

수평평판에서의 착상인자를 고려한 서리 물성치의 상관식

이관수* · 김용철** · 지 성†
(2000년 12월 13일 접수, 2001년 5월 23일 심사완료)

Correlations of Frost Properties Considering the Environmental Parameters over a Cold Flat Plate

Kwan-Soo Lee, Yong-Chul Kim and Sung Jhee

Key Words: Frost Surface Temperature(서리층 표면 온도), Frost Thickness(서리층 두께), Frost Density(서리층 밀도), Frost Thermal Conductivity(서리층 열전도 계수)

Abstract

This study has been performed experimentally to measure the frost properties over a cold flat plate in order to obtain the correlations of the frost properties with various environmental parameters. Correlations of the frost surface temperature, thickness, density, and thermal conductivity are presented along with the experimental results as a function of environmental parameters, distance from the leading edge of test plate, and time. These correlations can be used to predict the frost properties with a maximum error of 8% in the following ranges : air temperature 15 ~ 25°C, relative humidity 60 ~ 80%, air velocity 1~3 m/s and cooling plate temperature -15 ~ -25°C.

———— 기호설명 ————	
A	: 열교환기 면적 [m^2]
C_p	: 비열 [kJ/kgK]
h_{sv}	: 수증기의 승화잠열 [kJ/kg]
k	: 열전도 계수 [$W/m^{\circ}C$]
l	: 평판 입구에서의 거리 [m]
m	: 질량 [kg]
\dot{m}	: 질량유량 [kg/s]
\dot{Q}	: 에너지 전달량 [W]
T	: 온도 [K]
t	: 시간 [h]
v	: 유속 [m/s]
w	: 절대습도 [kg_w/kg_a]
X	: 두께 [mm]

그리스문자	
Δ	: 차이
ρ	: 밀도 [kg/m^3]
하첨자	
a	: 공기
al	: 알루미늄 테이프
f	: 서리
in	: 유입
out	: 유출
p	: 냉각면
r	: 냉매
s	: 서리층 표면

1. 서 론

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

착상에 의하여 생성된 다공성의 서리는 공기와 열교환기 사이의 열저항으로 작용하여 열전달량을 감소시키고 유로를 폐쇄시켜 열교환기 성능을 저하시킨다. 지금까지의 연구에서 서리층 두께와

밀도가 서리의 열저항이나 열전도 계수에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 운전 인자에 따른 서리 물성치 변화는 열교환기를 설계하는데 있어서 중요한 요소로 작용하며, 서리층 두께와 서리층 밀도에 관한 예측이 필요하다. 그러나 기존의 연구들은 착상인자들을 모두 고려하여 실험식을 만들지 않았으며, 실험 없이 서리층 성장 데이터를 얻는데 다소 어려움이 있다. 또, 특정 열교환기에서 실험한 데이터가 대부분이어서 일반적인 설계에 적용할 수 있는 유용한 실험 자료가 절대적으로 부족한 실정이다.

Schneider⁽¹⁾는 서리층 두께를 공기 온도, 공기의 증기 분압, 포화 증기의 증기압, 서리층 표면 온도, 서리 표면에서의 포화증기압의 함수로 나타내었으나 서리층 표면 온도를 측정해야 하는 불편이 따른다. Hayashi 등⁽²⁾은 스테인레스강 평판을 항온항습실에 설치한 후, 일정한 시간 간격마다 서리의 표면 온도, 공기 온도 및 속도, 열유속, 서리층의 두께를 측정하였다. 강제대류 조건하에서 이루어진 실험으로부터 서리 밀도를 서리층 표면 온도의 함수로서 제시하였다. 그러나 서리층 밀도를 계산하기 위해서는 서리층 표면 온도를 실험에 의해 측정해야만 한다. 서리층 열전도 계수의 경우 Marinyuk⁽³⁾는 표면 온도가 0 ~ -40℃로 유지되는 얇은 원통에서의 착상에 관한 실험을 수행하여 서리 밀도 60 ~ 300 kg/m³의 범위에서 서리의 열전도 계수를 서리의 밀도와 서리층 표면 온도 그리고 냉각면 온도의 함수로서 나타내었다. 이 밖에 여러 연구자들^(4~10)이 각각 다른 실험 조건하에서 열전도 계수에 관한 실험식을 밀도만의 함수로 나타내었으나 연구자 별로 상이한 결과값을 나타내고 있다. 이는 실험 조건이 다른 상태에서 착상 인자들을 모두 고려하지 않은 채 밀도만의 함수로 열전도 계수를 나타내었기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 기존 연구의 문제점을 해결하기 위하여 일반적인 열교환기 설계에 적용할 수 있는 일정유량, 일정유속하에서의 착상 실험을 수행하고, 실험 데이터를 이용해 모든 착상인자를 고려하여 서리층 표면 온도, 두께, 밀도, 열전도 계수에 관한 실험식을 얻고자 한다. 또한 이를 통하여 실험 조건만 주어지면 실험 없이 공학자나 수치 연구자들이 유용하게 사용할 수 있는 데이터를 제공하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험 장치

