

## 수평 실린더에서의 서리 생성에 대한 환경 변수들의 영향

이윤빈\* · 류인상\*\* · 노승탁†  
 (2001년 7월 5일 접수, 2001년 11월 18일 심사완료)

### The Effect of Environmental Parameters on Frost Formation on a Horizontal Cylinder

Yoon Been Lee, In Sang Ryu and Sung Tack Ro

**Key Words :** Frost Layer(서리층), Horizontal Cylinder(수평 실린더), Environmental Parameters(환경 변수), Effective Thermal Conductivity(유효 열전도율)

#### Abstract

It is known that frost formation on surfaces of the heat exchanger seriously affects the performance of the refrigeration system. Accordingly, defrosting should follow, and effective defrosting is possible only when both analytic tools and comprehensive experimental data on frost formation are available. An experimental investigation was undertaken to characterize the effect of environmental parameters on frost formation on a horizontal cylinder in cross uniform flow. Several experiments were carried out with various environmental parameters such as inlet air temperature, inlet air humidity, air velocity and cooling surface temperature. Frost thickness, mass, surface temperature and cylinder inner and outer temperature were measured at front and rear positions of the cylinder. Thickness, mass, density, and effective thermal conductivity of the frost layer were obtained from measured data and effects of environmental parameters on the frost formation were analyzed. Data from experiments were correlated using dimensionless variables.

———— 기호설명 ————		$T$ : 온도
$d$ : 실린더 직경 [m]		$w$ : 절대습도 [kg/kg <sub>DA</sub> ]
$D$ : 공기중 수증기의 확산계수 [m <sup>2</sup> /s]		$v$ : 동점성 계수 [m <sup>2</sup> /s]
$Fo$ : 물질전달 Fourier 수, $\frac{Dt}{d^2}$		하첨자
$k_{eff}$ : 유효 열전도계수 [W/mK]		a : 공기
$l$ : 두께		f : 서리
$m$ : 단위 면적당 질량 [kg/m <sup>2</sup> ]		front : 실린더 전면
$Re$ : 레이놀즈수, $\frac{Vd}{\nu}$		rear : 실린더 후면
$t$ : 시간		w : 냉각면
		상첨자
		* : 무차원

#### 1. 서론

수증기의 노점과 빙점 이하의 온도를 가진 고체면에 습공기가 접촉하게 되면 고체면에는 서리가 생성된다. 이러한 서리 생성은 냉장고, 에어컨, 열펌프 등 냉동·공기조화장치, 항공기, 스페이스

\* 회원, 서울대학교 대학원 기계항공공학부  
 \*\* 서울대학교 대학원 기계항공공학부  
 † 회원, 서울대학교 기계항공공학부/정밀기계설계 공동 연구소  
 E-mail : stro@snu.ac.kr  
 TEL : (02)880-7111 FAX : (02)883-0179

서들 등 항공우주 산업, 극저온 유체의 냉열을 이용한 추진기관 등에 많은 영향을 미친다. 이중 공조기기의 열교환기, 특히 증발기 표면에 생성되는 서리는 성장함에 따라 단열층으로 작용하여 열교환을 방해하고 공기의 유로를 좁아지게 하여 압력강하를 증가시킨다. 이는 전체적인 시스템 성능저하를 가져오고, 계속 방치하면 압축기의 손상을 가져온다.<sup>(1)</sup> 항공기 날개에 생성되는 서리는 날개 형상을 변화시켜 양력, 항력에 영향을 끼치고 이는 궁극적으로 이륙시 필요 거리를 증가시키는 등 커다란 부정적 영향을 끼친다. 또, 스페이스 셔틀의 경우 외부저장 탱크에서 저온 연료가 공급될 때 생기는 서리 또한 발사시에 표면에서 떨어지며 우주선 표면에 손상을 가한다. 액체 질소를 상온의 대기로 가열하여 연소과정이 전혀 없는 무공해 자동차를 개발하는 과정에서도 극저온 질소와 공기의 열교환 과정에서 생기는 서리로 인해 열교환기의 성능 저하가 일어난다. 이상에서 보듯이 서리 생성으로 인한 부정적 영향을 제거하기 위하여 제상 또는 표면처리 등을 이용한 서리 생성 지연 또는 억제에 필요하다. 이를 위해서는 착상과정에 대한 이해가 필수적이다. 위에서 언급한 사례 중 특히 냉동·공기조화장치에 관련하여 이론적인 모델링과 실험, 실험 상관식을 이용한 수치적 방식 등으로 여러 기하학적 형상에 대하여 많은 연구가 수행되었다. 이 중 평판과 평행판에 대하여는 많은 연구결과가 발표되었으나<sup>(1~10)</sup> 실린더에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다. 본 연구에서는 공조기기의 증발기에 많이 사용되는 핀-관 열교환기 중 관에 해당되는 부분을 실린더로 모사하고 착상에 미치는 환경 변수의 영향을 알아보기 위하여 다양한 온도와 습도 조건에서 서리층 두께, 질량, 밀도, 유효 열전도율 등을 구하고, 각 환경 변수들의 영향에 따른 서리 생성 특성을 보였다. 또한 실험을 통하여 얻은 자료들을 환경 변수들의 상관식으로 나타내었다.

