

# 냉각 평판에서 착상 현상 예측을 위한 모델링

양동근\*·김정수\*·이관수†

(2003년 12월 19일 접수, 2004년 4월 9일 심사완료)

## Modeling for Prediction of Frost Formation Phenomena on a Cold Plate

Dong-Keun Yang, Jung-Soo Kim and Kwan-Soo Lee

**Key Words:** Frost Formation(착상), Frost Property(서리 물성치), Heat and Mass Transfer(열 및 물질전달)

### Abstract

A mathematical model is presented to predict the frost properties and heat and mass transfer within the frost layer formed on a cold plate. The model consists of the laminar flow equations for air-side and the empirical correlation of local frost density. The correlation of local frost density used in this study is obtained from various experimental conditions by considering frosting parameters. The numerical results are compared with experimental data to validate the model, and agree well with experimental data within a maximum error of 9%.

———— 기호설명 ————		$T$	: 온도 [°C]
		$t$	: 시간 [min]
$c_p$	: 정압비열 [kJ/kgK]	$u$	: x-방향 속도 [m/s]
$D$	: 확산계수 [m <sup>2</sup> /s]	$V_a$	: 공기의 평균속도 [m/s]
$h_{sv}$	: 승화 잠열 [kJ/kg]	$v$	: y-방향 속도 [m/s]
$k_a$	: 공기의 열전도 계수 [W/mK]	$y_f$	: 서리층 두께 [m]
$k_{f,eff}$	: 서리층 열전도 계수 [W/mK]	$w$	: 절대 습도 [kg/kg <sub>a</sub> ]
$L$	: 평판 길이 [m]		
$m''$	: 물질전달유속[kg/m <sup>2</sup> s]	그리스 문자	
$m_w$	: 수증기 질량 분율	$\alpha_f$	: 흡수계수 [s <sup>-1</sup> ]
$p$	: 압력 [Pa]	$\mu$	: 점성계수 [kg/ms]
$q''$	: 열유속 [W/m <sup>2</sup> ]	$\rho$	: 밀도 [kg/m <sup>3</sup> ]
Re	: Reynolds 수, $V_a L / \nu$		
		하첨자	
		$a$	: 공기층
		$i, j$	: 텐서 인덱스
		$f$	: 서리층
		$fs$	: 서리층 표면
		$in$	: 입구(inlet)

\* 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과  
 † 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학과  
 E-mail : ksleehy@hanyang.ac.kr  
 TEL : (02)2290-0426 FAX : (02)2295-9021

$p$	: 냉각면
$sat$	: 포화상태
$tp$	: 삼중점
$w$	: 수증기
$y$	: 서리층 두께

## 1. 서론

가정에서 사용되는 냉장고, 식품 냉동 및 저장 분야, 공기조기 등의 다양한 산업용 냉동기에 사용되는 열교환기는 저온 상태에서 작동된다. 이렇게 착상 조건에서 운전되는 열교환기는 운전시간이 경과함에 따라 냉각 표면에 형성되는 서리층으로 인해 공기 유량이 감소하고 서리층 표면 온도가 상승하여 전열 성능이 감소한다. 이처럼 착상 현상은 저온용 열교환기의 성능에 가장 지배적인 요소이므로 서리층의 성장과 열 및 물질 전달 특성의 예측이 필수적이며, 이를 통해 열교환기의 효율적인 설계가 가능하다.

착상과 관련된 기존 연구들은 대부분 평판과 원관 등의 기본적인 형상에서 서리층 성장 거동과 열 및 물질전달 특성의 예측에 치중되어 수행되었다. 일부 연구자들은<sup>(1~5)</sup> 평판에 형성되는 서리층 성장 거동 예측을 위해 공기측 열·유동장의 해석없이 열 및 물질전달에 대한 상관식을 이용하였고, 서리층은 간단한 수증기의 확산 방정식을 해석하여 서리층 두께 등의 특정한 서리층 물성치의 실험 결과와 비교하여 검증하였다. Parish와 Sepsy 등의 연구자들<sup>(6,7)</sup>은 평판 및 원관 표면에 형성되는 착상 거동 예측을 위해 공기측은 경계층 방정식을 해석하고 서리층 내부는 서리층 물성치에 대한 기존의 실험 상관식을 이용하여 계산하였다. 위의 연구들은 열 및 물질전달과 서리층 물성치에 대한 실험상관식을 사용하여 서리층 성장에 따른 유동장의 변화를 고려하지 못하거나 실험상관식의 사용 범위에 따라 모델의 적용성에 한계가 있다.<sup>(1~7)</sup> 또한, Ismail 등의 연구자들<sup>(8~12)</sup>은 얼음과 서리층의 밀도비에 의한 다공도를 정의하여 서리층 성장 거동을 예측하였다. 그러나 모델의 유도 과정에서 불확실한 계수를 가정하여 사용하므로 계수에 대한 해의 의존성이 크기 때문에 실험 결과와 상당한 오차를 보이고 있다.

