

직교유동 내에 놓인 수평 실린더에서 서리 생성에 관한 실험적 연구

An experimental study of frost forming on the horizontal cylinder under cross flow

이 윤 빈*, 노 승 탁**
Y. B. Lee, S. T. Ro

Key words: Frost layer(서리층), Cylinder(실린더), Thickness(두께), Effective thermal conductivity(유효 열전도율)

ABSTRACT

Variations of thickness and effective thermal conductivity of frost forming on the horizontal cylinder with respect to time were measured under cross flow. The local heat flux around the cylinder was determined by measuring the radial temperature distribution in the cylinder having small holes drilled axially in which T-type thermocouples were inserted, then by using one dimensional cylindrical heat conduction equation. The thickness and the surface temperature of the frost layer around the cylinder were measured periodically while developing the frost. Each experiment was performed by varying the Reynolds number, the temperature, and the humidity condition. Specially the dew point temperature of the most cases was below the freezing point. Experimental data showed that the frost layers on the front and the rear surface were thicker than those on the top and the bottom one which was near the separation point. The thickness and effective thermal conductivity of the frost layer were affected by inlet air velocity, temperature, and humidity. Moreover, the effective thermal conductivity and the effective thermal resistance increase with respect to time.

기호설명

k : 열전도율 [W/m-K]
 q' : 열유속 [W/m]
 r : 반지름 [mm]
 R : 열저항 [m-K/W]
 Re_d : Reynolds 수, $\frac{VD}{\nu}$

T : 온도 [°C]
 w : 절대습도 [g/kgDA]

하첨자

a : 공기
 f : 서리
 s : 실린더
 sur : 표면

* 서울대학교 대학원

** 정회원, 서울대학교 기계공학과

1. 서론

수증기를 포함한 공기가 빙점 이하의 온도를 유지하는 표면에 닿았을 때 서리가 생성되게 된다. 특히 에어컨, 냉장고, 히트 펌프 등의 냉동장치의 증발기에 사용된 열교환기에서 공기 측에서의 서리 생성은 열교환에 영향을 미치게 된다. 초기에는 서리의 증착이 열교환기 표면에서의 환효과를 가져와서 열전달을 촉진시키게 된다. 하지만 시간이 지남에 따라 서리의 두께가 두꺼워지고 그 구조도 변함으로써 열전달을 방해하는 단열효과를 가져오게 되고 또한 열교환기를 지나가는 공기 측의 유동 면적을 좁아지게 하여 열교환기 전후의 압력강하를 상승시키는 작용을 하여서 전체 시스템의 성능을 떨어뜨리게 된다. 따라서 열교환기의 제상이 필요한데 효율적인 제상을 하기 위해서 여러 외부조건에 따른 서리의 물성치가 필요하다. 이러한 서리의 생성과정은 비정상상태에서 열전달 및 물질전달을 동시에 수반하며 서리표면의 거칠기로 인한 경계층 내에서의 난류효과를 유발하기 때문에 그 해석에 많은 어려움이 있다. 또한 공기와 서리 사이의 온도가 빙점에 도달하였을 때에는 서리표면이 용해 및 재응고 과정(melting and refreezing cycle)을 반복하면서 서리층 내의 구조에 변화를 가져와 밀도와 유효 열전도율을 키치게 하는데 이러한 현상은 공기의 온도가 높을수록, 습도가 높을수록 더 잘 나타난다⁽¹⁾. 서리에 대해서는 그 동안 수치적인 접근과 실험적인 접근, 수치와 실험을 병행하는 방식⁽²⁾ 등이 많은 사람들에 의해서 시도되어 왔다. Yonko와 Sepsy⁽³⁾는 수평 평판에서 강제대류일 때 서리의 열전도율에 대한 실험결과를 발표하였고, Brian 등⁽⁴⁾은 극저온, 강제대류일 때 수평 평판 위에서 생성된 서리의 물성치에 관한 실험결과를 발표하였다. Yamakawa 등⁽⁵⁾은 강제대류일 때 수평평판 위에서 생성된 서리의 물성치와 열전달량의 변화에 대한 실험결과를 제시하였고 Tokura 등⁽⁶⁾은 강제대류에서의 수평평판에서의 서리성장률과 밀도에 관한 실험식을 발표하였다. O'Neal과 Tree⁽⁷⁾는 평행판 사이에서 생성된 서리의 물성치에 대하여 식을 발표하였고, Aoki 등⁽⁸⁾은 수직실린더에 강제대류상태일 때 서리의 물성치에 대한 실험치를 제시하였다. Inaba 등⁽⁹⁾은 강제대류와 복사열전달로 인한 서리표면

에서의 승화에 대한 실험 자료를 발표하였다. 본 연구에서는 유입공기의 온도가 10°C 전후이며 이슬점이 주로 빙점 이하인 저습조건일 경우, 레이놀즈 수가 10000이상인 강제대류하에서 직교유동에 놓인 수평실린더 표면에 생성되는 서리의 시간에 따른 두께, 유효 열전도율 및 열저항값의 변화를 위치별로 측정하였다.