본 연구에서 사용된 착상 실험 장치는 Fig. 1과 같이 공기를 순환시키는 순환부, 순환되는 습공기의 온·습도를 조절하는 항온항습실, 열교환기 냉각면의 온도를 조절하는 냉각부, 열교환기를 장착하여 착상 현상을 관찰하는 시험부 등 4부분으로 구성되어 있으며, 각 부분을 독립적으로 제어할 수 있도록 하였다.

순환부(circulation section)는 항온항습실에서 제어된 공기를 시험부에 유입시키고 시험부로 부터 유출된 공기를 다시 항온항습실로 귀환시키는 역할을 하는 부분이다. 순환부내에는 인버터가 부착된 송풍기를 설치하여 순환부를 순환하는 공기의 유량을 조절하고 그 유량은 노즐형 유량계로 차압을 측정하여 구하였다. 또 항온항습실 입·출구에는 스크린을 설치하고 시험부 입구측에 허니컴(honeycomb)을 설치하여 공기의 순환을 균일하게 하였다. 입·출구에서 온도 및 습도를 균일하게 섞기 위하여 150×150 mm 정방형 유로를 50×50 mm로 축소하고 무동력 팬(air mixer)을 설치하였다.

항온항습실(climate chamber)은 시험부로 유입되는 공기의 온도와 습도를 조절하는 곳이다. 항온항습실 내의 온도와 습도는 Pt 100 Ω의 RTD를 이용한 건·습구 온도계에 의해 감지되고 PID 제어기에 의해 건·습구 조절용 히터와 냉각기를 제어하여 조절된다. 이 항온항습실을 사용하여 공기 온도는 0 ~ 71℃, 공기 습도는 30 ~ 98%의 범위로 조절할 수 있다.

냉각부(cooling section)는 시험부 내에 있는 열교환기의 온도를 설정한 온도로 유지시키는 부분으로 냉매를 냉각시키는 냉동기와 냉매를 순환시키는 펌프로 구성되어 있다. 냉매는 에틸렌글리콜과 증류수를 6:4로 혼합한 에틸렌글리콜 수용액을 사용하였고, 유량은 유량계로부터 나온 신호를 피드백(feedback)하여 펌프의 회전수를 변화시켜 조절하였다. 과도한 압력상승에 대비하기 위하여 순환 펌프에 바이패스(bypass)를 설치하였다. 냉각면의 온도를 균일하게 하기 위하여 Fig. 2처럼 수평 평판의 냉매유로를 입·출구의 방향이 서로 반대인 두 개의 미로형태로 구성하여 냉각면의 온도차가 0.1℃ 이하로 유지되도록 하였다.

