

수평 실린더 표면의 착상에 대한 실험적 연구

백상진* · 이윤빈** · 노승탁***

An Experimental Study of Frost Formation on the Horizontal Cylinder

Sang Jin Paik, Yoon Been Lee and Sung Tack Ro

Key Words : Frost Layer(서리층), Cylinder(실린더), Thickness(두께), Density(밀도), Effective thermal conductivity(유효 열전도율)

Abstract

In this study, thickness, density and effective thermal conductivity of frost forming on the horizontal cylinder were measured with various air temperature and humidity. Reynolds number and temperature of cooling surface are controlled 17300 and -15°C respectively. In each case of air temperature 5°C , 10°C , 15°C , varying absolute humidity, experiments were executed. In measuring frost surface temperature and thickness of frost layer, infrared thermocouples and CCD camera were used. Frost was gathered from cylinder to measure mass of frost layer. Experimental data showed that the thickness and effective thermal conductivity of the frost layer increase with respect to time. Thickness of frost layer increase with humidity increasing, and density of frost layer increase with air temperature rising. Frost growth with air temperature and density of frost layer with humidity are affected by whether dew point is below or above freezing point.

기호설명

k	:	열전도율
l	:	두께
r	:	실린더 중심으로부터의 거리
Re	:	레이놀즈 수
T	:	온도
w	:	절대습도

하첨자

a	:	공기
b	:	밀부분
f	:	서리
in	:	안쪽
out	:	바깥쪽
sur	:	표면
DA	:	건공기

1. 서론

에어컨, 냉장고, 히트펌프 등의 냉동장치에 사용되는 증발기가 공랭식 열교환기인 경우에 있어서 증발기 표면온도가 빙점이하로 되면 수증기를 포함한 공기로부터 물분자가 동결부착된 서리가 열교환기 표면에 생성된다. 생성된 서리는 열교환기에 영향을 미치게 되는데, 초기에는 이러한 서리의 증착이 열교환기 표면에서의 흰 효과를 가져와서 열전달을 촉진시키게 된다. 하지만 시간이 지남에 따라서 서리의 두께가 두꺼워지고 그 구조도 변함으로써 열전달을 방해하는 단열효과를 가져오게 되고 또한 열교환기를 지나가는 공기 측의 유로를 좁게 하여 열교환기 전후의 압력강하를 상승시키는 작용을 한다. 이러한 영향들은 냉동기의 성능을 저하시키며, 계속 방치하면 압축기의 손상을 가져온다.⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾ 따라서 열교환기를 인위적이고 주기적인 방법으로 제상해 줄 필요가 있는데 이러한 제상은 대부분이 가열방법 이므로 전체 시스템의 성능저하를 가져오게 된다. 그러므로 효율

* 서울대학교 대학원 기계공학부

** 회원, 서울대학교 대학원 기계공학부

*** 회원, 서울대학교 공과대학 기계항공공학부

적인 제상을 위하여 제상의 주기, 시간, 방법 등이 적절하게 이루어지도록 서리생성의 기본적인 특성들이 여러 외부조건들에 대하여 필요하다. 서리의 성장은 비정상상태에서 열전달 및 물질전달을 동시에 수반하고 서리표면의 거칠기로 인한 경계층 내에서의 난류효과를 유발하기 때문에 그 해석에 많은 어려움이 있다. 또한 서리표면의 온도가 빙점에 도달하였을 때에는 서리표면이 **melting & refreezing cycle** 을 반복하면서 서리층 내의 구조에 변화를 가져와 밀도와 유효 열전도율을 커지게 한다. 본 실험에서는 유입공기의 온도가 5°C, 10°C, 15°C 인 경우, 강제대류하의 직교유동에 놓인 수평실린더 표면에 생성되는 서리층의 두께, 밀도, 유효 열전도율의 변화를 일정한 레이놀즈 수와 빙점근처의 이슬점을 갖는 유동공기에 대하여 유동 방향에 대한 실린더의 전면, 후면의 위치에 대해 알아보았다.