2. 서리관련 이론

2.1 서리 생성 단계

냉각판에 습공기가 닿게 되면 공기중의 수증기가 냉각판에 미세한 과냉 액적상태로 응축되게 된 후 응고된다. 이렇게 응고된 입자들이 서리핵의 역할을 하게 되고 이 핵위에 공기중의 수증기들이 승화과정을 거쳐서 증착됨으로써 미세한 결정이 냉각판에 수직방향으로 성장하는 1차원 성장 단계(one-dimensional growth period)를 거치게 된다. 시간이 지남에 따라서 서리 성장이 냉각판에 평행한 방향으로도 진행되는 3차원 성장 단계(three-dimensional growth period)로 발전되게 된다⁽⁶⁾. 이 단계에는 공기중의 수증기가 서리층 내부로도 전달되기 때문에 서리층의 생성속도가 1차원 성장단계보다 느리게 진행 된다. 서리층의 두께와 서리표면의 온도가 계속 올라가서 결국 서리 표면의 온도가 0°C에 도달하게 되면 서리결정의 용해와 공기중의 수증기의 응축으로 인하여 생성된 물이 서리층 내부로 흡수된 후 다시 응고되게 되어서 서리층의 밀도를 증가시킨다. 밀도의 증가로 인하여 서리층의 열저항값을 떨어뜨리게 되어 서리층 표면의 온도가 다시 떨어지게 된다. 이 과정을 서리층 완전 성장 단계(frost layer full growth period)라고 한다.

2.2 서리 생성 주요 인자

서리 생성시 영향을 주는 인자로는 공기의 속도와 습도 및 온도, 그리고 냉각판의 온도 등의 네 가지를 주요 인자라고 할 수 있다. 유입공기의 속도가 커지면 레이놀즈 수가 커지므로 대류 열전달 계수 및 물질전달 계수의 값이 커지기 때문에 서리의 증착률을 증가시켜서 두께 성장률을 촉진시키게 된다. 이에 반하여 레이놀즈 수의 증

가는 서리-공기간의 온도(서리표면 근처의 온도)를 높아지게 하여 서리표면 근처의 수증기의 부분압력이 높아지게 되고 서리표면과 공기유동간의 농도 구동력을 감소시켜 서리의 증착률을 떨어뜨리게 된다. 하지만 첫 번째 영향이 두 번째보다 더 지배적이어서 레이놀즈 수의 증가는 서리층 성장을 더 촉진시킨다고 알려져 있다⁽¹⁰⁾. 유입공기의 온도도 서리-공기 사이의 온도에 영향을 줌으로써 서리층 생성에 영향을 주게 되고, 습도는 농도차에 의한 구동력에 영향을 주어서 그 값이 커지면 서리층의 성장률을 커지게 한다고 알려져 있다⁽¹⁰⁾. 또한 서리표면이 빙점에 도달하게 되면 용해 및 재응고 과정(melting and refreezing cycle)이 시작되게 되는데 이러한 용해 및 재응고과정은 유입공기의 온도가 높을수록 습도가 높을수록 더 잘 나타난다고 알려져 있다⁽¹⁾. 이와 같이 유입공기의 온도, 절대습도, 속도는 대류열전달 계수, 물질전달 계수, 농도차에 의한 구동력, 서리-공기간의 온도, 용해 및 재응고 과정 등과 복잡하게 연결되어서 서리의 착상을 및 유효 열전도율, 밀도에 영향을 주게 된다.

