

## 냉각평판에 형성된 서리층의 물성치

김성곤\* · 양동근\* · 이관수†

(2002년 10월 22일 접수, 2002년 12월 27일 심사완료)

## Properties of the Frost Layer Formed on a Cold Flat Surface

Sung-Gone Kim, Dong-Keun Yang, Kwan-Soo Lee

**Key Words :** Frost Properties(서리 물성치), Frost Layer(서리층), Dimensionless Correlation(무차원 상관식), Dimensional Analysis(차원해석)

### Abstract

This paper proposes dimensionless correlations predicting properties of the frost layer formed on a cold flat surface. Experiments are carried out to obtain the correlations with various environmental parameters such as air temperature, air velocity, absolute humidity, and cooling plate temperature. As a result, the frost properties (frost layer thickness, density, surface temperature, thermal conductivity) are correlated as a function of Reynolds number, Fourier number, absolute humidity and non-dimensional temperature by using a dimensional analysis. The correlations agree well with the previous and our experimental data within a maximum error of 10%, and are used to predict the frost properties in the following ranges: Reynolds number of 20216 to 53763, Fourier number of 0.1962 to 2.5128, absolute humidity of 3.22 to 8.47, and non-dimensional temperature of 0.125 to 0.5.

기호설명			
$A$	: 면적 [ $m^2$ ]	$\alpha$	: 열확산계수 [ $m^2/s$ ]
$C_p$	: 정압 비열 [ $kJ/kg \cdot K$ ]	$\nu$	: 동점성계수 [ $m^2/s$ ]
$Fo$	: Fourier 수 ( $= t/L^2$ )	$\rho$	: 밀도 [ $kg/m^3$ ]
$h_m$	: 수증기의 승화잠열 [ $kJ/kg$ ]	하첨자	
$k$	: 열전도계수 [ $W/m \cdot K$ ]	$a$	: 공기
$L$	: 길이 [ $m$ ]	$f$	: 서리층
$m$	: 질량 [ $kg$ ]	$ice$	: 얼음
$\dot{m}$	: 질량 유속 [ $kg/s$ ]	$in$	: 입구
$\dot{Q}$	: 열전달량 [ $W$ ]	$out$	: 출구
$Re$	: Reynolds 수 ( $= VL/\nu$ )	$p$	: 냉각면
$T$	: 온도 [ $K$ ]	$r$	: 냉매
$t$	: 시간 [ $s$ ]	$tot$	: 전체
$V$	: 속도 [ $m/s$ ]	$tp$	: 삼중점
$w$	: 절대습도 [ $g/kg_a$ ]		
$y$	: 두께 [ $m$ ]		

### 1. 서 론

착상현상은 냉각면과 접한 공기의 온도가 이슬점 및 빙점 이하일 때 발생하는 비정상 상태의 물리적 현상으로 공기온도, 공기속도, 절대습도 및 냉각면온도 등에 크게 영향을 받는다. 이러한 착상현상은 가정용 냉장고나 저온창고 등에 사용되는 저온용 열교환기 표면에서 발생하여 시스템의

그리스문자

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

성능을 크게 저하시키기 때문에 고효율의 열교환기 설계를 위해서는 착상 인자에 따른 서리 물성치 예측이 매우 중요하다.