## 2. 실험장치 및 계측

### 2.1 실험장치

실험 장치는 크게 공기 순환부와 공기조절부, 이차유체 순환부, 그리고 시험부로 나누어진다. 공기 순환부는 Fig. 1 과 같이 구성하였다. 공기의 순환 과정을 보면 공기조절부에서 나온 공기가 Mesh 와 Honey-Comb 을 지나면서 유동이 안정화되고 콘트렉션 부분을 지나서 균일 유동이 된 후 시험부를 지나게 된다. 덕트 내의 풍량은 팬의 회

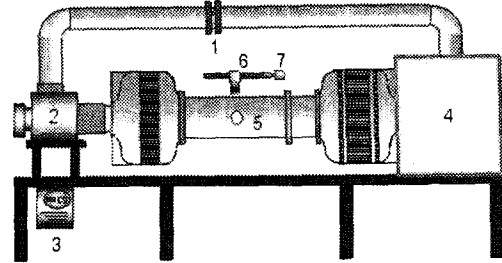


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus; 1=orifice, 2=fan, 3=frequency inverter, 4=climate chamber, 5=test section, 6=CCD camera, 7=traversing equipment

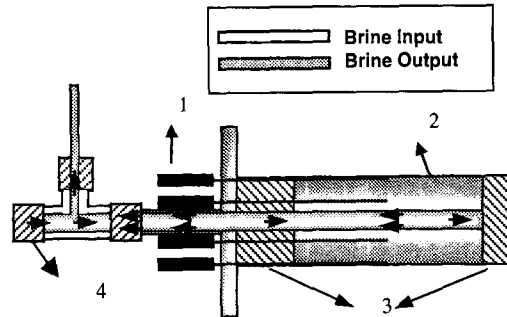


Fig. 2 Schematic diagram of test section; 1=Thermocouple probe, 2=stainless steel cylinder, 3=acryl, 4=tee

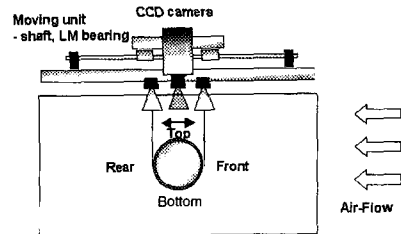


Fig. 3 Schematic diagram of thickness measurement

전수를 변화시킴으로써 조절하였다. 시험부가 장착되는 부분의 덕트의 규격은 가로가 160 mm 이고 높이가 210 mm 이며 시험부는 콘트렉션이 끝난 부분으로부터 하류방향으로 650 mm 인 부분에 장착되었다. 공기 조절부는 3 개의 정방형 아크릴 챔버를 연결하여 구성하였으며 첫 번째 챔버에는 냉각을 위한 열교환기를, 두 번째 챔버에는 공기 히터를 설치하여 온도를 조절하였다. 또한, 첫 번째 챔버와 두 번째 챔버에 각각 가습기를 설치하여 두 가습기의 조합으로 습도를 조절하였다. 세 번째 챔버에는 혼합 팬을 달아서 공기의 온도와 습도가 안정되도록 하였다. 공기습도는 노점계

(General eastern, Hygro-M3 1311DR)를 사용하여 측정하였고 공기 유량은 Fig. 1의 오리피스 양단의 차압을 차압계로 측정하여 계산하였다.

시험부는 Fig. 2와 같다. T-Type 열전대 Probe가 삽입되는 부분은 스테인레스 스틸 304를 재료로 하여 지름 70 mm, 길이 160 mm인 중공 실린더로 가공하여 사용하였으며 양쪽 부분은 지름 70 mm인 아크릴을 사용하였다. 시험부 가운데 지름 17 mm인 부분에 0.5 in 규격의 스테인레스 스틸 관을 삽입하여, 이차유체가 관의 내부를 통하여 공급된 뒤 다시 관의 외부와 실린더 사이를 동심관 사이의 유동으로 흘러나오게 하여 축방향으로의 온도차를 줄였다. 이차유체로는 에틸렌글리콜과 물의 50:50 혼합액을 사용하였다. 스테인레스 스틸 304를 재료로 제작한 중공실린더의 원주방향으로 0°, 90°, 180°, 270°, 반경방향으로 15.0 mm, 33.5 mm인 위치에 지름 2.0 mm의 구멍을 뚫은 후, 축방향으로 80 mm인 위치에 각각 T-Type 열전대 Probe를 삽입함으로써 실린더의 4 방향에 대하여 안쪽, 바깥쪽의 총 8개의 위치에서 온도를 측정할 수 있도록 하였다. 열전대 Probe를 삽입할 때 열전도성 실리콘(Omegatherm OT-201)을 사용하여 금속면과 밀착되도록 하였다.

## 2.2 측정방법

### 2.2.1 서리 표면온도 측정

서리 표면온도는 비접촉식 적외선 온도계를 사용하여 전면, 후면에 대하여 측정하였다. 공기 유동을 방해하지 않기 위하여 비측정시에는 덕트 바깥쪽에 위치하고 측정시에만 측정위치에 오도록 이송장치를 사용하였다.