2.3 서리 관련 식

서리를 통한 열전달은 잠열과 현열로 나누어서 생각할 수 있고 다음 식과 같이 간략하게 표현할 수 있다.

$$q_i'' = q_s'' + q_f'' \quad (1)$$

$$q_i'' = h_a(T_a - T_f) + h_m(w_a - w_f)L_h \quad (2)$$

여기서 q_i'' 는 전체 열유속, q_s'' 는 현열을 통한 열유속, q_f'' 는 잠열을 통한 열유속이며 w 는 절대습도, L_h 는 승화잠열을 가리키며, 하첨자 a 는 공기, f 는 서리표면을 가리킨다. 레이놀즈 수가 증가할수록 q_s'' 에 대한 q_i'' 의 비가 줄어든다고 알려져 있다⁽⁵⁾. 고체의 열전도율을 측정할 때에는 정상상태 열전달 과정에서의 비교측정법이 사용된다. 시험부의 표면에 서리가 생성되는 과정은 아주 느리게 진행되는 비정상상태이기 때문에 준정상상태라고 가정할 수 있다. q_i 는 서리층과 실린더를 지나서 이차 유체로 전달되게 되며, 시험부에서 실린더 내부의 유동을 동심관 사이의 유

동으로 하여서 실린더의 Z-방향 온도 분포를 일정하게 하였으므로 Z-방향의 열전달은 무시하고 반경방향의 열전달만 고려하면 실린더에서의 1차원 열전도식을 사용할 수 있고 다음과 같이 식을 간략화 할 수 있다⁽⁵⁾.

$$q_i' = \frac{2\pi k_s(T_{s,in} - T_{s,out})}{\ln(r_{s,out}/r_{s,in})} = \frac{2\pi k_f(T_{f,b} - T_{f,sur})}{\ln((l_f + r_{s,out})/r_{s,out})} \quad (3)$$

식(3)에서 k 는 유효 열전도율, r 은 반지름, 하첨자 s 는 실린더, f 는 서리를 가리키며, $T_{s,in}$ 은 실린더 안쪽의 온도, $T_{s,out}$ 은 실린더 바깥쪽 온도, $T_{f,sur}$ 은 서리층 표면의 온도, $T_{f,b}$ 는 서리 밑부분의 온도, l_f 는 서리층의 두께를 가리킨다. 실험 결과에 따르면 실린더 내부의 온도 분포는 1차원 열전도의 온도 분포와 0.5°C 범위에서 일치함을 알 수 있었다. 따라서 금속내부에서의 온도분포와 서리의 두께, 질량전달률, 공기의 온도, 서리표면의 온도를 측정하면 서리의 유효 열전도율과 대류열전달 계수를 구할 수 있게 된다. 본 실험에서는 이중에서 서리의 두께와 유효 열전도율에 대한 실험 자료를 구하고자 한다. 식(3)을 정리하여보면 식(4)와 같이 되며 유효 열저항은 식(5)와 같이 정의한다. 실험결과는 9.0%의 오차값을 가진다.

$$k_f = \frac{k_s(T_{s,in} - T_{s,out})\ln((l_f + r_{s,out})/r_{s,out})}{(T_{f,b} - T_{f,sur})\ln(r_{s,out}/r_{s,in})} \quad (4)$$

$$R_f = \frac{\ln((r_{s,out} + l_f)/r_{s,out})}{2\pi k_f} \quad (5)$$

2.4 서리표면의 온도

서리표면의 온도를 측정하는 방법에는 다음과 같이 여러 가지가 있다.

- ① 열전대의 팁을 직접 서리표면에 접촉시키는 방법
- ② 냉각표면에 법선 방향으로 여러 개의 열전대를 고정시켜 놓아 서리층 내의 온도 분포를 측정 한 후 외삽법으로 표면의 온도를 결정하는 방법

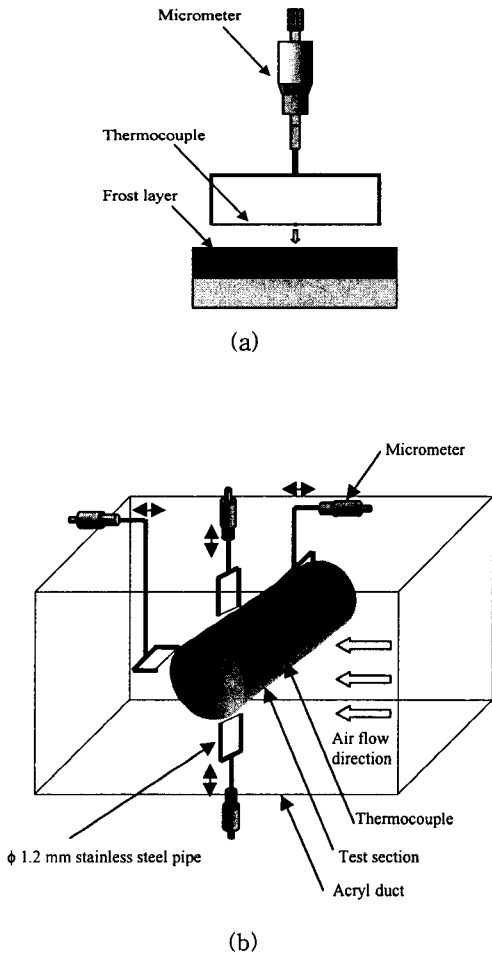
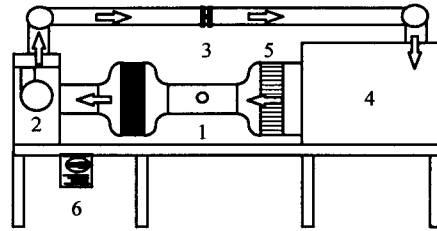


Fig. 1 Schematic diagram of measuring frost surface temperature & frost layer thickness.