따라서 본 연구에서는 냉각 평판에 형성되는 서리층의 성장 거동 예측을 위해 공기의 열·유동 및 수증기의 질량 분율에 대한 층류 유동 방정식을 해석하고, 서리층은 다양한 착상인자의 함수로서 서리층 밀도와 열전도계수에 대한 상관식을 유도하고 이를 통해 서리층에서의 열 및 물질 전달에 대한 특성을 예측하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용된 실험 장치는 습공기의 온도와 습도를 조절하는 향온향습실, 냉각면 온도를 일정하게 유지시키는 냉각부, 서리층의 성장을 관측하고 측정이 이루어지는 시험부, 그리고 공기를 순환시키고 실험장치의 각 부분을 연결하는 순환부로 Fig. 1과 같이 구성되었다. 실험장치의 각 부분은 서로 독립적으로 제어할 수 있도록 제작되었다.<sup>(13)</sup>

향온향습실 내에서 공기의 온도와 습도는 Pt 100Ω의 RTD에 의해 감지되며, PID 제어기에 의해 건구 및 습구 온도 조절용 전기 히터와 냉각기를 가동시켜 실험 조건에 적합한 상태로 유지시킨다. 순환부는 열손실을 최소화하기 위해 단열재와 비닐랩(vinyl wrap)을 이용하여 4중 단열 처리되었다. 공기의 유량은 노즐형 유량계를 이용하여 측정하였고, 인버터가 부착된 송풍기를 팬의 회전수를 변화시켜 조절하였다. 시험부 내로 유입되는 공기의 흐름을 균일하게 하기 위해 하니컴(honeycomb), 무동력 팬(free fan), 그리고

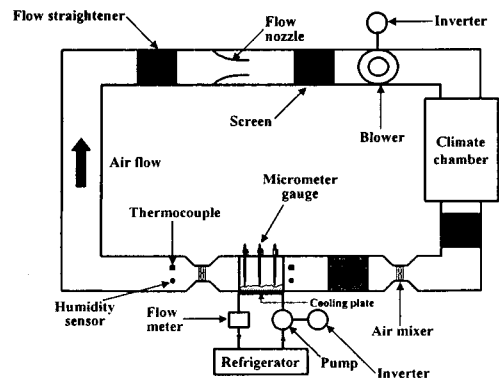


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

스크린(screen)을 설치하였다. 냉각부는 냉매를 냉각시키는 냉동기와 냉매를 순환시키는 펌프로 구성되어 있다. 냉매는 에틸렌글리콜과 증류수를 6:4의 중량비로 혼합한 에틸렌글리콜 수용액을 사용하였고, 항온조 내의 냉매 온도를 균일하게 유지하기 위해 교반기를 설치하였다. 냉매의 유량은 펌프의 회전수를 조절함으로써 제어하였으며, 시험부 입·출구에서 공기의 온·습도는 5개의 T형 열전대(thermocouple)와 습도센서를 사용하여 각각 측정하였다.

실험에 앞서 시험부 내 냉각 평판의 표면 거칠기가 서리층 성장 거동에 영향을 미치는 것을 막기 위해 표면을 부드럽게 하였으며, 서리층의 질량을 측정하기 위해 알루미늄 테이프를 시험부에 부착하였다. 실험 조건이 정상 상태에 도달하기 전에 착상을 방지하기 위해 냉각 표면에 비닐랩을 부착한 후 항온항습기 및 냉동기를 가동하였다. 모든 실험조건이 정상상태에 도달하면 냉각면의 비닐랩을 제거하고, 착상실험을 시작하였다. 서리층 두께와 표면온도는 실험시작 후 15, 30, 60, 90, 120, 150, 180분에 디지털 마이크로미터와 비접촉식 적외선 복사온도계를 이용하여 측정하였다. 정밀 전자 저울을 사용하여 서리층 무게를 측정하였고, 서리층 두께와 무게로부터 서리 밀도를 계산하였다.

