이다. 또한 이에 따라 서리 표면온도가 증가하여 물질전달의 추진력이 급격히 감소한다. 이러한 초기의 급격한 변화가 지난 후에는 서리층의 성장이 둔화되어 열저항도 일정한 값으로 유지되므로 이에 따라 착상률도 일정하게 된다.

Fig. 8은 공기층에서 서리층 내부로 들어오는 수증기의 질량유속을 나타낸 것이다. 여기서, \dot{m}_x'' 와 \dot{m}_p'' 는 각각 서리두께와 서리밀도에 영향을 주는 수증기의 질량유속이다. 그림에서 볼 때 \dot{m}_x'' 는 착상초기에 급격히 감소하며 시간이 흐름에 따라 그 변화폭이 작은 반면 \dot{m}_p'' 는 완만하게 증가한다. 이는 결정성장기인 착상초기에 서리층 내로 흡수된 수증기가 낮은 밀도의 서리로 냉각면위에 형성되어 밀도보다는 두께에 더 많은 영향을 주기 때문이다. 그러나 결정성장기가 지난 이후에는 수증기가 다공

성의 서리층으로 흡수되기 때문에 서리두께의 성장율은 감소하는 반면 서리밀도의 성장율은 증가하게 된다. 2시간이 지난 후의 \dot{m}_x'' 와 \dot{m}_p'' 의 비는 1:0.8이다. 이는 \dot{m}_x'' 와 \dot{m}_p'' 의 비가 1:1이라고 주장한 White 등⁽¹²⁾과는 차이를 보이고 있다. 그러나 공기유속이 증가할수록 두 항의 비는 1:1에 근접하게 된다.

4.2 유동방향에 따른 변화

4.2.1 서리두께

Fig. 9에는 공기 유동방향으로 서리두께의 변화를 도시하였다. 그림에서 볼 때 입구영역에서 약간 많은 양의 서리가 쌓임을 볼 수 있는데 이것은 입구측에서 보다 많은 물질전달이 일어나기 때문이다. 또한 시간이 경과함에 따라 입구영역과 출구영역에서의 차이가 미미하지만 증가함을 볼 수 있다. 이는 착상초기에 입구측에서 서리두께가 크게 자람으로써 공기유속이 증가하여 열전달이 향상되며 이로 인해 계속적으로 더 많은 양의 서리가 입구측에

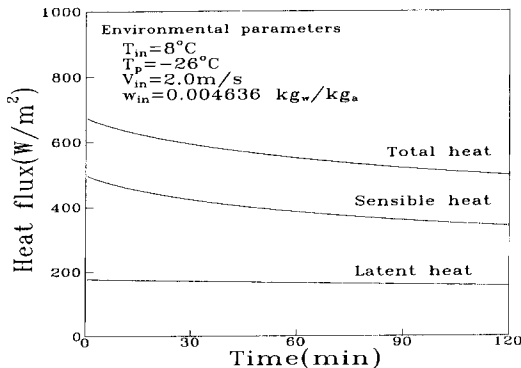


Fig. 7 The variation of frosting rate with time

Fig. 6 The variation of heat flux with time

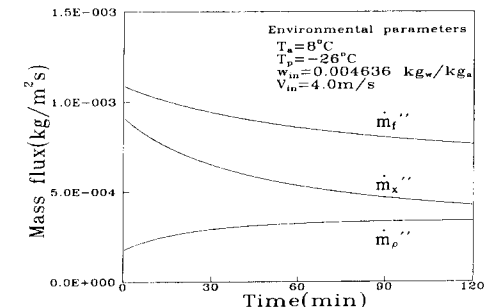
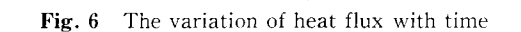


Fig. 8 The variation of mass flux with time

쌓이기 때문이다. 그러나 입구유속이 증가하여 3 m/s 이상이 되면 입·출구에서의 서리두께 차이가 없게 된다.