서리 물성치 변화를 예측하기 위한 실험상관식들이 많은 연구자들에 의해 제시되었다. 원형관을 사용한 착상실험을 통해 Schneider<sup>(1)</sup>는 서리층 두께에 대한 실험상관식을 제시하였으나 공기속도의 영향을 무시하였고, Lee 등<sup>(2)</sup>은 저습조건에서만 적용가능한 두께 및 질량에 대한 상관식을 유도하였다. Cremers와 Mehra<sup>(3)</sup>는 서리층 성장에 대해, Sengupta 등<sup>(4)</sup>은 두께 및 밀도에 대한 실험상관식을 제시하였으나 공기온도 및 냉각면온도를 고정시킴으로써 상관식의 적용에 한계가 있다. 평판에 대한 착상실험으로 Östin과 Andersson,<sup>(5)</sup> Yonko와 Sepsy<sup>(6)</sup>는 서리층 유효 열전도계수를 밀도의 함수로 표현하였으나 밀도에 대한 상관식을 제시하지 않아 정확한 서리물성치 예측하는대는 다소 힘들다. Tokura 등,<sup>(7)</sup> Biguria와 Wenzel,<sup>(8)</sup> Lee 등<sup>(9)</sup>은 고온 조건에서만 적용가능한 서리층 두께, 밀도 및 유효 열전도계수에 관한 실험상관식을 제시하였고, Hosoda와 Uzuhashi<sup>(10)</sup>는 서리층 밀도를 다른 착상 인자들의 영향은 고려하지 않은채 냉각면온도와 공기속도만의 함수로 표현하였다. 이와 같이 기존의 연구들은 다소 한정된 실험 조건내에서 서리 물성치를 특정인자만의 함수로 표현하였으므로 일반화된 관계식을 제시하지는 못하였다.<sup>(11-10,11)</sup> 또한, 제시된 무차원 상관식도 오차가 크다는 점에 있어서 서리물성치 예측에 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 다양한 운전조건에서 착상실험을 수행하여 착상인자에 따른 서리 물성치(서리층 두께, 밀도, 표면온도, 유효 열전도계수)

변화를 예측할 수 있는 일반화된 무차원 실험상관식을 제시하고자 한다. 이 때 모든 착상인자들은 Pi 정리를 이용한 차원해석을 통해 무차원화하며, 무차원 서리물성치 상관식은 각각 Reynolds 수, Fourier 수, 절대습도 및 무차원 온도의 함수로 표현된다.

## 2. 실험장치 및 측정

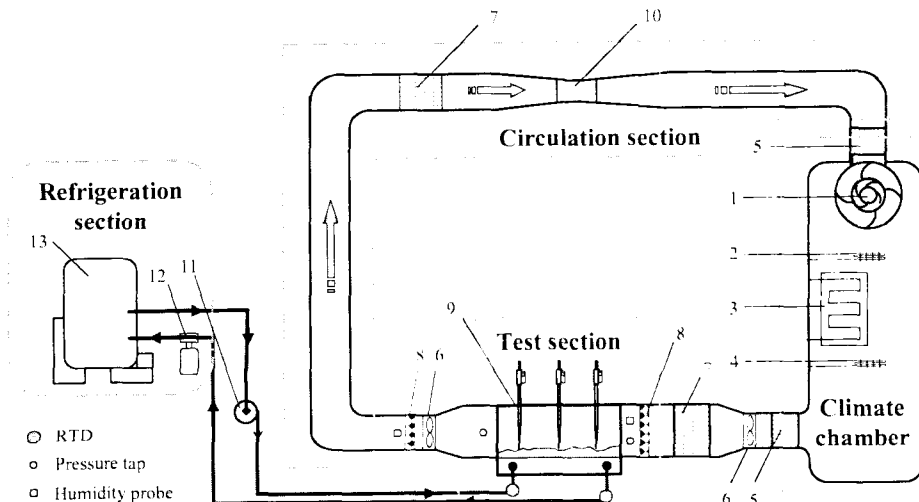
### 2.1 실험 장치

본 연구에서 사용된 착상실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같고, 실험장치는 크게 항온항습실, 순환부, 시험부, 냉각부로 구성되어 있다.

항온항습실에서 습공기의 온·습도는 Pt 100Ω의 RTD를 이용한 건·습구 온도계에 의해 감지되며, PID 제어기에 의해 건·습구 온도조절용 전기히터와 냉각기를 가동시켜 제어된다.

순환 공기를 시험부로 유입시키는 순환부는 지름이 150 mm인 원형관으로 구성되어 있으며, 공기유량을 조절하는 인버터가 부착된 송풍기와 노즐형 유량계가 부착되어 있다. 전체 순환부는 열손실을 최소화하기 위해 단열재와 비닐랩을 이용하여 4중 단열하였고, PVC 관을 사용하여 유로를 직선화함으로써 공기의 유동저항을 최소화하였다.