국소적인 서리층 밀도는 운전조건(Re 수,  $w$ ,  $T_a$ ,  $T_p$ )과 서리층 밀도에 가장 큰 영향을 미치는 인자인 서리층 표면 온도( $T_f$ )의 함수로서 실험결과를 이용하여 다음과 같이 상관식을 유도하였다.

$$\rho_f = 0.9567 \text{ Re}^{-0.0237} w^{-1.2621} \left[ \exp\left(\frac{T_f - T_p}{T_a - T_p}\right) \right]^{3.9347} \quad (1)$$

식 (1)은 실험 결과와 비교하여 최대 10% 내에서 일치하며, 적용범위는  $20,000 \leq \text{Re} \leq 54,000$ ,  $1.0 \leq V_a \leq 2.5$ ,  $0.00322 \leq w \leq 0.00847$ ,  $-35 \leq T_p \leq -15$ ,  $5 \leq T_a \leq 15$ 이다.

### 3. 수학적 모델링

본 연구에서는 냉각 평판에 형성되는 서리층의 성장 거동 해석을 통해 서리층에서의 열 및

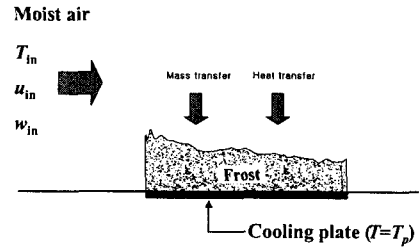


Fig. 2 Physical model for the analysis of frost layer growth on a cold plate

물질 전달 특성을 예측하는 수학적 모델을 제시하고자 한다. 이 때 서리층의 성장 해석을 위한 계산 영역은 Fig. 2와 같고, 서리층의 형성과정은 준정상상태(quasi-steady state)로 가정한다.

#### 3.1 이론 해석

본 연구에서는 공기층의 열·유동 및 수증기 질량 분율을 해석하였으며, 이때 사용된 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho c_p T u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( k_a \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho m_w u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho D \frac{\partial m_w}{\partial x_j} \right) \quad (5)$$

공기층 열·유동의 변화와 서리층 성장에 따른 물리적 현상을 고려하여 경계조건이 결정된다. 이 때 입구 조건은 운전 조건에 따라 결정되며 출구 조건은 0(零)구배 조건이 주어진다.

입구 :

$$u = u_{in}, \quad v = 0, \quad T = T_{in}, \quad m_w = m_{w,in}$$

출구:

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial m_w}{\partial n} = 0$$

냉각면은 일정 온도로 유지되며, 냉각면과 서리



온도에 크게 영향을 받고 있다. 이러한 착상인자의 변화는 서리층 표면에서 물질전달력을 증가시켜 서리층의 성장이 촉진되기 때문이다.

Fig. 4는 서리층 밀도에 대한 해석 결과를 실험 결과와 비교한 것이며, 최대 8% 범위에서 잘 예측하고 있다. 서리층 밀도는 서리층 두께와 달리 냉각면 온도가 가장 지배적인 인자이며, 냉각면 온도가 떨어질 경우 착상 초기에 급격한 서리층의 성장으로 인해 상대적으로 조밀하지 못한 서리층이 형성된다.

Fig. 5는 서리층이 성장함에 따라 서리층 표면 온도에 대한 해석 결과를 실험 결과와 비교하여 도시한 것이다. 서리층의 표면온도는 서리 밀도와 두께의 성장에 매우 밀접히 관련되어 있다. 급격

한 서리층의 성장이 이루어지거나 서리층 밀도가 작을 경우 열저항 증가로 인해 상대적으로 서리층 표면온도가 빨리 상승함을 알 수 있다.

Fig. 6은 운전 시간이 경과함에 따라 현열과 잠열전달량을 실험결과와 비교하여 도시한 것이다. 본 논문에서 사용된 수학적 모델의 해석결과는 서리층 두께와 밀도를 잘 예측하였고, 이는 Fig. 5에서 보듯이 서리층 표면온도의 정확한 예측을 가능하게 하였다. 이러한 결과들로부터 Fig. 6에서 공기측으로부터 서리층으로의 열전달량을 정확히 예측할 수 있는 이유를 알 수 있다.