- ③ 적외선 온도계 등의 비접촉식 온도계를 사용한 측정방법
- ④ 서리표면을 빙점으로 가정하는 방법
- ⑤ 서리근처의 온도 섭동을 측정하여 서리 표면의 위치와 온도를 동시에 결정하는 방법

①의 방법은 열전대 팁 주위의 서리가 액화되어 서리 근처의 공기의 온도를 측정하는 결과를 초래할 수 있다. ②의 방법은 열전대 주위의 서리 생성이 주위와 그 구조가 다르고 또한 서리가 생성되는 동안에 열전대의 팁의 위치가 움직이기



- 1 : Test section
- 2 : Fan
- 3 : Orifice
- 4 : Air controlling chamber
- 5 : Honey-comb
- 6 : Frequency inverter

Fig. 2 Schematic diagram of air circulation loop.

때문에 많은 오차를 초래하게 된다. ③의 방법은 비접촉식 온도계와 서리와의 거리를 가깝게 하면 주위의 공기의 유동에 큰 영향을 줄뿐만 아니라 본 실험에서 사용된 실린더 표면의 서리온도 측정시 시간에 따른 형상의 변화를 교정하기에 큰 어려움이 있다. ④의 방법은 서리가 생성되는 금속표면의 온도가 비교적 높거나 서리가 생성되기 시작한지 오랜 시간이 지나서 서리가 상당히 두껍게 생성된 경우를 제외하고는 맞는 경우가 거의 없다고 할 수 있다. ⑤의 방법은 냉각표면을 기준면으로 하고 높이별로 공기의 온도를 측정하면서 최대 값들을 curve fitting한 곡선과 최소 값들을 curve fitting한 곡선이 교차한 점을 서리의 표면의 위치로 함과 동시에 서리 표면의 온도로 하는 것인데 그 온도의 섭동이 열전대의 오차 범위에 들어가기 때문에 신뢰도가 떨어진다고 볼 수 있다. 본 실험에서는 Fig. 1과 같은 장치를 사용하여 서리의 온도와 두께를 네 부분에서 동시에 각각 5회씩 6초 간격으로 측정하였다. 피복을 벗긴 지름 0.01 mm의 T-Type 열전대를 냉각표면에 평행한 방향으로 팁을 내어서 마이크로미터에 장치하였으므로 유동의 방해를 최소화하고 열전대로부터의 열전도로 인한 서리의 액화 현상을 최소화하였다. 또한 두께 측정에 있어서는 기준시편에 대한 30회 반복 측정을 수행한 결과 0.04 mm의 표준편차를 갖는다는 것을 알 수 있었다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 공기 순환부

공기 순환부는 Fig. 2와 같이 구성하였다. 공기의 순환 과정을 보면 공기조절부에서 나온 공기가 Honey-Comb을 지나면서 유동이 안정화되고 콘트렉션 부분을 지나서 균일 유동이 된 후 시험부를 지나게 된다. 시험부를 지난 공기는 팬을 지난 후 리턴 덕트를 지나는 도중에 오리피스를 지나게 된다. 이러한 과정을 거친 공기는 다시 공기조절부로 돌아오게 된다. 덕트 내의 풍량은 인버터를 사용하여 팬으로 공급되는 전원의 주파수를 변화시켜 줌으로써 조절하였고 풍량은 오리피스 양단의 차압을 측정함으로써 계속하였다. 공기조절부에는 히터, 냉동기, 진동판형 가습기로 구성되어서 공기의 온도와 습도를 조절하였다. 공기 온도의 표준편차는 0.4°C 였고 습도의 표준편차는 최대 3.0%였다. 시험부가 장착되는 부분은 가로가 160 mm이고 높이가 210 mm인 사각 덕트이다.