평판형 열교환기를 장착하는 시험부는 서리층 성장 관측을 위해 아크릴로 제작하였다. 시험부 입·출구 공기의 온·습도는 시험부 전·후방에 설치된 5개의 T-type 열전대와 세라믹 습도센서에 의해 각각 측정되었다. 균일한 공기 유입을 위해 시험



1. fan 2. air heater 3. evaporator 4. humidity heater 5. screen 6. free fan 7. honeycomb 8. thermocouple mesh  
9. micrometer gauge 10. flow nozzle 11. pump 12. flow meter 13. refrigeration unit

Fig 1 Schematic diagram of experimental apparatus

부 전방에 지름이 150 mm인 무동력 팬(fan)과 허니컴(honeycomb) 및 스크린을 설치하였다. 또한 시험부에서 공기의 압력강하는 시험부 전·후방에 4개의 압력공(pressure tap)을 설치하여 그 평균값을 압력 트랜스듀서에 의해 측정하였다.

시험부 밑면에 설치된 평판형 열교환기는 크기가 150 mm×300 mm인 알루미늄으로 제작되었으며, 표면온도의 균일한 분포를 위해 열교환기 내부는 냉매의 입·출구가 서로 엇갈린 미로형으로 구성하였다. 시험부의 상단에는 서리층 표면온도와 두께를 측정하기 위하여 크기가 43 mm×48 mm인 정사각형 홈과 지름이 10 mm인 원형 홈을 시험부 선단으로부터 각각 50 mm, 150 mm, 250 mm인 위치에 설치하였다.

냉각부는 열교환기의 표면 온도를 일정하게 유지시키는 부분으로 R-22를 사용하여 작동유체를 냉각시키는 주냉동기와 순환펌프, 작동유체의 온도를 측정하는 RTD와 질량 유량계로 구성되어 있다. 작동유체는 에틸렌글리콜과 증류수를 6:4의 질량비로 혼합한 에틸렌글리콜 수용액을 사용하였다. 작동유체의 유량은 펌프의 회전수를 조절시켜 제어하며 순환펌프의 과다한 압력상승을 방지하기 위해 bypass를 설치하였다.

## 2.2 실험 방법

실험에 앞서 시험부 표면을 메틸알코올을 사용하여 깨끗이 닦아낸 후 질량이 측정된 알루미늄 테잎을 부착한다. 실험조건이 정상상태에 이르기 전에 착상이 생기는 것을 방지하기 위해 열교환기 표면에 비닐랩을 부착한 후 항온항습기 및 냉동기를 가동한다. 시험부로 유입되는 공기의 온·습도 및 냉각면 온도가 정상상태에 도달하면 비닐랩을 제거한 후 실험을 시작한다. 시험부 입·출구의 온·습도, 냉매 입·출구 온도, 시험부에서의 압력강하량 및 속도 등의 모든 데이터는 매 4초마다 기록하였다. 서리층 표면온도, 질량, 두께 등은 실험 시작 후 15분, 30분에 측정하며 이후 30분 간격으로 3시간까지 측정하였다. 서리층 표면온도 및 두께는 비접촉식 적외선 복사 온도계와 마이크로 미터 게이지를 사용하여 각각 측정하였다. 서리층 질량은 위치별로 부착된 알루미늄 테잎을 실험 종료 후 서리가 떨어지지 않게 떼어 낸 후 10<sup>-4</sup> g까지 측정 가능한 정밀 전자 저울을 이용하여 측정하였다. 측정된 서리층 두께, 서리 질량과 표면온도를 이용하여 서리 밀도 및 유효 열전도 계수를 다음과 같이 각각 계산한다.