수치 해석을 통해 운전조건에 따라 열유속의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 서리층의 성장과 열유속의 변화는 운전조건에 따라 크게 영향을 받으며, 서리층 성장이 빠른 조건에서는

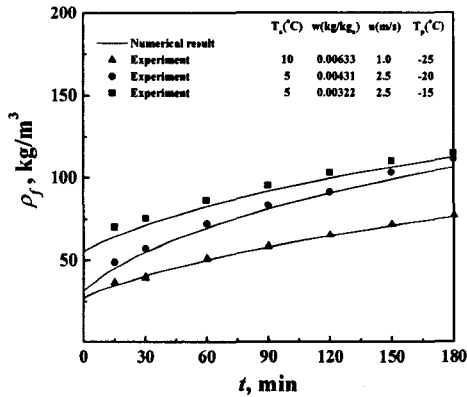


Fig. 4 Comparison of numerical results with experimental data on the average frost density

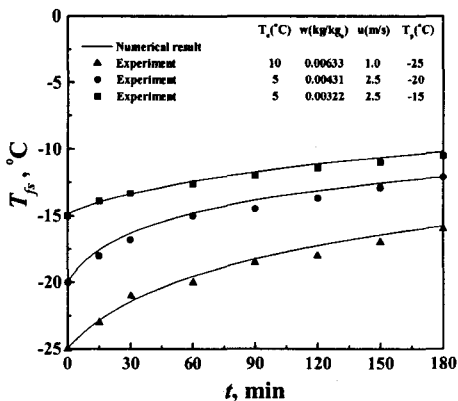


Fig. 5 Comparison of numerical results with experimental data on the average frost surface temperature

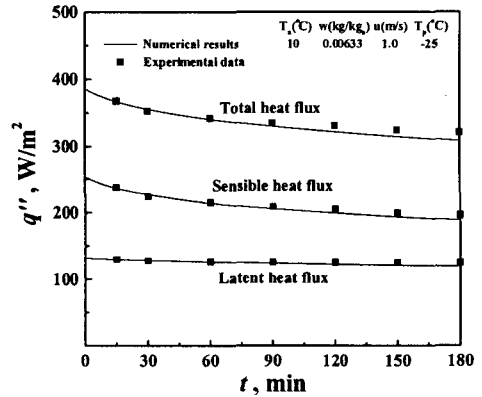


Fig. 6 Temporal variations of the sensible and latent heat fluxes

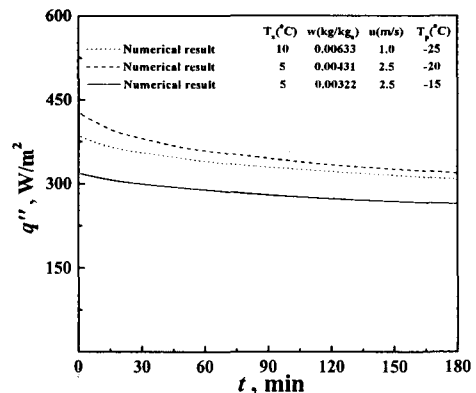


Fig. 7 Temporal variations of the heat flux with operating conditions

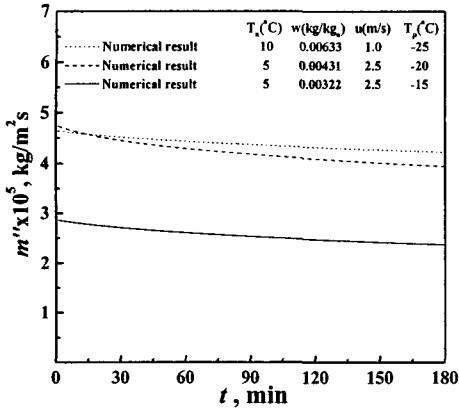


Fig. 8 Temporal variations of the mass flux with operating conditions

서리층에서 열저항의 증가로 인해 열유속이 비교적 빠르게 감소하였다. 또한, 서리층이 성장함에 따라 현열전달은 계속 감소하나 잠열전달은 거의 일정하게 유지하였다. 이는 서리층 표면온도가 상승하더라도 저온의 서리층 표면에서 포화습도의 변화가 아주 작기 때문이다.