2. 이론

2.1 서리 생성 주요인자

서리 생성시 영향을 주는 주요인자로는 유동공기의 속도와 습도 및 온도, 그리고 냉각판의 온도 등의 네 가지를 들 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 증가는 서리-공기간의 온도를 높아지게 하여 서리표면 근처의 수증기의 부분압력이 높아지게 되고 서리표면과 공기유동간의 농도차에 의한 구동력을 감소시켜 서리의 증착률을 떨어뜨리게 된다. 하지만 첫 번째 영향이 두 번째보다 더 지배적이어서 레이놀즈 수의 증가는 서리층 성장을 더 촉진시킨다.⁽⁴⁾ 유입공기의 온도도 서리-공기 사이의 온도에 영향을 줌으로써 서리층 생성에 영향을 주게 되고, 습도는 농도차에 의한 구동력에 영향을 주어서 습도가 커지면 서리층의 성장률을 커지게 한다.⁽⁴⁾ 또한 서리표면이 빙점에 도달하게 되면 **melting & refreezing** 과정이 시작되게 되는데 서리 표면에서 액화된 물분자들이 서리층의 아래 부분으로 이동하고 빙점 이하의 표면에 도달하게 되어서 다시 응고되게 된다. 이러한 과정이 반복되면서 서리층의 밀도와 유효 열전도율은 커지게 된다. 이러한 **melting & refreezing** 과정은 유입공기의 온도가 높을수록 습도가 높을수록 더 잘 나타난다.⁽²⁾ 그리고 일반적으로 냉각표면의 온도가 낮을수록 서리성장이 증가

한다고 알려져 있다. 이와 같이 유입공기의 온도, 절대습도, 속도, 냉각표면의 온도는 대류열전달 계수, 물질전달계수, 농도차에 의한 구동력, 서리-공기간의 온도, **melting & refreezing** 과정 등과 복잡하게 연결되어서 서리의 착상률 및 열역학적 물성치에 영향을 주게 된다.

2.2 서리의 성장구조

서리의 성장과정은 열 및 물질전달을 동시에 수반하는 복잡한 물리적 현상이며, 더욱이 서리의 구조는 성장환경과 시간에 따라 변화한다. 그러므로 서리의 물성치는 시간과 위치, 내부구조에 따라 변하게 된다. 시간에 따른 서리의 성장구조는 다음과 같이 크게 세가지로 관찰되어 구분된다.⁽⁵⁾ 서리생성초기의 성장단계(**crystal growth period**)에서는 서리결정들이 서로 떨어진 채로 수직방향으로만 성장하며, 서리층 성장단계(**frost layer growth period**)에서는 각 결정들이 서로 가지를 치며 3차원으로 성장하여 서리층을 형성하게 된다. 따라서 이때는 밀도가 증가하고, 표면이 평평해지며, 내부적으로 수증기의 확산이 일어나게 된다. 마지막으로 완전한 서리층 성장단계(**frost layer full growth period**)가 되면 형상에는 특별한 변화가 없고, 서리표면 온도가 빙점에 도달하여 **melting and refreezing** 현상으로 인해 서리층이 촘촘해지고 단단해지며 서리는 성장을 멈추고 열적평형을 이루게 된다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 서리생성 장치

실험 장치는 크게 공기 순환부와 공기조절부, 이차유체 순환부, 그리고 시험부로 나누어 볼 수 있다. 공기 순환부는 Fig. 1 과 같이 구성하였다. 공기의 순환 과정을 보면 공기조절부에서 나온 공기가 **Mesh** 와 **Honey-Comb** 을 지나면서 유동이 안정화되고 콘트랙션 부분을 지나서 균일 유동이 된 후 시험부를 지나게 된다. 시험부를 지난 공기는 다시 **Honey-Comb** 을 지난 후 팬으로 유입되어서 압상이 높아지게 되고 리턴 덕트를 지나는 도중에 오리피스스를 지나게 된다. 이러한 과정을 거친 공기는 다시 공기조절부로 돌아오게 된다. 시험부가 장착되는 부분의 덕트의 규격은 가로가 160mm 이고 높이가 210 mm 이며 시험부는 콘트랙션이 끝난 부분으로부터 하류방향으로 650 mm 인 부분에 장착되었다. 공기 조절부는 Fig. 2 에서 보듯이 3 개의 정방형 아크릴 챔버를 연결하여 구성하였는

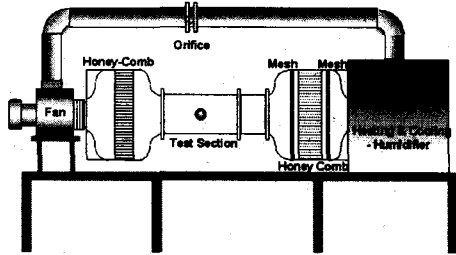


Fig. 1 Schematic diagram of air circulation loop.