Table 1 Uncertainties of frost properties

Frost properties	Uncertainty(%)
Frost thickness	5.28
Frost density	6.59
Frost surface temperature	4.61
Frost thermal conductivity	6.92

$$\rho_f = \frac{m_f}{A_{tot} y_f} \quad (1)$$

$$k_{f,eff} = \frac{\dot{Q}_{tot}}{A_{tot} (T_f - T_p) / y_f} \quad (2)$$

공기측 열전달량은 공기의 질량유량과 시험부 입·출구의 온도차 및 절대습도차를 이용하여 다음 식으로 표현된다.

$$\dot{Q}_{tot} = \dot{m}_a C_{p,a} (T_{a,in} - T_{a,out}) + \dot{m}_a h_{sv} (w_{a,in} - w_{a,out}) \quad (3)$$

여기서  $C_{p,a}$ 와  $h_{sv}$ 는 각각 공기의 정압비열과 수증기의 승화잠열이다. 냉매측 열전달량은 다음과 같은 식으로 표현되며, 공기측과 냉매측의 에너지 평형은 ASHRAE Standard 33-78에 의해 5%이내로 유지하였다.

$$\dot{Q}_r = \dot{m}_r C_{p,r} (T_{r,in} - T_{r,out}) \quad (4)$$

실험을 통해 측정된 데이터의 불확실도는 측정 장치의 바이어스 오차와 정밀도 오차로부터 계산하였으며 Table 1에 제시하였다.<sup>(12)</sup>

## 3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 착상인자의 변화에 따른 서리물 성치에 대한 예측 상관식을 얻기 위해 Table 2에 열거된 조건하에서 착상 실험을 수행하였다. 실험 계획법에 의해 설정된 실험조건들은 21가지이며, 시간에 따른 반복실험을 통해 총 294회의 실험을 수행하였다. 일반화된 상관식 유도를 위해 서리물성치를 Pi정리를 이용한 차원해석을 통해 착상인자들로 구성된 무차원 변수들로 표현하였다. 즉,

$$f(y_f^*, \rho_f^*, T_f^*, k_f^*, w, T^*, Re_L, Fo) = 0 \quad (5)$$

Table 2 Test conditions

No.	Air temperature (°C)	Air velocity (m/s)	Air humidity (g/kg <sub>a</sub> )	Cooling plate temperature (°C)
1	5	1.0	3.22	-35
2	5	1.0	3.22	-15
3	5	1.0	4.31	-35
4	5	1.0	4.31	-15
5	5	2.5	3.22	-35
6	5	2.5	3.22	-15
7	5	2.5	4.31	-35
8	5	2.5	4.31	-15
9	10	1.0	4.31	-25
10	10	1.0	6.33	-25
11	10	1.75	6.33	-25
12	10	1.75	4.31	-25
13	10	1.75	6.33	-15
14	15	1.0	6.33	-35
15	15	1.0	6.33	-15
16	15	1.0	8.47	-35
17	15	1.0	8.47	-15
18	15	2.5	6.33	-35
19	15	2.5	6.33	-15
20	15	2.5	8.47	-35
21	15	2.5	8.47	-15

여기서  $y_f^*$ ,  $\rho_f^*$ ,  $T_f^*$ ,  $k_f^*$ ,  $T^*$  는 각각  $y_f/L$ ,  $\rho_f/\rho_{ice}$ ,  $T_f - T_{tp}/T_a - T_p$ ,  $k_{f,eff}/k_{ice}$ ,  $T_a - T_{tp}/T_a - T_p$  이다.

식(5)에서 보는 바와 같이 서리층 두께, 밀도, 표면온도, 유효 열전도계수 등의 서리물성치에 대한 무차원 상관식은 각각 절대습도, 무차원온도,  $Re_L$  수, 무차원시간의 함수로 표현된다. 모든 상관식은 최소자승법을 사용하여 유도하였으며, 제안된 모든 상관식의 적용범위는  $20216 \leq Re_L < 53763$ ,  $0.1962 \leq Fo \leq 2.5128$ ,  $3.22 \leq w \leq 8.47$ ,  $0.125 \leq T^* \leq 0.5$  이다.