Fig. 8은 운전 시간이 경과함에 따라 운전 조건에 따른 물질전달의 변화를 도시한 것이다. 서리층이 성장함에 따라 서리층 물성치의 증가율이 둔화되는 것을 물질전달량의 결과에서 확인할 수 있다. 또한, 서리층 표면에서의 물질전달 구배가 커서 서리층 성장에 촉진되는 조건에서는 운전시간에 따라 물질유속이 다소 빨리 감소하고 있다.

지금까지의 수치적인 연구들은 초기 서리층 밀도를 특정한 운전조건에서 실험적으로 관측하거나 수치적인 계산에 의해 임의로 사용하였다. 그러나 본 연구에서는 다양한 실험 조건에서 실험 결과를 바탕으로 중요 착상인자를 고려하여 유도된 서리층 밀도에 대한 상관식을 사용하였다. 따라서 다른 수학적 모델에 비해 대부분의 서리층 물성치를 비교적 정확하게 예측하고 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 냉각 평판에 형성되는 서리층의 성장 거동 해석을 통해 서리층에서의 열 및 물질 전달 특성을 예측하는 수학적 모델을 제시하였다. 이 때 공기층은 층류 유동으로 해석하였으며, 서리층의 성장 거동의 예측을 위해 서리층

밀도에 대한 상관식을 사용하였다. 국소적인 서리층 밀도에 대한 실험상관식은 다양한 실험 조건에서 중요 착상인자를 고려하여 유도되었으며, 이를 통해 모델 적용 범위의 제한성을 상대적으로 최소화하였다. 이로 인해 제시된 수학적 모델은 다양한 운전 조건에서 서리층 물성치와 열전달율에 대한 실험결과를 최대 9%의 오차 이내에서 잘 예측하고 있다.

## 후 기

이 연구는 한국과학재단 지정 한양대학교 최적설계신기술연구센터(iDOT)의 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) Jones, B. W. and Parker, J. D., 1975, "Frost Formation with Varying Environmental Parameters," *J. Heat Transfer*, Vol. 97, pp. 255~259.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) Sahin, A. Z., 1995, "An Analytical Study of Frost Nucleation and Growth During the Crystal Growth Period," *Heat and Mass Transfer*, Vol. 30, pp. 321~330.
- (5) Yun, R., Kim, Y. and Min, M. K., 2002, "Modeling of Frost Growth and Frost Properties with Airflow over a Flat Plate," *Int. J. Refrigeration*, Vol. 25, No. 3, pp. 362~371.
- (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) Raju, S. P. and Sherif, S. A., 1993, "Frost Formation and Heat Transfer on Circular Cylinders in Cross-Flow," *Int. J. Refrigeration*, Vol. 16, No. 6, pp. 390~401.
- (8) Ismail, K. A. R., Salinas, C. S. and Goncalves,

- M. M., 1997, "Frost Growth Around a Cylinder in a Wet Air Stream," *Int. J. Refrigeration*, Vol. 20, No. 2, pp. 106~119.
- (9) Ismail, K. A. R. and Salinas, C. S., 1999, "Modeling of Frost Formation over Parallel Cold Plates," *Int. J. Refrigeration*, Vol. 22, No. 5, pp. 425~441.
- (10) Le Gall, R., Grillot, J. M. and Jallut, C., 1997, "Modelling of Frost Growth and Densification," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, No. 13, pp. 3177~3187.
- (11) Chen, H., Besant, R. W. and Tao, Y. X., 1999, "Frost Characteristics and Heat Transfer on a Flat Plate Under Freezer Operating Conditions: Part II," Numerical Modeling and Comparison with Data, *ASHRAE Trans.*, Vol. 105, Part. 1, No. 4296, pp. 252~259.
- (12) Luer, A. and Beer, H., 2000, "Frost Deposition in a Parallel Plate Channel Under Laminar Flow Conditions," *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 39, pp. 85~95.
- (13) Lee, K. S., Jhee, S. and Yang, D. K., 2003, "Prediction of the Frost Formation on a Cold Flat Surface," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 46, No. 20, pp. 3789~3796.
- (14) 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.
- (15) Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Washington, DC, Hemisphere /McGraw-Hill.