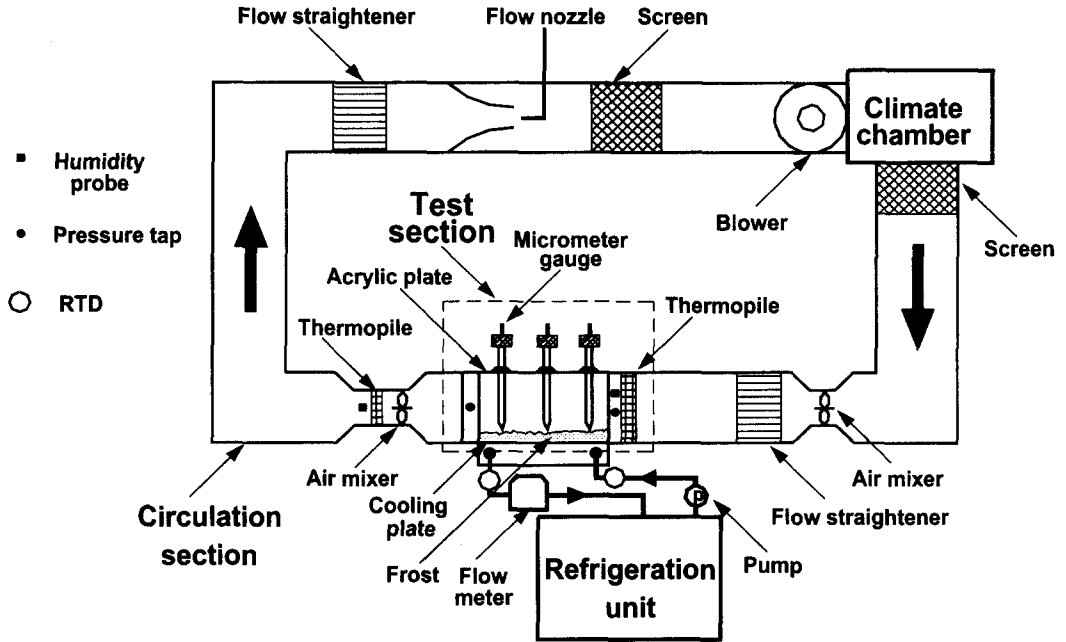


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus used in this study

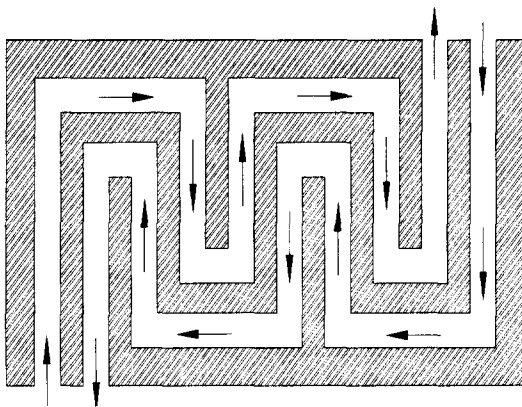


Fig. 2 The path of coolant flow through the test plate

시험부(test section) 입구의 공기 온도는 T형 열전대를 이용하여 5개소, 출구 공기 온도는 4개소의 온도를 평균하였다. 공기의 습도는 각각 시험부 입·출구에 장착된 세라믹 습도센서를 이용하여 측정하였다. 또한 시험부 전후의 공기의 압력 강하는 시험부 입·출구에 각각 지름 2 mm의 압력공(壓力孔)을 4개씩 설치하고 그 평균값을 차압변환기(differential pressure transducer)에 의하여

Table 1 Calculated uncertainties of determined parameters

Parameter	Uncertainty(%)
Frost surface temperature	5.19
Frost thickness	5.55
Frost mass	4.15
Frost density	5.72
Frost thermal conductivity	5.80

측정하였다. 시험부의 밑면은 300×150 mm의 알루미늄 판으로 되어 있으며 높이는 150 mm이다. 시험부의 옆면과 윗면은 20 mm 두께의 아크릴 수지로 되어 있으며 입구로부터 50, 150, 250 mm에서 각각 적외선 온도계를 이용하여 온도를 측정할 수 있도록 48×43 mm의 사각형 구멍과 디지털 마이크로미터를 이용한 서리층 두께 측정을 위하여 지름 10 mm의 구멍을 뚫었다. 또 시험부 앞 부분을 제외한 모든 부분은 외부로부터의 열 손실을 막기 위하여 단열을 하였다.

Table 1에는 측정 장치들의 바이어스 오차와 정밀도 오차로부터 계산한 실험 결과의 불확실도

를 나타냈다. 불확실도의 계산은 기준 실험 조건 (입구 공기 온도 20℃, 상대습도 70%, 유속 2m/s, 냉각면 온도 -20℃)에서 실험한 데이터를 기준으로 계산하였다.