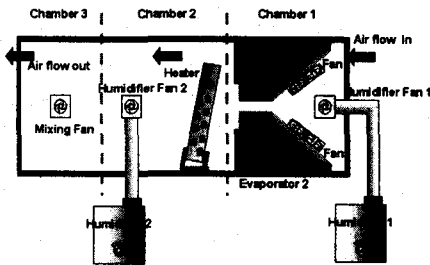


Fig. 2 Schematic diagram of air conditioning chamber.

데, 첫 번째 챔버에는 열교환기를 장착하여 공기의 온도를 낮추도록 하였다. 증발기에는 에틸렌글리콜과 물을 50:50으로 섞어서 펌프로 순환시켰으며, 이는 냉동기와 판형열교환기를 통하여 저온의 상태를 유지한다. 첫 번째와 두 번째 챔버에는 각각 가습기가 1대씩 장착되어 있고 가습을 원활히 하기 위하여 작은 팬을 끝에 달아 놓았다. 그리고 두 번째 챔버에 공기히터를 설치하여 온도조절을 하도록 하였다. 세 번째 챔버에는 스티어링 팬을 달아서 공기의 온도와 습도가 균일하게 되도록 하였다. 이차유체 순환부에서 이차유체로는 에틸렌글리콜과 물을 50:50으로 섞어서 사용하였으며 냉동기에서 공급되는 브라인과 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 냉동기의 브라인과 열교환을 하여 온도가 낮아진 후 다시 항온조로 들어가게 된다. 항온조의 온도는 $-22.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 를 유지하였고 시험부의 바깥쪽 표면 온도는 -15.0°C 를 유지하도록 하였다. 시험부는 Fig. 3과 같이 스테인레스 스틸 304를 지름 70mm, 길이 160mm인 중공실린더로 가공하여, 원주방향으로 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$, 반경방향으로 15.0 mm, 33.5 mm인 위치에 지름 2.0 mm의 구

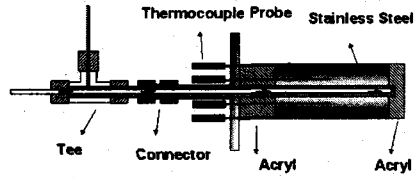


Fig. 3 Schematic diagram of test section.

멍을 뚫은 후, 축방향으로 80 mm인 위치에 각각 T-Type probe를 삽입함으로써 실린더의 4방향에 대하여 안쪽, 바깥쪽의 총 8군데의 온도를 측정할 수 있도록 하였다. 시험부 중앙에는 0.5 in 규격의 스테인레스 스틸 관을 삽입하여 이차유체가 관의 내부를 통하여 공급된 뒤 다시 관의 외부와 실린더 사이 환영공간으로 흘러나오게 하였다. 그리고 이차유체의 유입과 유출은 열교환형 티를 사용하여 구성하였다. 그림에서 보면 화살표의 방향이 이차유체의 유동방향을 나타내고 있다.

3.2 계측 방법

서리의 표면온도는 비접촉식 적외선 온도계를 사용하여 측정하였다. 실린더의 공기유동방향에 대한 전면, 후면, 윗면, 아랫면의 서리표면의 온도를 동시에 측정하기 위하여 4개의 적외선 온도계를 사용하였고, 서리 질량측정에 용이하도록 비측정시에는 덕트 바깥쪽에 있다가 측정시에만 측정 위치에 오도록 실린더 축방향으로 이동장치를 사용하였다. 서리의 두께는 CCD 카메라를 이용한 영상분석으로 측정하였다. 카메라로 얻은 영상을 컴퓨터로 캡처하여 이미지 파일로 저장한 후 이미지의 픽셀을 계산하여 서리의 두께를 측정했다. Fig. 4에서 보듯이 카메라 렌즈를 실린더의 경계면에 오도록 세팅한 후 서리가 생기기전에 찍은 사진과 서리생성 후의 사진을 분석하여 경계면의 위치의 차이를 픽셀로 계산하면 서리의 두께를 얻을 수 있다. 실린더의 전면과 후면에서의 서리두

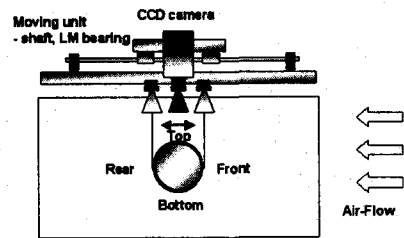


Fig. 4 Schematic diagram of thickness measurement.