### 2.2.2 서리 두께 측정

서리의 두께는 Fig. 3에 나타내어진 것과 같이 CCD 카메라를 이용한 영상분석으로 측정하였다. 실린더의 앞부분과 뒷부분의 두께를 각각 측정하기 위하여 이송장치를 장착하였다. 카메라 렌즈를 실린더의 경계면에 오도록 설정한 후 서리가 생기기 전에 찍은 영상데이터와 서리생성 후의 영상데이터를 분석하여 경계면의 위치의 차이를 계산함으로써 서리의 두께를 얻을 수 있다. 이미지 데이터의 분해능은 0.077 mm, FOV(Field of View)는 49 mm(H) × 37 mm(V)이다.

## 2.3 실험방법

공기온도, 습도, 냉각면 온도가 설정 값에 맞추어지면 실린더표면에 감싸두었던 알루미늄 박판을 제거하고 실험을 시작한다. 서리두께와 표면 온도는 15 분 간격으로 측정하고 그 외의 데이터들은

Table 1 Experimental conditions

Parameter	Range
Air temperature (°C)	5.0 to 15.0
Air humidity ratio (kg/kg <sub>DA</sub> )	0.00300 to 0.00550
Reynolds number	5100 to 17000
Cooling surface temperature (°C)	-15.0 to -5.0

10 초 간격으로 측정한다. 착상 개시 3 시간 후에 시험부의 전면과 후면의 각각 ±30°, 길이방향으로 120 mm에 해당하는 면적의 서리를 직접 긁어서 채취하여 정밀 저울(A&D, HF-400)로 측정한다. 수행한 실험 조건들을 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 Reynolds 수는 서리가 생성되지 않은 실린더의 외경을 기준으로 계산한 값이다. 실험에 사용된 모든 열전대는 KAYA instrument사의 영점 보정기(K170)를 사용하여 측정한 전압차를 오메가사에서 제공하는 다차식에 대입하여 온도를 산출하였으며 백금저항온도계(ASL, F250)를 사용하여 정밀 교정하였다. 풍량의 오차는 5.0%이고 공기 온도의 오차는 ±0.2°C이며 공기 습도의 오차는 ±3.0×10<sup>-5</sup> kg/kg<sub>DA</sub>이다. 계산된 밀도의 오차는 6.4%이며 유효 열전도율의 오차는 10.1%이다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 환경 변수들의 영향

공기 습도가 높아질수록 냉각면 온도가 낮아질수록 서리층의 두께는 증가한다는 사실은 기존의 연구자들에 의하여 잘 알려진 사실이다.<sup>(1-10)</sup> 습도 변화에 따른 서리층 두께의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 시간에 따른 변화를 살펴보면 초기에는 두께가 급격히 성장하다가 이후 증가율이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 서리 표면온도가 시간이 지남에 따라 상승하여 공기와 서리 표면 간의 수증기 농도차가 작아지고 그 결과 수증기 농도차에 의한 구동력의 감소로 인하여 서리 두께의 증가율이 작아진 것이다. 습도 변화에 따른 서리 두께 성장을 비교해보면 절대습도가 증가함에 따라 서리 두께가 커짐을 알 수 있다. 이것은 앞에서 설명한 것과 같이 수증기 농도차 증가에 의한 구동력 증가에 기인한다. 절대습도가 커짐에 따라 서리 생성 초기의 성장률이 크고 그 이후에는 거의 성장률이 일정하다. 이것은 절대습도가 커짐에 따라 서리 표면 온도 또한 빨리 증가하기 때문이다. 두께 뿐만이 아니라 단위 면적 당 착상량도 증가한다는 것을 Fig. 5에서 알 수 있다.

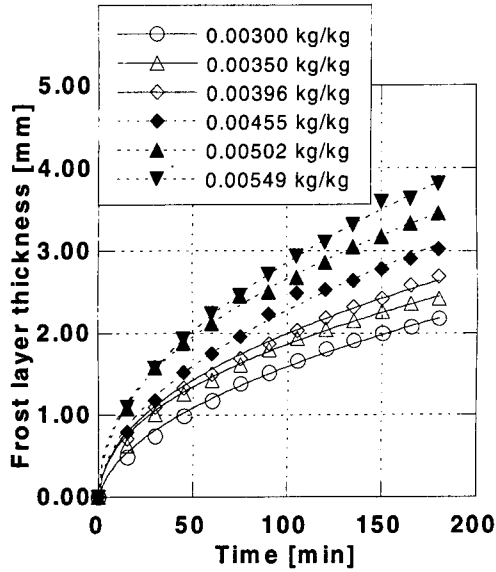


Fig. 4 The effect of air humidity on frost layer thickness;  $T_a=10.0^\circ\text{C}$ ,  $T_w=-15.0^\circ\text{C}$ ,  $Re=17000$