2.2 실험 방법

실험에 앞서 냉각면을 깨끗이 닦아 낸 후 무게를 측정된 알루미늄 테이프를 측정위치에 부착한다. 실험은 먼저 입구 공기 및 냉각면을 실험 조건으로 조절하기 위하여 향온항습기와 냉각부를 가동하며, 정상 상태에 도달하기 전에 수평 평판 열교환기의 표면에 착상이 되는 것을 막기 위하여 열교환기의 냉각면에 비닐 랩(vinyl wrap)을 씌워 둔다. 수평 평판 열교환기의 냉각면의 온도와 향온항습실에서 시험부로 유입되는 공기의 온·습도가 정상상태에 도달하였을 때 랩(wrap)을 제거하고 착상 실험을 시작한다.

시험부 각 위치의 서리층 두께(X_f)는 시험부에 마이크로미터(micrometer)의 탐침을 삽입하여 측정하였다. 서리의 질량(m_f)을 측정하기 위하여 위치에 따라 열교환기 표면에 알루미늄 테이프(너비 49.5 mm)를 부착하였고, 실험 종료후에 서리가 떨어지지 않게 알루미늄 테이프를 떼어낸 후 종이컵에 넣어 정밀 전자저울을 이용하여 무게를 측정된 후 종이컵 무게와 알루미늄 테이프의 무게를 빼서 서리의 질량을 측정하였다. 이로부터 서리 밀도는 다음과 같이 계산하였다.

$$\rho_f = \frac{m_f}{A_{al} X_f} \quad (1)$$

서리층 표면 온도($T_{f,s}$)는 적외선 복사 온도계를 사용하여 측정하였고, 열전도 계수는 다음의 식을 사용하여 계산하였다.

$$k_f = \frac{\dot{Q}}{A_p (T_{f,s} - T_p) / X_f} \quad (2)$$

공기 입·출구 온도, 습도, 유속, 냉매 입·출구 온도, 질량유량, 냉각면 온도는 데이터 기록계를 이용하여 12초마다 기록하였고, 서리층 표면 온도, 서리층 두께, 서리질량, 서리 밀도는 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 시간에 각각 측정하였다.

공기측 열전달량은 시험부 입·출구 공기 온도

차와 습도차, 유량을 이용하여 다음과 같은 식으로 구한다.

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

식 (3)의 우변의 첫 번째 항은 현열에 의한 열전달량이고, 두 번째 항은 잠열에 의한 열전달량이다. 또, 냉매측 열교환량은 다음식으로 표현된다.

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

전체 실험에서 공기측과 냉매측의 에너지 평형(energy balance)은 ASHRAE Standard 33-78에서 제시된 바와 같이 5% 내로 유지되었다.

3. 결과 및 고찰

이 연구에서는 착상현상이 수평 평판 열교환기의 성능에 미치는 영향을 조사하기 위하여 Table 2에 제시한 실험범위에 대해서 실험을 수행하고 서리층의 열전달 특성을 지배하는 서리층 표면 온도, 두께, 밀도, 열전도 계수 등을 측정하여 수식화하였다. 이 때 서리층의 두께에 비해 유로를 상당히 크게 하여 시험 시간 동안 유속과 유량의 변화가 없는 조건하에서 각각의 조건(입구 공기 온도, 습도, 유속, 냉각면 온도)을 변화시켜 실험을 수행하였다.

3.1 서리층 두께

Schneider,⁽¹⁾ Hayashi 등,⁽²⁾ O'Neal⁽⁴⁾의 연구자들은 서리층 두께나 서리층 밀도를 서리층 표면 온도에 관한 실험식을 구성하였다. 그러나 서리층

Table 2 Experimental conditions

Classification	Scope
Temperature	15 ~ 25℃
Humidity	60 ~ 80%
Cooling plate temperature	-15 ~ -25℃
Air velocity	1 ~ 3 m/s