3.2 이차유체 순환부

이차유체로는 에틸렌글리콜과 물을 50:50으로 섞어서 사용하였으며 냉동기의 증발기와 이차유체의 순환부 일부분이 판형 열교환기에 연결되어 있어서 열교환을 하도록 하였다. 이차유체는 항온조에서 나와서 예열기가 부착되어 있는 관을 지난 후 시험부를 지나게 된다. 시험부의 열을 흡수한 후 펌프를 지나 판형 열교환기로 유입되어 열교환을 한 후 다시 항온조로 들어가게 된다. 시험부 표면 온도는 -17°C 이다.

3.3 시험부

시험부는 Fig. 3과 같이 구성하였다. T-Type 열전대가 삽입되는 부분은 스테인레스 스틸 304를 재료로 하여 지름 70 mm인 실린더로 가공하여 사용하였다. 시험부 가운데 지름 17 mm인 구멍을 가공한 후 0.5 in 규격의 스테인레스 스틸 관을 삽입하여, 이차유체가 관의 내부를 통하여 공급된 뒤 다시 관의 외부와 실린더 사이를 동심관 사이의 유동으로 흘러나오게 하였다. 이렇게

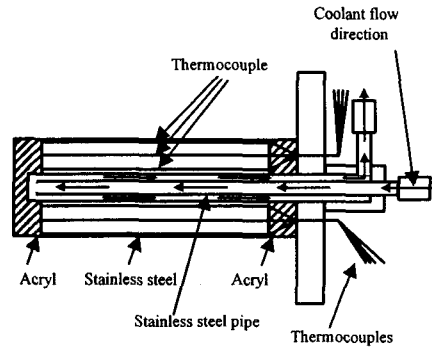


Fig. 3 Schematic diagram of test section.

유로를 구성함으로써 실린더 내부에서 이차유체를 한 방향으로만 흘리는 유로 구성보다 축방향으로의 온도차를 줄이고 시험부가 외팔보 형태를 갖추어 실험중 작업이 용이하도록 하였다. 이차유체의 유입과 유출은 열교환형 티를 사용하여 구성하였다. 스테인레스 스틸 304를 재료로 제작한 가운데 부분은 원주방향으로 0° , 90° , 180° , 270° , 반경방향으로 9 mm, 21.75 mm, 34.5 mm인 위치에 지름 0.9 mm의 구멍을 뚫은 후, 축방향으로 30 mm, 80 mm, 130 mm인 위치에 각각 열전대를 삽입함으로써 36군데의 온도를 측정할 수 있도록 하였다.

4. 실험결과 및 분석

시간에 따른 서리층 두께의 변화를 Fig. 4에 제시하였다. 그림에서 공기 유동의 방향을 기준으로 하여서 실린더의 앞부분은 $\theta=0^{\circ}$, 위부분은 $\theta=90^{\circ}$, 실린더의 뒷부분은 $\theta=180^{\circ}$, 실린더의 아래부분은 $\theta=270^{\circ}$ 를 나타내며, 화살표 방향이 시간에 따른 서리층의 성장 방향이다. T_{air} 는 유입공기의 온도, w 는 유입공기의 절대습도를 나타내며 Re_a 는 시험부의 직경을 기준으로 한 레이놀즈 수이다. 서리층의 두께는 모든 위치에서 계속 증가함을 알 수 있다. 하지만 균일한 두께의 서리층이 생성되지 않고, $\theta=0^{\circ}$ 와 $\theta=180^{\circ}$ 인 위치에 $\theta=90^{\circ}$, $\theta=270^{\circ}$ 인 위치보다 더 두꺼운 서리층이 형성되었음을 알 수 있다. $\theta=0^{\circ}$ 인 위치, 즉 실린더의 앞부분에서는 정체점이 생성되고 경계층의 두께가 얇으므로 열 및 물질전달이 활발하게 일어나기 때문에 더 두꺼운 서리층이 생성된 것이다.

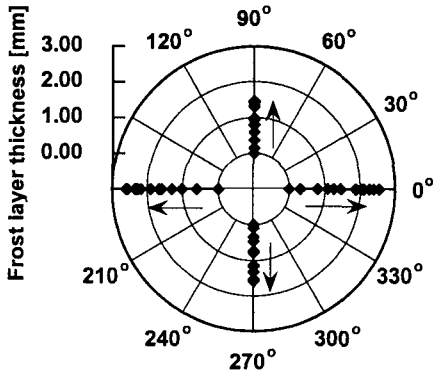


Fig. 4 Frost thickness with respect to time for circumferential position.
($T_{air}=9.9^{\circ}C$, $Re_d=10480$, $w=3.17$ g/kg_{DA})