3.1 서리층 두께와 밀도

서리층 두께 성장을 예측하기 위해 많은 연구자들이 실험 상관식을 제시하였다.<sup>(1-4,7,9-10)</sup> 하지만, 제시된 식의 형태가 복잡하고, 일반화 되어 있지 않아 정확한 서리층 성장 예측에 다소 한계가 있다. 본 연구에서는 서리층 두께를 평판의 길이에 대한 서리층 두께비로 무차원화 하였으며 그 식은 다음과 같다.

$$y_f^* = y_f/L = 1.758 \times 10^{-5} (Re_L)^{0.193} (Fo)^{0.573} (w)^{1.738} \times (T^*)^{1.029} \quad (6)$$

Fig. 2는 식 (6)과 실험 측정값을 비교하여 도시하였다. 제안된 서리층 두께에 대한 무차원 상관식은 실험값과 오차범위 10% 이내에서 잘 일치한다.

Fig. 3에서는 서리층 두께에 대해 기존 연구자들

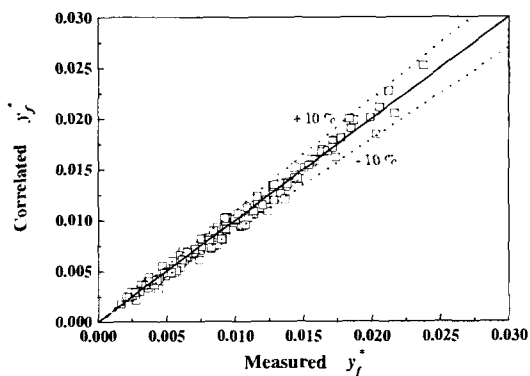


Fig. 2 Comparison of the measured and correlated data on the dimensionless frost layer thickness

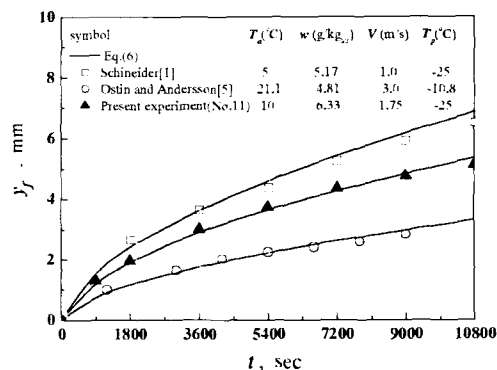


Fig. 3 Temporal variations of frost layer thickness with various conditions

의 실험결과와 제시된 상관식 결과를 비교하였다. 무차원 서리층 두께 상관식은 Schneider,<sup>(1)</sup> Östlin과 Andersson<sup>(5)</sup>의 실험결과값을 5% 이내의 오차범위에서 잘 예측하고 있다.

서리층 밀도는 얼음과 서리층의 밀도비로 무차원화하였으며, 예측상관식은 다음 식과 같다.

$$\rho_f^* = \frac{\rho_f}{\rho_{ice}} = 1.957 \times 10^{-3} (Re_L)^{0.351} (Fo)^{0.311} \times (w)^{-0.368} (\exp(T^*))^{2.400} \quad (7)$$

서리층 밀도는 공기온도와 냉각면온도의 변화에 큰 영향을 받으므로 상관식의 무차원 온도항에 지수를 취하여 상관식을 유도하였다.