표면 온도의 경향만 보였을 뿐 실험식을 제시하지 않아 실험 조건이 바뀌었을 때 서리층 표면 온도를 예측할 수 없었다. 본 연구에서는 이를 해결하기 위하여 착상 인자들의 변화에 따른 실험을 통하여 서리층 표면 온도의 데이터를 얻었다. 이 실험 데이터로부터 착상 인자들[입구 공기 온도(T_a), 절대습도(w), 유속(v), 냉각면 온도(T_p), 선단에서의 거리(l), 시간(t)]을 모두 고려하여 구성한 서리층 표면 온도에 관한 실험식은 다음과 같다.

$$T_{f,s} = T_p + \left(\frac{T_a}{T_p}\right)^2 \times 18000w \times \ln(1 + 2wt) \times (-56.68 + 0.48T_p - 0.001T_p^2) \times (0.97 - 0.28v + 0.15v^2) \times (1.5 - 4.8l + 7.5l^2) \quad (5)$$

여기서, 온도 변수들의 단위는 K이다.

Fig. 3은 수평 평판 열교환기의 평균 서리층 표면 온도에 대한 식 (5)의 결과와 실험 데이터가 5% 이내에서 일치함을 보여주고 있다. 또 Sherif 등⁽¹¹⁾의 실험 조건을 식 (5)에 대입하여 계산한 결과와 실험 데이터는 8% 내에서 일치하였다.

서리층 두께는 식 (5)의 서리층 표면 온도와 다

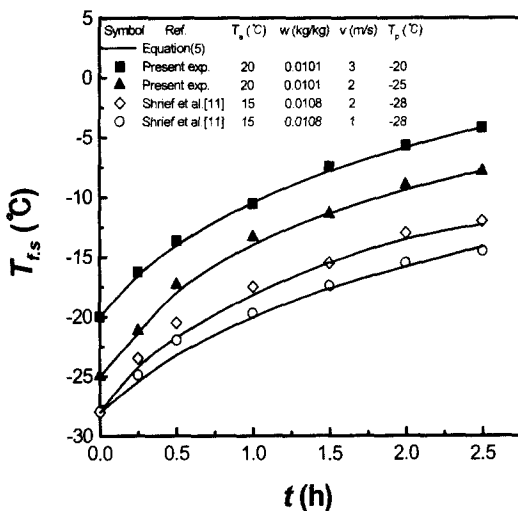


Fig. 3 Comparison of the result from equation (5) and experimental data for frost surface temperature

른 착상 인자들을 이용하여 실험식 (6)을 구성하였다. 착상 인자 중에 입구 공기 온도의 영향이 상대적으로 작게 나타났다.

$$X_f = 0.25 \times (1000w)^{(897.18 - 5.99T_a + 0.01T_a^2)} t^{0.12} \Delta T^{0.42} \times (344.04 - 2.52T_a + 0.0046T_a^2) \times (395.17 - 3.08T_p + 0.006T_p^2) \times (0.78 + 0.19v - 0.043v^2) \quad (6)$$

여기서, ΔT 는 서리층 표면 온도($T_{f,s}$)와 냉각면 온도(T_p)의 차이이다.

Fig. 4는 수평 평판 열교환기의 평균 서리층 두께를 실험 데이터와 계산값을 비교한 것이다. 시험 조건이 바뀌었을 때 실험 데이터가 식 (6)의 결과와 5% 이내에서 잘 일치함을 보여주고 있다. 또한 Yonko와 Sepsy⁽⁹⁾의 실험 조건을 식 (6)에 대입하여 얻은 결과와 실험 데이터를 비교한 경우 본 연구의 실험범위를 벗어난 조건에서는 13.5%의 오차를 나타내었으나 실험범위 내에 있는 실험 조건에서는 약 5.5% 내에서 일치하였다.