$\theta=180^{\circ}$ 인 위치, 즉 실린더의 뒷부분에서의 두터운 서리층 형성은 박리가 일어난 후, 후류 내의 와류 생성으로 인해 혼합 및 확산효과가 커져서 열 및 물질전달이 촉진되기 때문이다. 시간에 따른 서리층의 유효 열전도율의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 서리가 생성된 지 약 3시간이 지나도 얼음의 열전도율(약 2 W/m-K)의 10%에도 미치지 못한다는 것을 알 수 있다. 따라서 전체 서리층의 구조는 다공성 구조를 유지하고 있다는 것을 알 수 있다. 시간에 따른 서리층의 유효 열저항값의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 시간에 따른 유효 열저항 값의 증가는 열교환기의 관점으로 볼 때 서리층의 단열효과가 시간에 따라 증가하고 있음을 보여주고 있는 것이다.

유입공기의 습도 조건이 서리층의 성장에 미치는 영향을 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 유입공기의 습도가 높아지면 유동공기와 서리표면간의 수증기 농도차가 커져서 농도차에 의한 구동력을 증가시켜 서리층의 성장이 촉진된다고 알려져 있다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 유입공기의 습도가 높을수록 더 두터운 서리층이 생성된다는 것을 알 수 있었다. 또한 서리층의 유효 열전도율의 시간에 따른 변화를 Fig. 9에 나타내었는데 두 경우에 있어서 유효 열전도율이 모두 시간에 따라 그 값이 증가하였으나 유입공기의 습도가 더 높은 경우에 생성된 서리층이 더 큰 유효 열전도율을 갖음을 알 수 있었다. 두께 변화를 비교한 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

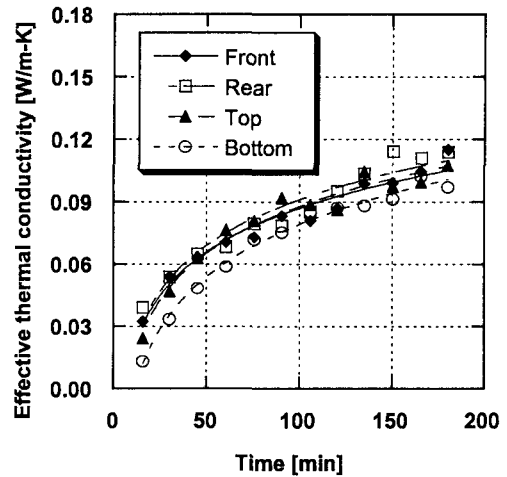


Fig. 5 Effective thermal conductivity of frost layer with respect to time.
($T_{air}=9.9^{\circ}C$, $Re_d=10480$, $w=3.17$ g/kg_{DA})

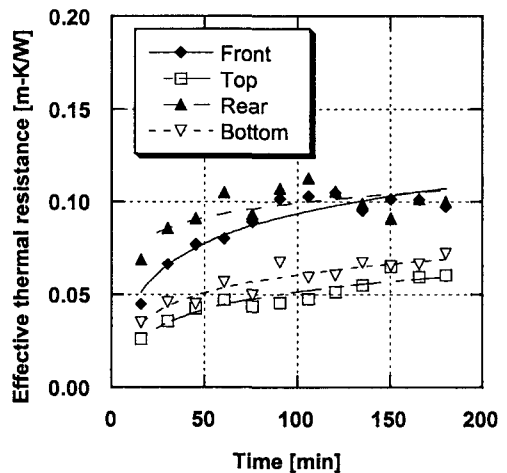


Fig. 6 Effective thermal resistance of frost layer with respect to time.
($T_{air}=9.9^{\circ}C$, $Re_d=10480$, $w=3.17$ g/kg_{DA})

그림에서 알 수 있듯이 유입공기의 온도가 높은 경우에 더 두꺼운 서리층이 생성되었다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 유입공기의 온도가 높아지면 서리층과 공기사이의 온도가 높아져서 서리층 위 부분 근처의 절대습도를 높게 하여 농도차

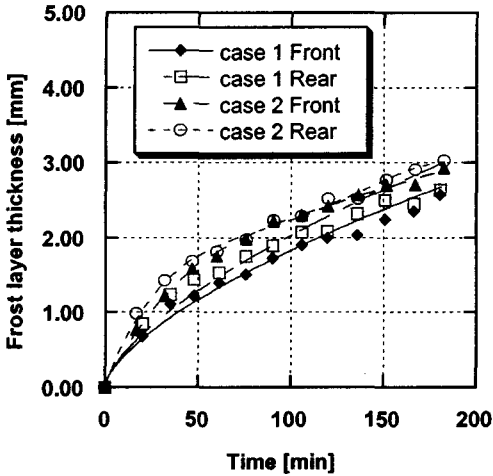


Fig. 7 Frost layer thickness with respect to time. (case 1 : $T_{air}=9.2^{\circ}C$, $Re_d=18200$, $w=2.50$ g/kg_{DA} ; case 2 : $T_{air}=9.6^{\circ}C$, $Re_d=18140$, $w=3.54$ g/kg_{DA})