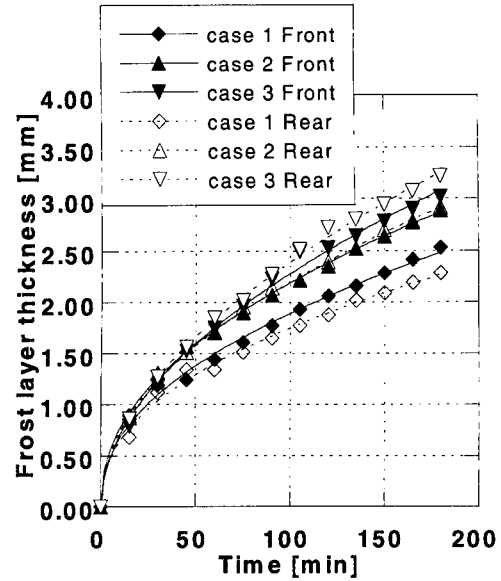


Fig. 6 The effect of cooling surface temperature on the frost layer thickness;  $T_a=10.0^\circ\text{C}$ ,  $Re=17000$ ,  $w=0.00455 \text{ kg/kg}_{DA}$ ; case 1  $T_w=-5.0^\circ\text{C}$ , case 2  $T_w=-10.0^\circ\text{C}$ , case 3  $T_w=-15.0^\circ\text{C}$

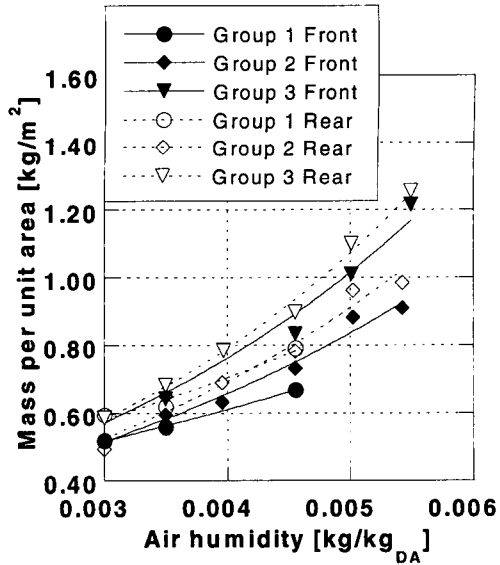


Fig. 5 The effect of air humidity on frost mass quantity;  $T_w=-15.0^\circ\text{C}$ ,  $Re=17000$ ,  $t=180 \text{ min}$ ; Group 1  $T_a=5.0^\circ\text{C}$ , Group 2  $T_a=10.0^\circ\text{C}$ , Group 3  $T_a=15.0^\circ\text{C}$

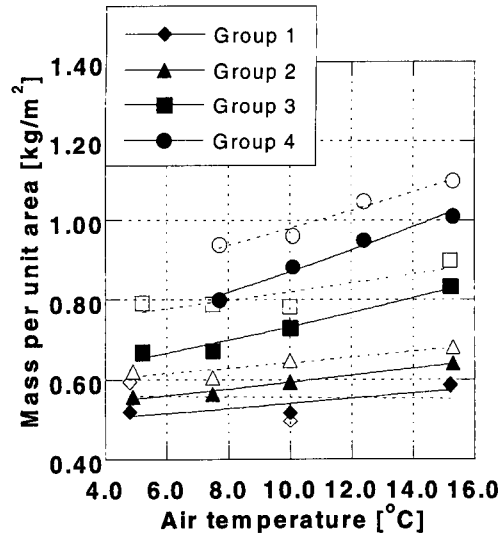


Fig. 7 The effect of air temperature on frost mass quantity;  $T_w=-15.0^\circ\text{C}$ ,  $Re=17000$ ,  $t=180 \text{ min}$ ; Group 1  $w=0.00300 \text{ kg/kg}_{DA}$ , Group 2  $w=0.00350 \text{ kg/kg}_{DA}$ , Group 3  $w=0.00455 \text{ kg/kg}_{DA}$ , Group 4  $w=0.00500 \text{ kg/kg}_{DA}$ ; filled symbols are front, unfilled symbols are rear

냉각면 온도의 영향을 Fig. 6 에 나타내었다. 냉각면 온도가 낮아질수록 서리 표면 온도도 낮아지게 되어 공기와 서리 표면간의 수증기 농도차가 증대되며 물질전달의 구동력이 커지게 된다. 결과적으로 냉각면 온도가 낮아질수록 단위 면적당 서리층의 질량이 커지고 두께 또한 증가하게 된다. 공기 온도의 서리층 생성에 대한 영향은 기존

연구자들 사이에 상이한 결과를 보이고 있다. Trammell 등<sup>(2)</sup>과 Schneider<sup>(11)</sup>는 공기온도가 서리층의 두께에 별 영향이 없다는 결과를 발표했으며 Brian 등<sup>(3)</sup>은 공기온도가 높아질수록 서리층의 두