이는 Reynolds수가 10000 이상인 경우에 입·출구에서의 서리두께의 차이가 없다고 한 O'Neal⁽¹¹⁾의 결론과 유사하다.

4.2.2 서리밀도

Fig. 10에는 공기 유동방향으로의 서리밀도의 변화를 나타내었다. 서리두께와 마찬가지로 평균 선단에서 하류로 갈수록 서리밀도가 감소함을 알 수 있다.

또한 시간이 흐름에 따라 입구와 출구에서의 서리밀도 차이도 증가함을 볼 수 있다. 이는 입구측의 밀도는 그 증가량이 큰데 반하여 출구에서의 밀도의 증가폭이 작기 때문이다.

4.3 운전조건에 따른 영향

4.3.1 입구 공기온도의 영향

Fig. 11과 Fig. 12는 입구 공기온도가 서리층의 두께 및 밀도에 미치는 영향을 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 때 입구 공기온도가 높을수록 서리층의 두께는 감소하고 밀도는 증가함을 볼 수 있다. 이것은 입구 공기온도가 상승하여도 입구 공기의 절대습도가 일정하기 때문에 물질전달의 추진력은 변화하지 않지만, 서리층 내부로 흡수되어 서리밀도에 영향을 미치는 수증기의 질량유속이 커지기 때문에 서리층의 밀도는 커지게 된 것이고, 착상량에는 큰 변화가 없기 때문에 서리두께는 작아지게 된 것이다. 이러한 경향은 이관수 등⁽⁴⁾의 실험결과

와 일치한다.