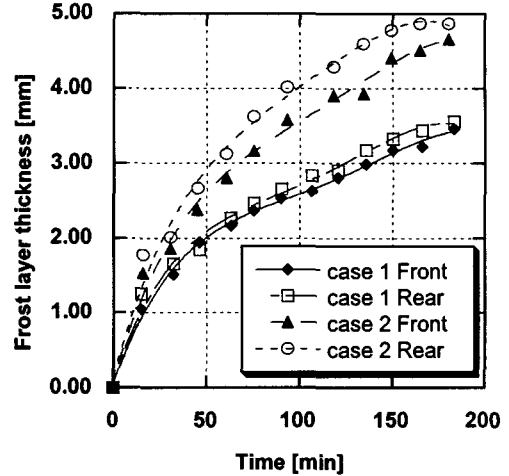


Fig. 8 Frost layer thickness with respect to time. (case 1 : $T_{air}=16.5^{\circ}C$, $Re_d=10430$, $w=3.31$ g/kg_{DA} ; case 2 : $T_{air}=16.5^{\circ}C$, $Re_d=10360$, $w=9.01$ g/kg_{DA})

에 의한 구동력을 감소시켜서 서리층의 성장률을 떨어뜨린다고 알려져 있다⁽¹⁰⁾. 하지만 응해 및 재응고 과정이 일어나지 않을 때 서리층의 성장은 유동 공기로부터 서리층으로 흡수되는 열전달에 영향을 받는 승화 과정에 더 지배적인 영향을 받는다고 알려져 있다⁽¹¹⁾. 유입공기의 이슬점이 영상일 때 서리의 생성은 공기중의 수증기 입자가 냉각 표면에 과냉된 액상으로 응축된 후 다시 얼음으로 변환 후 이것이 서리층으로 증착되지만⁽⁶⁾ 유입공기의 습도가 빙점 이하의 이슬점을 갖는 경우에는 공기중의 수증기가 바로 고체로 변하는 승화과정이 주로 일어날 것이라고 생각된다. 또한 서리층의 생성시 농도차에 의한 구동력으로 인하여 수증기 입자가 서리층으로 전달되는 물질 전달이 일어나는데 이 농도차는 냉각면 근처의 수증기 입자가 냉각면에 증착되어 냉각면 근처의 수증기 부분 압력이 유동공기중의 수증기 압력보다 작아져서 생기는 것인데 표면의 온도구배가 커지면 농도구배도 같이 커지게 되어 결과적으로 물질전달의 구동력을 커지게 할 것이므로 서리층의 성장을 더 촉진시킬 것이라고 생각된다. 하지만 서리층의 성장시에 두께 성장과 밀도성장의 두 가지 성장이 있으므로 생성된 서리층의 밀도 측정에 대한 추가 연구가 필요하다.

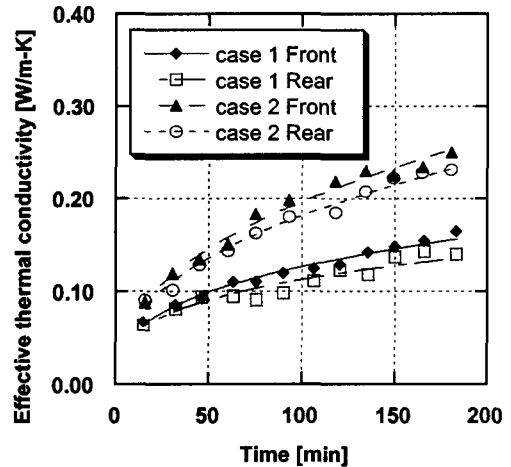


Fig. 9 Effective thermal conductivity of frost layer with respect to time. (case 1 : $T_{air}=16.5^{\circ}C$, $Re_d=10430$, $w=3.31$ g/kg_{DA} ; case 2 : $T_{air}=16.5^{\circ}C$, $Re_d=10360$, $w=9.01$ g/kg_{DA})