3.2 서리층 밀도

서리층 밀도는 여러 착상 인자들 중에 입구 공기 온도의 영향을 많이 받았으며, 입구 공기 습

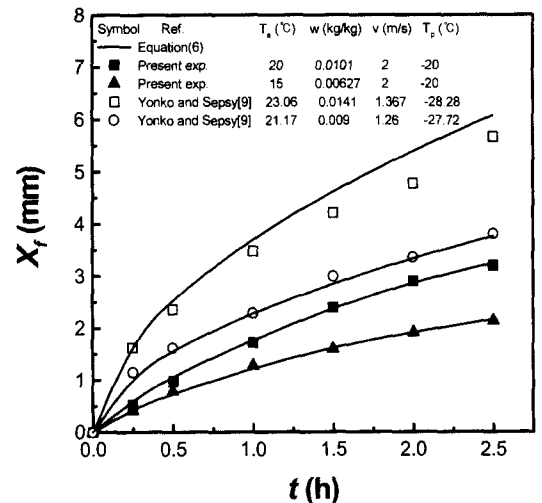


Fig. 4 Comparison of the result from equation (6) and experimental data for frost thickness

도의 영향은 상대적으로 적었다. 실험을 통해 얻은 서리층 밀도 데이터를 이용해 구한 실험식은 다음과 같다.

$$\rho_f = 2.1t^{(5423.64 - 36.06T_a + 0.067T_a^2)w} \times (-35109 + 237.2T_a - 0.4T_a^2) \times (20.99 - 0.1356T_a + 0.00023T_a^2)^{(1000w)^2/2.5} \times (-236.52 + 1.8496T_p - 0.0036T_p^2) \times (0.53 + 0.35v - 0.055v^2) \times (1.4 - 3.2l + 3.5l^2) \quad (7)$$

Fig. 5는 수평 평판 열교환기의 평균 서리층 밀도와 실험 데이터를 비교한 것으로 식 (7)의 결과가 5% 이내에서 일치함을 보여주고 있다. 또 Ostin와 Andersson⁽⁷⁾의 실험 조건과 Hayashi 등⁽²⁾의 실험 조건을 식 (7)에 대입하여 얻은 결과와 실험 데이터를 비교한 결과 5% 내에서 일치하였다.

3.3 서리층 열전도 계수

서리층 열전도 계수는 밀도와 거의 비슷한 경향을 나타내었다. 즉, 밀도가 높을수록 서리층 열전도 계수도 높게 나왔다. 이는 밀도가 높을

수록 서리층내에 열전도 계수가 낮은 공기의 함량이 적기 때문이다. 실험에 의한 서리층 열전도 계수의 자료를 이용해 얻은 실험식은 다음과 같다.

$$k_f = 0.001 \rho^{0.7} t^{0.2} (100w)^{0.3} \times (320.14 - 2.09T_a + 0.0034T_a^2) \times (168.18 - 1.32T_p + 0.0026T_p^2) \times (9.13 - 3.35v + 0.91v^2) \quad (8)$$

수식에 의해 구해진 서리층 열전도 계수는 냉각면 전체의 열전달량으로 계산했기 때문에 냉각면 전체의 서리 평균 열전도 계수이다. 대부분의 연구자들⁽⁴⁻¹⁰⁾이 서리층 열전도 계수를 밀도만의 함수로 나타내었는데 본 연구에서는 서리 밀도, 시간, 입구 공기 온·습도, 냉각면 온도, 공기 유속의 함수로 열전도 계수를 나타내어 실험 조건에 따라 정확한 열전도 계수를 얻고자 하였다.

Fig. 6은 수평 평판 열교환기의 평균 서리층 열전도 계수에 대한 식 (8)의 결과가 실험 데이터와 5% 이내에서 일치함을 보여주고 있다. Yonko와 Sepsy⁽⁹⁾의 실험 조건에 대한 비교에서 이들 조건을 식 (8)에 대입할 때 밀도를 알 수 없기 때문에

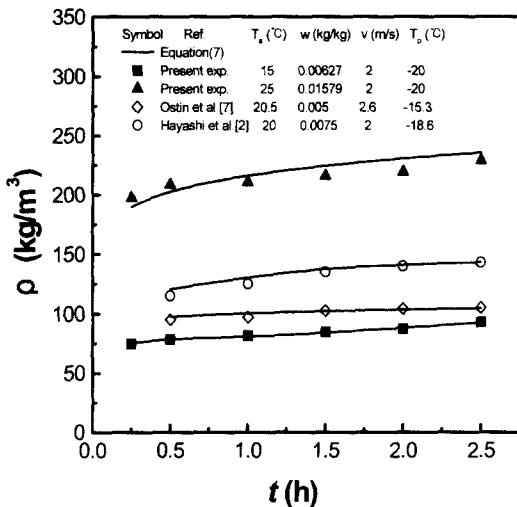


Fig. 5 Comparison of the result from equation (7) and experimental data for frost density