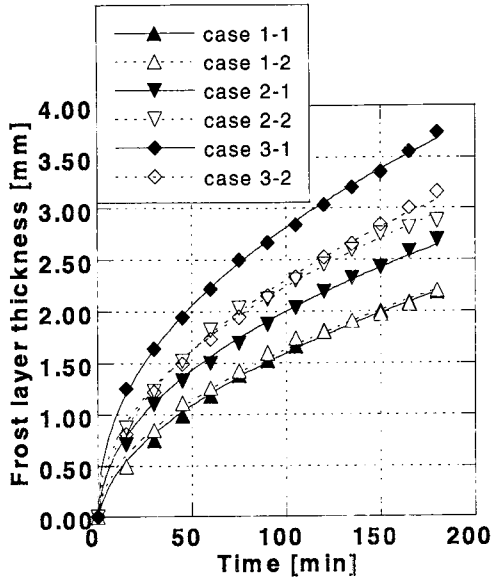


Fig. 8 The effect of the air temperature on frost layer thickness; front,  $T_w = -15.0^\circ\text{C}$ ; case 1-1  $T_a = 10.0^\circ\text{C}$ ,  $Re = 17000$ ,  $w = 0.00300 \text{ kg/kg}_{DA}$ , case 1-2  $T_a = 15.0^\circ\text{C}$ ,  $Re = 17000$ ,  $w = 0.00300 \text{ kg/kg}_{DA}$ , case 2-1  $T_a = 10.0^\circ\text{C}$ ,  $Re = 17000$ ,  $w = 0.00396 \text{ kg/kg}_{DA}$ , case 2-2  $T_a = 15.0^\circ\text{C}$ ,  $Re = 17000$ ,  $w = 0.00396 \text{ kg/kg}_{DA}$ , case 3-1  $T_a = 10.0^\circ\text{C}$ ,  $Re = 5100$ ,  $w = 0.00455 \text{ kg/kg}_{DA}$ , case 3-2  $T_a = 15.0^\circ\text{C}$ ,  $Re = 5100$ ,  $w = 0.00455 \text{ kg/kg}_{DA}$

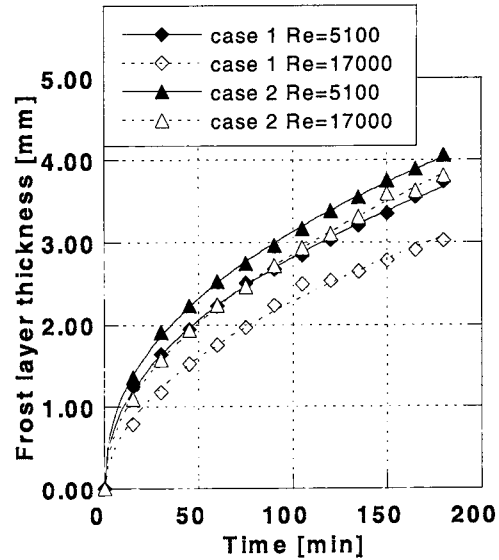


Fig. 10 Air velocity effect on frost layer thickness;  $T_w = -15^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 10.0^\circ\text{C}$ , front; case 1  $w = 0.00455 \text{ kg/kg}_{DA}$ , case 2  $w = 0.00550 \text{ kg/kg}_{DA}$

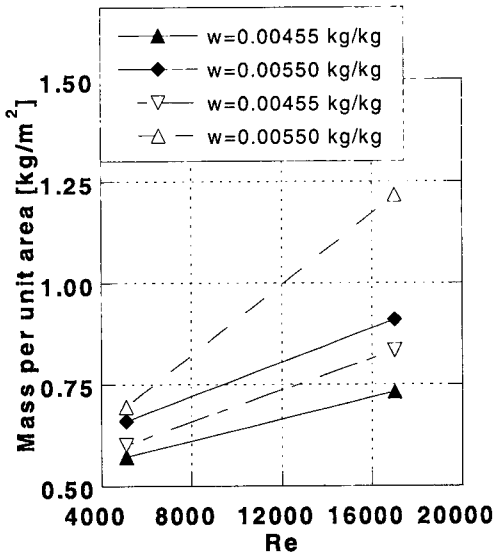


Fig. 9 Air velocity effect on frost mass quantity; front,  $t = 180 \text{ min}$ ,  $T_w = -15.0^\circ\text{C}$ ; filled symbols are  $T_a = 10.0^\circ\text{C}$ , unfilled symbols are  $T_a = 15.0^\circ\text{C}$

계가 감소한다는 결과를 실험적으로 얻었다. Tao 등<sup>(4)</sup>은 공기온도가 높아질수록 서리층의 두께가

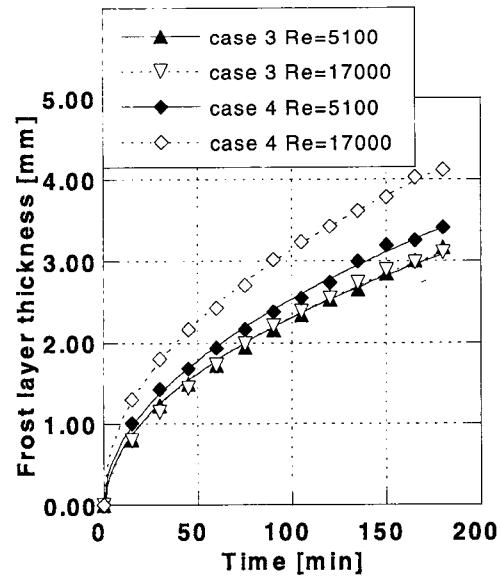


Fig. 11 Air velocity effect on frost layer thickness;  $T_w = -15^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 15.0^\circ\text{C}$ , front; case 3  $w = 0.00455 \text{ kg/kg}_{DA}$ , case 4  $w = 0.00550 \text{ kg/kg}_{DA}$