Fig. 4와 Fig. 5에서는 서리층 밀도에 대해 실험 측정값 및 기존의 연구결과와 비교하여 도시하였다. 제안된 무차원 상관식은 10% 오차범위 내에서 실험값과 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 Fig. 5에서 보

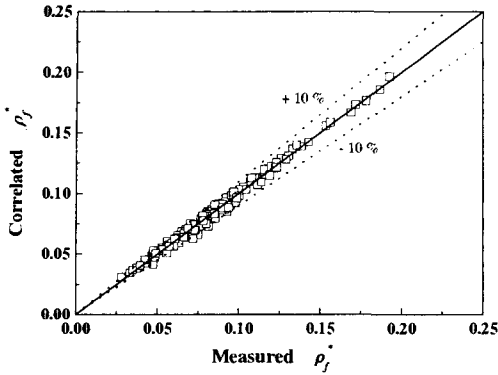


Fig. 4 Comparison of the measured and correlated data on the dimensionless frost layer density

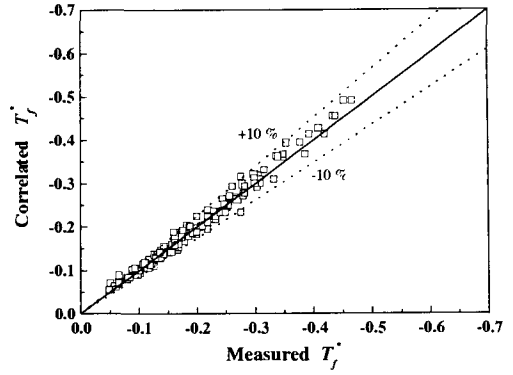


Fig. 6 Comparison of the measured and correlated data on the dimensionless frost surface temperature

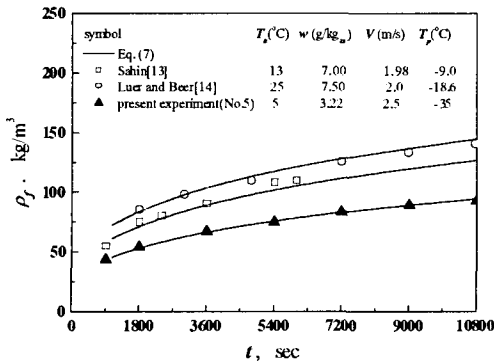


Fig. 5 Temporal variations of frost layer density with various conditions

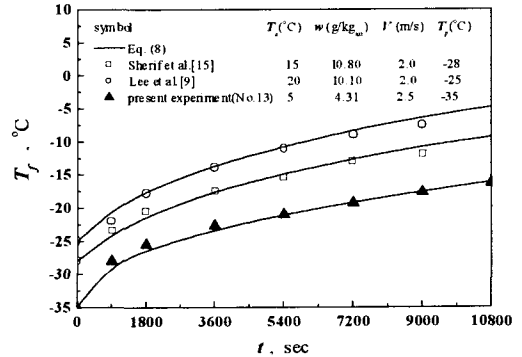


Fig. 7 Temporal variations of frost surface temperature with various conditions

는 바와 같이 제안된 서리층 밀도 예측상관식은 Sahin,<sup>(13)</sup> Luer 와 Beer<sup>(14)</sup>의 실험값과 4% 이내의 오차범위에서 잘 일치한다.

3.2 서리층 표면온도

무차원 변수로 이루어진 서리층 표면온도에 대한 상관식은 다음과 같다.

$$T_f^* = \frac{T_f - T_p}{T_a - T_p} = -1 + T^* + 1.518 \times 10^{-4} (\text{Re}_L)^{0.538} \times (\text{Fo})^{0.425} (w)^{1.560} (\exp(T^*))^{-3.386} \quad (8)$$

서리층 표면온도는 다른 착상인자들에 비해 냉각면온도의 영향을 크게 받으므로 서리층 밀도 상관식과 마찬가지로 무차원 온도항에 지수를 취하여 상관식을 유도하였다.

Fig. 6은 무차원 서리층 표면온도의 실험 측정값과 상관식을 이용해 구한 계산값을 비교하였으며, 제시된 무차원 상관식은 서리층 표면온도를 10%

의 오차범위 내에서 잘 예측한다.

착상 초기 서리층의 급격한 성장과 함께 표면온도는 상승한다. 이는 서리층 성장 초기에 밀도의 증가보다는 서리층 성장이 빠르기 때문이다.