계를 각각 측정하기 위해 이송장치를 이용하여 카메라의 이동을 정밀하게 수행하였다. 서리의 질량은 유입공기에 대한 시험부의 전면과 후면의 각각 60°에 해당하는 면적의 서리를 긁어내어 측정하였다. 서리의 채취는 실험시작 3 시간 후에 모든 실험장치들을 끄고, 시험부 양단에 위치한 60° 고정 흡에 알루미늄 재질의 가이드를 설치한 후에 실시하였다. 채취한 서리는 미리 질량을 측정한 알루미늄 박판에 담아서 정밀저울로 질량을 측정하였다.

3.3 자료의 처리

실험결과로 얻을 수 있는 데이터는 서리의 두께, 표면온도, 질량, 실린더내의 온도분포이다. 서리의 두께와 표면온도는 15 분마다 측정하였고, 질량은 3 시간 후의 최종질량이다. 서리층의 유효 열전도율 계산에 있어서 실린더를 통과하는 열유속이 서리층을 통과하는 열유속과 같다고 가정하면 다음과 같은 식이 성립한다.

$$q_i = \frac{2\pi k_s (T_{s,in} - T_{s,out})}{\ln(r_{s,out}/r_{s,in})} = \frac{2\pi k_f (T_{f,b} - T_{f,sur})}{\ln((l_f + r_{s,out})/r_{s,out})} \quad (1)$$

(1)식은 축방향 및 원주방향 열전달을 무시하고 반경방향의 열전달만 고려한 실린더에서의 1차원 열전도식이다. (1)식을 정리하면 다음과 같다.

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

식(2)에서 k 는 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 밀부분의 온도, l_f 는 서리층의 두께를 가리킨다. $T_{f,b}$ 는 $T_{s,out}$ 과 같다고 가정하여 계산한다. 서리의 밀도는 채취한 서리의 질량을 서리의 최종 두께로 계산한 부피로 나누어서 계산한다. 이때 실린더 축방향에 대하여 서리의 두께는 균일하다고 가정한다.

4. 실험결과 및 분석

시간에 따른 서리층 두께의 변화를 Fig. 5 와 Fig. 6 에 제시하였다. Fig. 5 에는 공기온도 10°C에서 절대습도의 변화에 따른 서리층 두께의 변화를 실린더의 전면, 후면에 대하여 나타내었다. 시간에 따른 서리층 두께의 증가는 당연한 것이고, 습도가

증가할수록 서리층 성장이 커짐을 알 수 있었다. 이는 공기의 절대습도가 증가하면 유동공기와 서리표면과의 수증기 농도차가 커져서 농도에 의한 구동력이 증가하기 때문이다. 그리고 실린더 후면보다 전면에서의 서리성장이 더 큼을 알 수가 있는데 전면에서는 정체점이 생기고, 경계층이 얇아서 열 및 물질전달이 활발하게 일어나기 때문이다.⁽⁸⁾ Fig. 6 에는 일정한 절대습도에서 온도변화에 따른 서리층 두께의 변화를 나타내었다. 먼저 Fig. 6 의 (a)를 보면 노점이 빙점 이상인 5 g/kg_{DA}에 대해서 온도가 높아질수록 서리성장이 작음을 알 수가 있다. 이는 유입공기의 온도가 증가하면 서리층 위 부분 근처의 절대습도를 높게 하여 농도에 의한 구동력을 감소시켜서 서리층의 성장률을 떨어뜨리기 때문이라고 알려져 있다.⁽⁴⁾ 그러나 Fig. 6 의 (b)처럼 노점이 빙점 이하인 3.5g/kg_{DA}인 경우에는 5°C에 대한 서리성장이 가장 큰 것은 일치하는데, 15°C일 때가 10°C에 비해서 서리성장이 큼을 알 수가 있다. 이는 용해 및 재응고 과정이 일어나지 않을 때 서리층의 성장은 유동공기로부터 서리층으로 흡수되는 열전달에 영향을 받는 승화 과정에 더 지배적인 영향을 받기 때문에 공기의 온도가 증가하면 열전달이 잘 이루어져 승화현상이 활발해져 서리의 두께가 두꺼워지는 것이라고 볼 수 있다. 특히 공기의 노점이 빙점 이하일 때는 서리생성에 있어서 승화과정이 주로 일어날 것이라고 알려져 있다.⁽³⁾⁽⁶⁾ 그러나 5°C에 대해서는 비록 노점이 빙점이하라고 해도 상대습도가 다른 온도일 때에 비해서 상당히 높기 때문에 수증기가 응축되기 쉽다. 따라서 승화과정보다는 액적응축, 응고과정이 더 지배적이기 때문에 온도가 낮아져도 서리성장이 크다고 볼 수 있다. Fig. 7 은