증가한다는 수치계산 결과를 발표하였다. 본 연구에서는 Fig. 7에 나타난 것과 같이 공기온도가 상승할수록 서리층의 단위 면적 당 질량은 증가한다는 결과를 얻을 수 있었다. 냉각면 온도와 습도, 그리고 Reynolds 수가 같은 경우에 공기 온도가 높아지면 열전달량이 커지게 되고 그 결과 물질

전달량도 증대되어 서리층의 질량이 증가하게 되는 것이다. 하지만 증가된 전달 수증기가 서리층 표면에 달라붙어 서리층의 두께성장에 기여하게 되는지 또는 서리층 내부로 침투해 들어가 밀도성장에 기여하게 되는지는 일관된 경향을 보이지 않는다는 것을 Fig. 8 을 통하여 알 수 있다.

공기 유속의 서리층에 대한 영향은 공기 온도의 영향과 마찬가지로 증가할수록 서리층의 단위 면적당 질량은 증가한다는 결과를 얻을 수 있었고 이를 Fig. 9 에 나타내었다. 공기 유속의 서리층 두께에 대한 영향은 공기온도와 마찬가지로 기존 연구자들의 결과가 일치되어있지 않다. Yonko 와 Sepsy,<sup>(5)</sup> 그리고 Tokura 등<sup>(6)</sup>은 공기유속이 서리층의 성장에 별 영향이 없다는 결론을 내렸고 Trammell 등<sup>(2)</sup>과 Brian 등<sup>(3)</sup>은 공기유속이 증가할수록 서리층 두께가 감소한다는 결과를 발표했으며, O'neal 과 Tree,<sup>(1)</sup> 그리고 Yamakawa 등<sup>(7)</sup>은 유속이 증가할수록 서리층의 두께가 증가한다는 결과를 발표하였다. 본 실험에서는 위 연구자들이 제시한 상반된 결과들을 모두 얻을 수 있었다. 실린더 표면에서 성장하는 서리층의 두께가 유속이 증가할수록 Fig. 10 과 같이 감소하기도 하였으며 Fig. 11 과 같이 비슷하거나 증가하기도 하였다.

서리층의 성장은 공기로부터 공급된 수증기가 표면에 달라붙어서 두께성장에 기여하게 되는 경우와 서리층 내부로 침투해 들어가서 밀도성장에 기여하게 되는 두 가지 경우의 조합으로 이루어진다. 이러한 조합은 농도차에 의한 구동력 외에도 서리 표면 온도의 변화, 서리층 내부에서 일어나는 물분자의 확산과 얼음결정의 성장과정 및 그 외의 여러 현상들이 복잡하게 복합되어 일어나기 때문에 공기온도와 유속의 서리층 두께에 대한 영향이 일관된 경향을 보이지 못하는 것이다. 또한 서리생성 초기의 서리핵 생성에 있어서 공기온도가 영향을 준다는 연구도 발표되었다.<sup>(8)</sup> 이와 같은 난점에도 불구하고 공기 습도와 냉각면 온도가 서리층의 두께에 미치는 영향이 공기 온도와 유속에 비하여 지배적이기 때문에 다음절과 같이 실험 상관식을 유도할 수 있었다.

### 3.2 실험결과의 상관식

본 실험에서 얻은 실험 데이터들을 최소오차자승법을 이용하여 환경변수의 상관식으로 정리하였다. 실린더 앞부분과 뒷부분에서 성장하는 서리층의 두께  $l$  을 각각  $w$ ,  $T^*$ ,  $Re$ ,  $D^*$ ,  $Fo$  의 함수로 나타내었으며 이때  $w$  는 절대습도,  $T^*$  는 무차원화된 온도,  $Re$  는 Reynolds 수,  $D^*$  는 대기압 조건에서 온도가 0°C 인 경우와 공급공기 온도일 경우의 공기

중 수증기의 확산계수의 비를 나타내며,  $Fo$  는 밀도전달 Fourier 수이다. 또한  $T^*$  는 공기온도  $T_a$ , 냉각면 온도  $T_w$ , 삼중점 온도  $T_{tr}$  [K] 를 사용하여 다음과 같이 정의한다.

$$T^* = \frac{(T_{tr} - T_w)}{(T_a - T_w)} \quad (1)$$

또한  $Re$  와  $Fo$  는 서리가 생성되지 않은 상태의 실린더의 외경을 기준으로 하였다. 구한 상관식은 다음과 같으며 서리두께  $l$  의 단위는 [m]이다.

$$l_{f,front} [m] = 1.401 \times 10^{-1} (w)^{1.038} (T^*)^{0.431} (Re)^{-0.00187} (D^*)^{1.437} (Fo)^{0.500} \quad (2)$$

$$l_{f,rear} [m] = 4.264 \times 10^{-2} (w)^{0.932} (T^*)^{0.738} (Re)^{0.08642} (D^*)^{0.176} (Fo)^{0.514} \quad (3)$$