Fig. 7에서는 본 연구에서 제시한 무차원 표면온도 상관식과 기존 연구자들의 실험결과를 비교하였다. 제시된 표면온도에 대한 무차원 상관식은 Sherif 등<sup>(15)</sup>의 결과와는 3% 이내의 오차범위 내에서 잘 일치하며, Lee 등<sup>(9)</sup>의 결과와는 5% 이내에서 잘 예측한다.

3.3 서리층 유효 열전도계수

서리층 유효 열전도계수는 밀도가 증가할수록 큰 값을 갖는다. 기존의 연구자들<sup>(6-6,11)</sup>은 열전도계수를 밀도만의 함수로 표현하였다. 그러나 서리층 밀도는 착상인자들의 함수이므로 유효 열전도계수 역시 모든 착상인자들의 함수로 나타내어야 한다. 유효 열전도계수는 얼음과 서리층 열전도계수의 비로 무차원화하였으며 무차원 상관식은 다음과 같다.

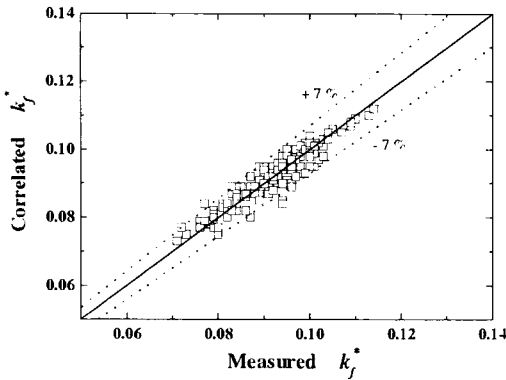


Fig. 8 Comparison of the measured and correlated data on the dimensionless thermal conductivity

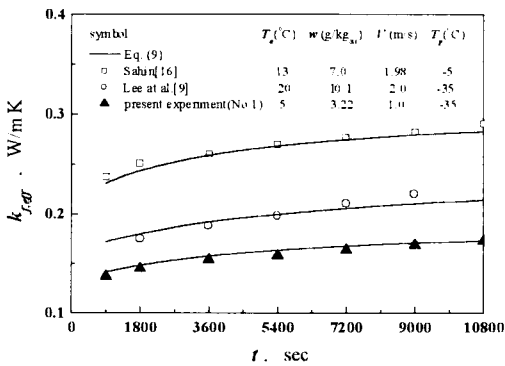


Fig. 9 Temporal variations of frost thermal conductivity with various conditions

$$k_f^* = \frac{k_f}{k_{ice}} = 2.144 \times 10^{-2} (\ln Re)^{0.619} (Fo)^{0.084} \times (w)^{-0.086} (\exp T)^{0.512} \quad (9)$$

유효 열전도계수는 서리층 밀도와 마찬가지로 공기속도 및 냉각면온도의 영향을 많이 받으므로 무차원 속도항에 로그를, 무차원 온도항에는 지수를 취하여 상관식을 유도하였다.

Fig. 8은 식 (9)을 사용하여 계산된 유효 열전도계수 값과 실험값을 비교하였다. 제안된 무차원 상관식은 7%의 오차범위 내에서 유효 열전도계수 값을 잘 예측한다.

Fig. 9는 시간에 따른 유효 열전도계수의 변화를 도시하였다. 시간이 경과함에 따라 유효 열전도계수 값은 증가한다. 그림에서 보듯이 제안된 서리층 유효 열전도계수에 대한 무차원 상관식은 Sahin<sup>(16)</sup>과 Lee 등<sup>(9)</sup>의 실험 결과를 오차범위 4% 이내에서 잘 예측하고 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 냉각면을 가진 수평평판에서 공기온도, 공기속도, 절대습도, 냉각면 온도를 변화시켜 착상실험을 수행하였다. 시간에 따른 서리층 두께, 표면온도, 밀도 및 유효 열전도계수의 변화를 살펴보고, 이를 예측할 수 있는 무차원 실험상관식을 제시하였다. 일반화된 상관식을 제시하기 위해 착상인자들은 Pi 정리를 이용한 차원해석을 통해 무차원화 하였고, 서리 물성치를 무차원변수인 Re 수, 절대습도, 무차원 시간 및 무차원 온도 의 함수로 표현하였다. 제시된 서리물성치에 대한 예측 상관식들의 적용범위는  $20216 < Re_L < 53763$ ,  $0.1962 \leq Fo \leq 2.5128$ ,  $3.22 < w < 8.47$ ,  $0.125 \leq T^* \leq 0.5$ 이며, 기존 연구자들의 결과 및 본 실험 결과와 최대 10% 이내의 오차범위에서 잘 일치한다.