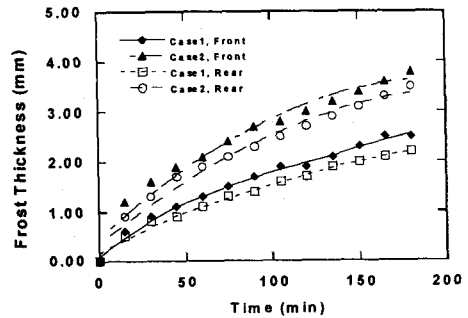


Fig. 5 Variation of frost layer thickness with humidity.
Case1 : $T_a=9.9^\circ\text{C}$, $w=3.43\text{g/kg}_{\text{DA}}$
Case2 : $T_a=9.9^\circ\text{C}$, $w=5.13\text{g/kg}_{\text{DA}}$

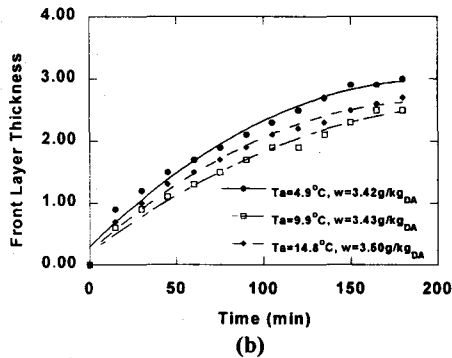
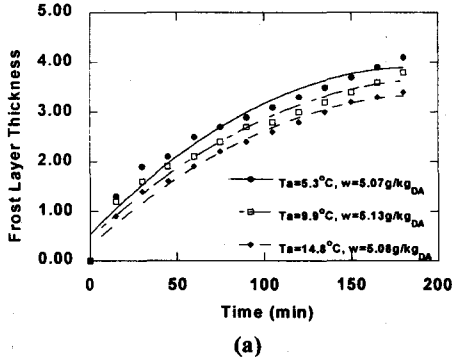


Fig. 6 Variation of frost layer thickness with temperature. (a) $w=5\text{g/kg}_{\text{DA}}$, (b) $w=3.5\text{g/kg}_{\text{DA}}$

서리의 밀도를 공기의 온도와 습도에 대해서 나타낸 그림이다. 그림에서 공기온도가 증가하면 서리의 밀도가 증가하는 것을 알 수가 있다. 그리고 이슬점이 빙점 이상일 때는 습도가 증가하면 밀도가 낮아짐을 볼 수가 있는데 이는 습도가 증가하면서 농도차이에 의한 구동력이 서리의 급속한 성장을 야기하고 이러한 성장은 서리층의 내부로의 성장이 아닌 서리층 외부로의 두께의 성장을 가져오기 때문에 밀도는 작아지게 된다고 볼 수 있다.¹⁷⁾ 그러나 이슬점이 빙점 이하일 때는 이와는 다른 양상을 보인다. Fig. 8 과 Fig. 9 에서는 서리층의 유효 열전도율을 서리의 두께에 대하여 나타내었다. Fig. 8 은 일정공기온도 5°C에 대하여 습도를 변화시키며 두께에 대한 유효 열전도율을 비교하였다. 그림에서 보면 알 수 있듯이 서리두께의 증가에 따라서 서리의 유효 열전도율도 증가함을 볼 수가 있고, 습도가 증가할수록 유효 열전도율이 낮아짐을 볼 수가 있다. 이러한 결과는 서리의 유효 열전도율이 서리층 내부의 구조에 영향을 받는다는 것을 재확인 시켜준다. 위에서 유동공기의 이슬점이 빙점 이상일 때에 습도가 증가하면 서리

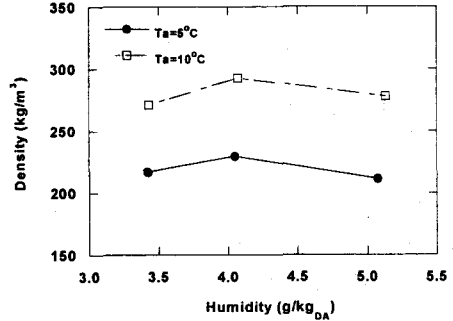


Fig. 7 Frost layer density with humidity variation.