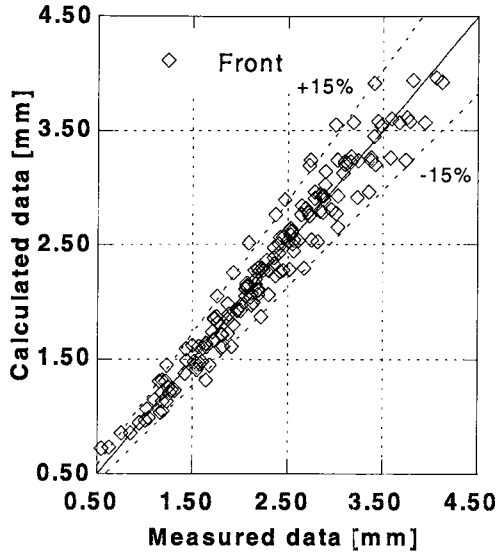
위 식 (2)와 (3)을 사용하여서 구한 값들과 실험값들을 비교하여 Fig. 12 에 나타내었다. 착상후 3 시간 후의 단위 면적 당 착상 질량을  $w$ ,  $T^*$ ,  $Re$ ,  $D^*$  의 함수로 나타내었으며 상관식은 식(4), (5)와 같으며 구한 값과 실험값들을 비교하여 Fig. 13 에 나타내었다.

$$m_{front} [kg / m^2] = 5.666 \times 10^0 (w)^{0.963} (T^*)^{0.424} (Re)^{0.31185} (D^*)^{5.594} \quad (4)$$

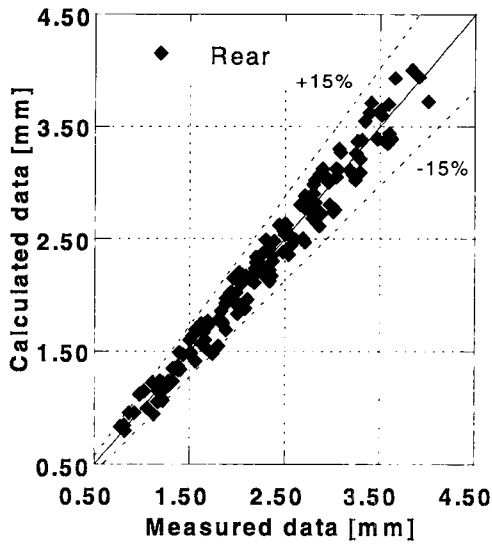
$$m_{rear} [kg / m^2] = 5.914 \times 10^{-1} (w)^{1.106} (T^*)^{0.760} (Re)^{0.64459} (D^*)^{6.237} \quad (5)$$

### 3.3 유효 열전도율

서리층의 유효 열전도율은 서리층을 통한 수증기의 확산과 얼음결정을 통한 열전도의 복합적인 영향을 나타내는 것이다. 서리층의 유효 열전도율이 밀도만의 함수가 아니라는 연구 결과를 Şahin<sup>(8)</sup>이 발표하였으나 밀도가 가장 지배적인 인자라는 사실에는 기존의 연구자들도 동의하고 있고 관련 상관식들도 발표되어 있다.<sup>(5,9,10)</sup> 본 연구에서 실험을 통하여 얻은 중공 실린더의 바깥쪽 온도와 안쪽 온도를 사용하여 열유속을 계산하고 측정한 서리층 표면 온도와 두께를 사용하여 서리층의 유효 열전도율을 얻을 수 있었다. 이때 냉각면과 닿아있는 서리층의 밀부분의 온도는 실린더 바깥쪽 냉각면의 온도와 같다고 가정하였다. 기존의 연구



(a) Front



(b) Rear

Fig. 12 Comparison of calculated values and measured values of frost layer thickness

자들<sup>(5,9,10)</sup>에 의해 발표된 평판에서 생성된 서리층의 유효열전도율을 밀도의 함수로 표시한 값들과 본 연구에서 얻은 값들을 비교한 결과를 Fig. 14에 나타내었다. 밀도가 증가함에 따라 유효 열전도율은 커지는데 이는 서리층 밀도의 증가가 서리층 내부 구조의 치밀화를 가져와 얼음이 차지하는 부피 분율이 커지기 때문이다.<sup>(5)</sup> 그런데 본 연구에서 얻은 값들 중 실린더의 전면부와 후면부에서 생성된 서리층의 유효 열전도율 값을 비교하면 전

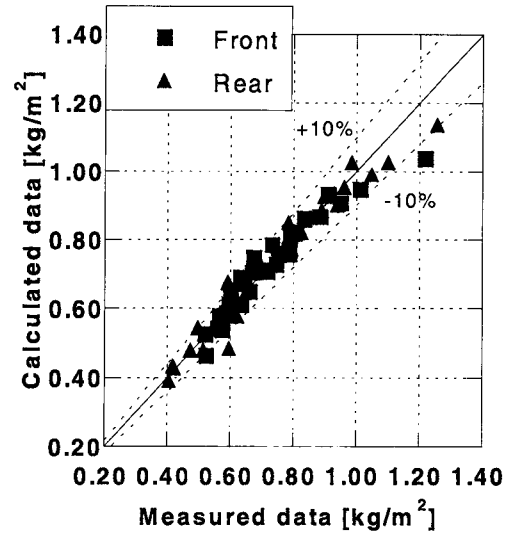


Fig. 13 Comparison of calculated values and measured values of frost mass quantity