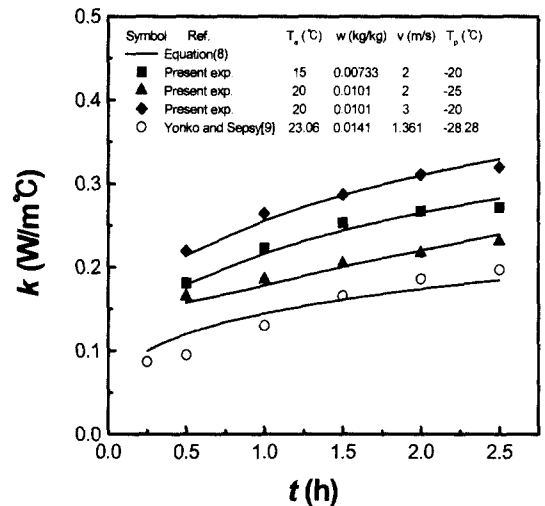


Fig. 6 Comparison of the result from equation (8) and experimental data for frost thermal conductivity

식 (7)에 대입하여 구한 밀도를 사용하였다. 그 결과 Yonko와 Sepsy⁽⁹⁾의 실험 데이터와는 초기 15분 이후 약 7% 내에서 실험 데이터와 일치하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 착상 인자에 따른 서리층 성장에 관해 운전조건이 주어지면 서리 물성치를 계산할 수 있는 실험식들을 제시하였다. 실험식의 적용범위는 입구 공기 온도 15 ~ 25°C, 상대습도 60 ~ 80%, 냉각면 온도 -15 ~ -25°C, 공기 유속 1 ~ 3 m/s이다. 서리층 표면 온도, 두께, 밀도, 열전도 계수에 관한 실험식은 본 연구의 실험 데이터와는 5% 내에서 일치하였고, 기존 연구자들^(7,9,11,12)의 실험 결과와는 8% 범위내에서 일치하였다.

후 기

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

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) 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) Marinyuk, B. T., 1980, "Heat and Mass Transfer under Frosting Conditions," *Int. J. Refrigeration*, Vol. 3, No. 6, pp. 366~368.
- (4) O'Neal, D. L., 1983, "The Effect of Frost Formation on the Performance of a Parallel Plate Heat Exchanger," Ph.D. thesis, Purdue University.
- (5) Hosoda, T. and Uzuhashi, H. 1967, "Effects of Frost on the Heat Transfer Coefficient," *Hitachi review*, Vol. 16, No. 6, pp. 254~259.
- (6) Harraghy, P. G. and Barber, J. M., 1986, "Frost Formation," *The Inst. of Refrig., Proc.*, pp. 1~13.
- (7) Ostin, R. and Andersson, A., 1991, "Frost Growth Parameters in a Forced Air Stream," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol 34, pp. 1009 ~1017.
- (8) 이관수, 이태희, 김우승, 1994, "착상조건하에서 평형 평판 열교환기의 열 및 물질전달," 공기조화 · 냉동공학회논문집, 제6권, 제2호, pp. 155~165.
- (9) Yonko, J. D. and Sepsy, C. F., 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.
- (10) Biguria, G. and Wenzel, L. A., 1970, "Measurement and Correlation of Water Frost Thermal Conductivity and Density," *I & EC Fundamentals*, Vol. 9, No. 1.
- (11) Sherif, S. A., Raju, S. P., and Padki, M. M., 1990, "A Semi-Empirical Transient Method for Modeling Frost Formation on a Flat Plate," *ASHRAE Trans.*, Vol. 139, pp. 15~23.
- (12) Smith, R. V., Edmonds, D. K., Brentari, E. G. F., and Richards, R. J., 1964, "Analysis of the Frost Phenomena on a Cryo-Surface," *Proc. Intl. Inst. of Refrig.*, Washington, D.C., pp. 88~97.