4.3.2 냉각면 온도의 영향

냉각면 온도의 변화가 서리층 성장에 미치는 영향을 Fig. 13과 Fig. 14에 나타내었다. 이 그림들은

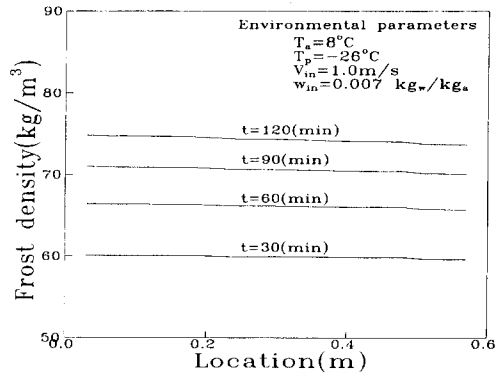


Fig. 10 The variation of frost density with position

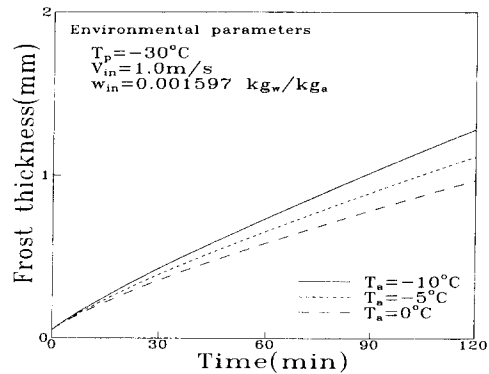


Fig. 11 Effect of air temperature on the frost thickness

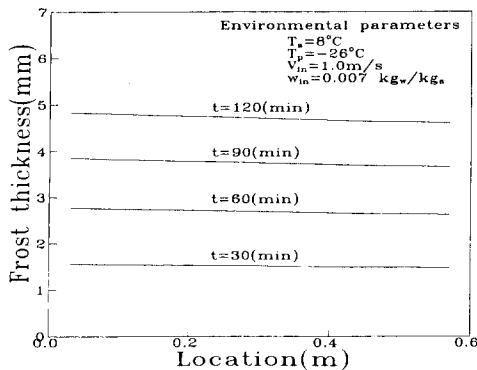


Fig. 9 The variation of frost thickness with position

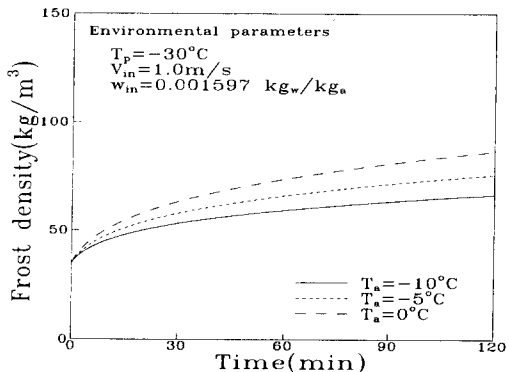


Fig. 12 Effect of air temperature on the frost density

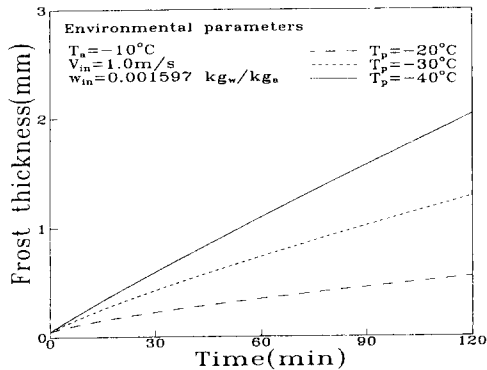


Fig. 13 Effect of cooling plate temperature on the frost thickness

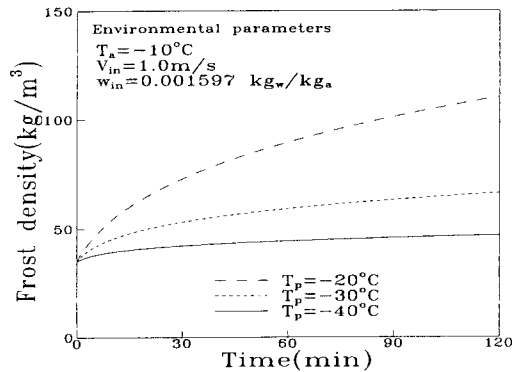


Fig. 14 Effect of cooling plate temperature on the frost density

냉각면 온도가 높아질수록 서리두께는 감소하고 밀도는 증가함을 보여주고 있다. 냉각면의 온도가 높아지면 공기와 서리층 표면 사이의 물질전달의 추진력이 감소하여 서리층의 두께는 감소한 반면, 식 (9)에 나타난 α_f 가 증가하여 식 (15)로 나타나는 서리층 내부로 흡수되는 수증기의 양이 커졌기 때문에 서리층의 밀도가 증가한 것이다. 이러한 경향은 Trammel 등⁽²⁾의 결론과 잘 일치한다.

5. 결 론

본 연구에서는 수증기의 분자확산과 승화에 의한 열생성을 동시에 고려하여 착상현상을 예측할 수 있는 개선된 해석모델을 제시하였다. 이러한 개선된 해석모델을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 본 연구에서 제시된 모델을 기존의 실험결과와 비교하였을 때 서리층 두께는 약 6%의 오차가 나타났으며, 기존의 이론모델과 비교하였을 때에는 20~30% 정도 향상되었다.

(2) 서리 표면온도는 유속이 증가할수록 그리고 습도가 높을수록 높아졌으며, 착상초기에는 급격히 증가하고 시간이 흐름에 따라 점진적으로 증가하는 포물선 경향을 나타냈다.

(3) 서리층의 성장속도는 착상초기에 급격히 감소하며 그 후 일정하게 유지된다.

(4) 서리두께와 서리밀도는 출구에 비해 입구에서 보다 큰 값을 갖지만, 입구 공기유속이 3 m/s 이상에서는 그 변화가 없다.

(5) 입구 공기온도가 0°C 이하인 경우에 서리두께는 거의 선형적으로 증가하였으며, 온도가 낮아질수록 서리두께는 증가하고 서리밀도는 감소한다.