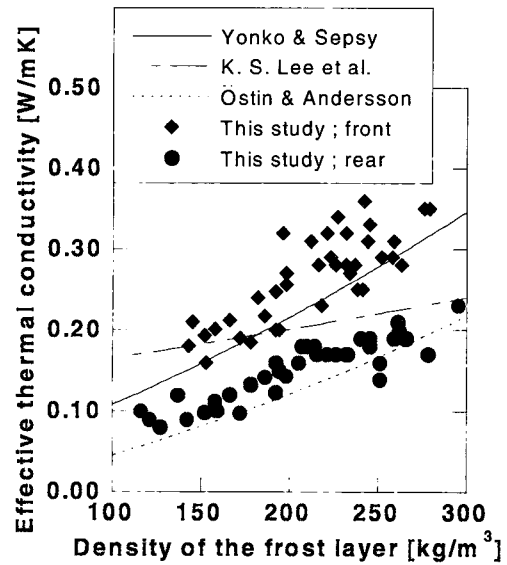


Fig. 14 Effective thermal conductivity of the frost layer

면부가 같은 밀도일 때의 후면부보다 큰 값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 이것은 위치에 따라 서리층 내부 구조가 차이를 갖기 때문이라고 생각된다. 또한 실린더 후면에서는 박리 이후에 발생한 활발한 와류가 존재하여 서리층의 온도를 상승시킴으로 인하여 얻어진 결과라고 생각된다. 실제로 계측한 서리층 표면의 온도 결과들을 보면 실린더 뒷부분에 생성되는 서리층이 앞부분에 생성되는 서리층보다 항상 표면 온도가 더 높다는 것을 알 수 있었다. 위에서 기술한 이유 외에도 부가적인

원인들이 있을 것이라 생각되며, 이는 향후 추가적인 해석 및 연구를 통해 밝혀져야 할 것이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 강제 직교유동에 놓인 실린더 표면에서의 서리생성에 대한 환경 변수들의 영향을 실험적으로 고찰하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 서리층 두께는 초반에 급격히 성장하다가 이후 서리 표면온도가 높아짐에 따라 성장이 둔화된다.

(2) 공기습도와 냉각면 온도가 서리층 성장에 지배적인 인자이며 습도가 커짐에 따라, 냉각면 온도가 낮아짐에 따라 착상량 및 서리층 두께는 증가한다.

(3) 공기 온도와 유속이 증가할수록 착상량은 증가하지만 증가된 착상량의 서리층 두께 성장에 대한 기여도는 일관된 경향을 가지지 않는다. 공기온도와 유속의 두께 성장에 대한 영향을 알기 위하여는 서리층의 결정성장 등 추가적인 고려가 필요하다.

(4) 서리층 성장에 관련된 환경 변수들의 실험적 상관식을 얻어내었다.

(5) 서리 밀도가 증가함에 따라 유효 열전도율도 증가하지만 실린더 전면부에 생성되는 서리층이 같은 밀도를 갖는 후면부에 생성되는 서리층에 비하여 큰 값을 갖는다. 이는 박리 이후의 활발한 와류 형성과 서리층 내부의 구조차이에 기인한다.

#### 후 기

본 연구는 기계분야 BK-21 사업의 지원 하에 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

#### 참고문헌

- (1) O'Neal, D. L. and Tree, D. R., 1984, "Measurement of Frost Growth and Density in a Parallel Plate Geometry," ASHRAE Transactions, Vol. 90, Part 2, pp. 278~290.
- (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 Journal, July, pp.42~47.
- (3) Brian, P. L. T., Reid, R. C., and Brazinsky, I., 1969, Cryogenic frost Properties, Cryogenic Technology, pp.205~212.
- (4) Tao, Y.-X., Mao, Y. and Besant, R. W., 1994, Frost Growth Characteristics on Heat Exchanger Surfaces; Measurement and Simulation studies, ASME HTD-Vol 286 Fundamentals of Phase changes :Sublimation and Solidification, pp.29~38.
- (5) Yonko, J. D. and Sepsy, C. F., 1967, An investigation of the thermal conductivity of frost while forming on a flat horizontal plate, ASHRAE Transactions, Vol. 73, Part 1, pp.1~11.
- (6) Tokura, I., Saito, H., and Kishinami, K., 1988, Prediction of growth rate and density of frost layers under forced convection, *WÄRME und STOFFÜBERTRAGUNG*, pp.285~290.
- (7) Yamakawa, N., Takahashi, N., and Ohtani, S., 1972, Forced Convection Heat and Mass Transfer under Frost Conditions, Heat Transfer Japanese Research, Vol. 1, No. 2, pp.1~10.
- (8) Şahin, A. Z., 2000, Effective thermal conductivity of frost during the crystal growth period, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol.43, pp.539~553.
- (9) 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, part 2, pp.155~165.
- (10) Östin, R. and Anderson, S., 1991, Frost growth parameters in forced air stream, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 34, pp.1009~1017.
- (11) 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.