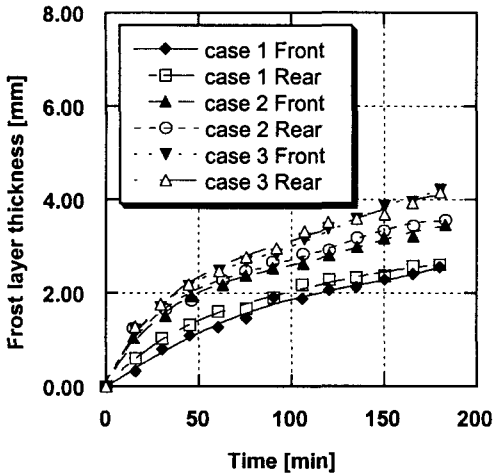


Fig. 10 Frost layer thickness with respect to time. (case 1 : $T_{air}=9.9^{\circ}C$, $Re_d=10480$, $w=3.17$ g/kg DA ; case 2 : $T_{air}=16.5^{\circ}C$, $Re_d=10430$, $w=3.31$ g/kg DA ; case 3 : $T_{air}=20.3^{\circ}C$, $Re_d=10430$, $w=3.00$ g/kg DA)

5. 결어

공기의 온도와 습도가 서리층의 두께와 유효 열전도율, 유효 열저항값에 미치는 영향을 실험을 통하여 알아보았다. 기존의 실험과 수치결과들이 고습일 경우에 대하여만 제시된 것에 비하여 본 연구에서는 공기의 습도 조건이 빙점 이하의 이슬점을 갖는 경우에 있어서 실험이 수행되었다. 모든 경우에 있어서 실린더의 앞부분과 뒷부분에서 더 두꺼운 서리층이 생성된다는 것을 알 수 있었다. 그리고, 유입공기의 습도가 더 높을수록 더 두터운 서리층이 생성되었으며 유효 열전도율도 더 큰 값을 나타내었다. 또한 좀 더 많은 경우에 있어서의 실험이 수행되어야 하고 밀도의 측정도 필요하겠지만, 실험결과에서 알 수 있듯이 유입공기의 온도가 서리층 생성에 대한 영향이 저습(유동 공기의 이슬점 온도가 빙점 이하)일 경우에 있어서는 기존의 결과들과는 상이한 경향을 보인다는 것을 알 수 있었다. 즉 유입공기의 온도가 높을수록 서리층의 생성이 촉진되었다. 따라서 서리생성 실험시에는 공기의 습

도 조건이 빙점 이하일 경우에 있어서는 해석상에 수정된 이론이 적용될 필요가 있다고 할 수 있겠다.

후 기

본 연구는 서울대학교 터보동력기계연구센터의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Padki, M. M., Sherif, S. A., and Nelson, R. M., 1989, A Simple Method for Modeling the Frost Formation Phenomenon in Different Geometries, ASHRAE Trans, 95(2), pp. 1127-1137.
2. Lee K. S., Kim W. S., and Lee T. H., 1997, A one-dimensional model for frost formation on a cold flat surface, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 40. No. 18, pp. 4359-4365.
3. Yonko, J. D., Sepsy, C. F., 1967, An investigation of the thermal conductivity of frost while forming on a flat horizontal plate, ASHRAE Trans. Vol. 73, Part 1, pp. 1.1-1.11.
4. Brian, P. L. T., Reid, R. C., and Brazinsky, I., 1969, Cryogenic frost Properties, Cryogenic Technology, pp. 205-212.
5. Yamakawa, N., Takahkshi, 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.
6. Tokura, I., Saito, H., and Kishinami, K. , 1983, Study on Properties and Growth Rate of Frost Layers on Cold Surfaces, Journal of Heat Transfer, Vol. 105, pp. 895-901.
7. 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.
8. Aoki, H., Yamakawa, N., and Ohtani, S.,

- 1981, Forced Convection Heat Transfer around a Vertical Cylinder under Frosting Conditions, HEAT TRANSFER-Japanese Research, Vol. 1, pp. 53-63.
9. Inaba, H. and Imai, S., 1996, Study on Sublimation Phenomenon of Horizontal Frost Layer Exposed to Forced Convection Air Flow and Radiant Heat, Transaction of the ASME, Vol. 118, pp. 694-701.
10. Sherif, S. A., Raju, S. P., Padki, M. M., and Chan, A. B., 1993, A Semi-empirical Transient Method for Modelling Frost Formation on a Flat Plate, Rev. Int. Froid, Vol. 16, No. 5, pp. 321-329.
11. Tao, Y. -X., Mao, Y., and Besant, R. W., 1994, Frost Growth Characteristics on Heat Exchanger Surfaces, HTD-Vol. 286, Fundamentals of Phase changes : Sublimation and Solidification, ASME, pp. 29-38.