(6) 냉각면 온도가 높을수록 서리두께는 감소하고 서리밀도는 증가한다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Reid, R. C., Brian, P. L. T. and Weher, M. E., 1966, “Heat Transfer and Frost Formation Inside a Liquid Nitrogen-Cooled Tube,” *A. I. Ch. E.-J.*, Vol. 11, pp. 1190~1195.
- (2) Trammel, G. J., Little, D. C. and Killgore, E. M., 1968, “A Study of Frost Formed on a Flat Plate Held at Sub-Freezing Temperature,” *ASHRAE-J.*, Vol. 10, No. 7, pp. 42~47.
- (3) Biguria, G. and Wenzel, L. A., 1970, “Measurement and Correlation of Water Frost Formed on a Flat Plate Held at Sub-Freezing Temperature,” *ASHRAE-J.*, Vol. 10, No. 7, pp. 42~47.
- (4) 이관수, 이태희, 김우승, 1994, “저온 수직 평판에서의 착상에 대한 운전조건에의 영향,” 대한기계학회논문집, 제18권, 제12호, pp. 3305~3311.
- (5) 이관수, 이태희, 김우승, 1994, “착상조건하에 평행평판 열교환기의 열 및 물질전달,” 공기조

- 화·냉동공학회 논문집, 제6권, 제2호, pp. 155~165.
- (6) Stoecker, W. F., 1957, "How Frost Formation on Coils Affects Refrigeration Systems," *Refrigeration Engineering*, Vol. 65, No. 2, pp. 42~46.
- (7) Hosoda, T. and Uzuhashi, H., 1967, "Effects of Frost on the Heat Transfer Coefficient," *Hitachi Review*, Vol. 16, No. 6, pp. 254~259.
- (8) Gatchilov, T. S. and Ivanova, V. S., 1979, "Characteristics of Extended Surface Air Coolers during Operation under Frosting Conditions," *Int. J. Refrig.*, Vol. 2, No. 4, pp. 233~236.
- (9) Rite, R. W. and Crawford, R. R., 1991, "The Effect of Frost Accumulation on the Performance of Domestic Refrigerator-Freezer Finned-Tube Evaporator Coils," *ASHRAE Transactions*, Vol. 97, Part. 2, pp. 428~437.
- (10) Aoki, K., Hattori, M. and Hayashi, Y., 1985, "A Study of Extended Surface Heat Exchanger with Frosting; 1st Report, Overall Heat Transfer Characteristics," *JSME Trans.*, Ser. B, Vol. 51, No. 469, pp. 3048~3054.
- (11) O'Neal, D. L., 1982, "The Effect of Frost Formation on the Performance of a Parallel Plate Heat Exchanger," Ph. D. Thesis, Purdue University.
- (12) White, J. E. and Cremers, C. J., 1974, "Prediction of Growth Parameters of Frost Deposits in Forced Convection," *AIAA, ASME, Thermodynamics and Heat Transfer Conference*, pp. 1~9.
- (13) Parker, J. D. and Jones, B. W., 1975, "Frost Formation With Varying Environmental Parameters," *ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 97, pp. 255~259.
- (14) Sami, S. M. and Duong, T., 1988, "Numerical Prediction Of Frost Formation On Cooled Heat Exchangers," *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 15, pp. 81~94.
- (15) Sami, S. M. and Duong, T., 1989, "Mass and Heat Transfer during Frost Growth," *ASHRAE Transaction*, Vol. 95, Part. 1, No. 3218, pp. 158~165.
- (16) Eckert, E. R. and Drake, Jr., R. M., 1972, *Analysis of Heat and Mass Transfer*, McGraw-Hill.
- (17) Yamakawa, N., Takahashi, N. and Ohtani, S., 1972, "Forced Convection Heat and Mass Transfer under Frost Condition," *Heat Transfer Japanese Research*, Vol. 1, No. 2, p. 1.
- (18) ASHRAE HANDBOOK, 1993, Fundamentals, 6. 15.