#### 후 기

이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2001-041-E00106).

#### 참고문헌

- (1) Schneider, H. W., 1978, "Equation of the Growth Rate of Frost Forming on Cooled Surfaces," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 21, pp. 1019~1024.
- (2) Lee, Y. B., Ryu, I. S. and Ro, S. T., 2002, "The Effect of Environmental Parameters on Frost Formation on a Horizontal Cylinder," *Trans. of KSME*, Vol. 26, No. 2, pp. 253~260.
- (3) Cremers, C. J. and Mehra, V. K., 1980, "Frost Formation on Vertical Cylinders in Free Convection," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 104, No. 1, pp. 3~7.
- (4) Sengupta, S., Sherif, S. A. and Wong, K. V., 1998, "Empirical Heat Transfer and Frost Thickness Correlations during Frost Deposition on a Cylinder in Cross-Flow in the Transient Regime," *Int. J. Energy Res.*, Vol. 22, pp. 615~624.
- (5) Östin, R. and Andersson, S., 1991, "Frost Growth Parameters in a Forced Air Stream," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 14, No. 4/5, pp. 1009~1017.
- (6) Yonko, J. D. and Sepsy, C. E., 1967, "An Investigation of the Thermal Conductivity of Frost while Forming on a Flat Horizontal Plate," *ASHRAE Trans.*, Vol. 73, No. 2, pp. 1.1~1.11.
- (7) Tokura, I., Saito, H. and Kishinami, K., 1983, "Study on Properties and Growth rate of Frost Layers on Cold Surfaces," *J. Heat Transfer*, Vol. 105, pp. 895~901.
- (8) Gabriel Biguria and Leonard A. Wenzel, 1970, "Measurement and Correlation of Water Frost Thermal Conductivity and Density," *I&EC Fundamentals*, Vol.

- 9, No. 1, pp. 129~138.
- (9) Lee, K. S., Kim, Y. C. and Jhee, S., 2001, "Correlation of Frost Properties Considering the Environmental Parameters over a Cold Flat Plate," *Trans. of KSME*, Vol. 8, No. 25, pp. 1046~1052.
- (10) Hosoda, T. and Uzuhashi, H., 1967, "Effects of Frost on the Heat Transfer Coefficient," *Hitachi review*, Vol. 16, No. 6, pp. 254~259.
- (11) Lee, K. S., Lee, T. H. and Kim, W. S., 1994, "Heat and Mass Transfer of Parallel Plate Heat Exchanger under Frosting Condition," *SAREK Journal*, Vol. 6, No. 2, pp. 155~165.
- (12) Kline, S. J., 1985, "The Purposes of Uncertainty Analysis," *ASME J. Fluid Engineering*, Vol. 107, pp. 153~160.
- (13) Sahin, A., Z., 1991, "Density of Frost Layer during the Crystal Growth Period," *The Arabian J. for Science and Engineering*, Vol. 16, pp. 485~493.
- (14) Lüer, 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.
- (15) Sherif, S., A., Raju, S. P., and Padki, M. M., 1990, "A Semi-Emperical Transient Method for Modeling Frost Formation on a Flat Plate," *ASHRAE Trans.*, Vol. 139, pp. 15~23.
- (16) Sahin, A., Z., 2000, "Effective Thermal Conductivity of Frost During the Crystal Growth Period," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 539~553.