층의 밀도는 감소한다는 결과를 얻었는데 서리층이 밀도가 작다는 것은 서리층의 내부구조가 공극률이 크다는 것을 말해준다. 따라서 서리층의 유효 열전도율은 서리층의 내부에 공극률이 커질수록 낮다는 결과를 얻을 수 있다. Fig. 9 에서는 일정결대습도 5.0 g/kg_{DA} 에 대하여 온도를 변화시키며 두께에 대한 유효 열전도율을 비교하였다. 그림에서 보면 온도가 증가하면 서리층의 유효 열전도율이 증가함을 알 수가 있는데 이는 앞에서 말했듯이 온도가 증가하면 서리층의 밀도가 커지게

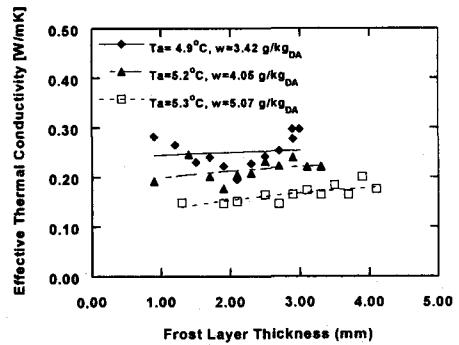


Fig. 8 Effective thermal conductivity with $T_a=5^\circ\text{C}$

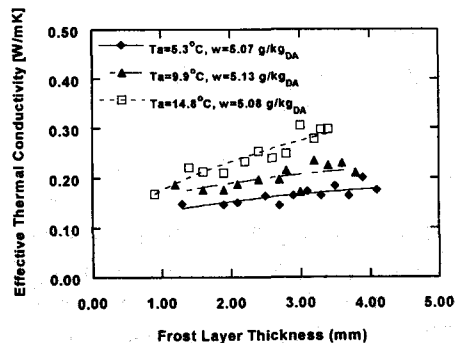


Fig. 9 Effective thermal conductivity with $w=5\text{g/kg}_{\text{DA}}$

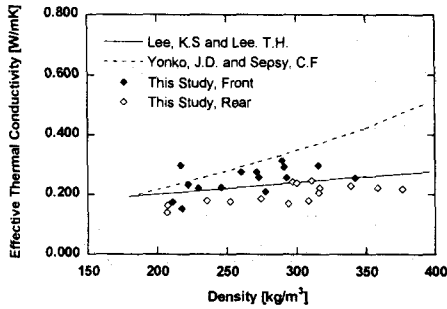


Fig. 10 Variation of effective thermal conductivity as a function of frost layer density.

되고, 서리층의 내부구조가 조밀하게 되어 서리층의 유효 열전도율이 증가하게 된다고 설명할 수 있다. Fig. 10 에서는 서리층의 유효 열전도율을 서리층의 밀도에 따라 나타내었고 기존의 상관식과 비교하였다. 그림에서 보면 Lee, K. S. 등이⁽⁷⁾ 제시한 상관식과 어느 정도 비슷한 경향을 나타냄을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 수평 실린더 위에 생성되는 서리의 두께, 밀도 및 유효 열전도율을 시간에 따라 측정하여 그 값들을 비교하였다. 실험결과 실린더의 앞부분이 뒷부분에 비해 더 두꺼운 서리층이 생성됨을 알 수 있었다. 서리층의 유효 열전도율의 변화는 시간이 지남에 따라 그 값이 커짐을 알 수 있었다. 유입공기의 이슬점이 빙점 이상일 때는 유입공기의 온도가 높아짐에 따라 서리층의 두께는 감소하고 밀도는 증가하며, 습도가 높아지면 두께는 증가하고 밀도는 감소한다. 그리고 유입공기의 이슬점이 빙점 이하일 때는 유입공기의 온도와 습도가 증가함에 따라 서리층의 두께와 밀도는 증가한다. 따라서 제상주기선정에 있어서 이슬점이 빙점 이하일 때와 빙점 이상일 때에 다른 기준을 적용해야 한다.

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) Padki, M. M., Sherif, S. A. and Nelson, R. M., 1989, "A Simple Method for Modeling the Frost Formation Phenomenon in Different Geometries", *ASHRAE Transactions*, 95(2), pp. 1127-1137.
- (3) 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.

- (4) 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.
- (5) Hayashi, Y. Aoki, A., Adachi, S. and Hori, K., 1977, "Study of Frost Properties Correlating With Frost Formation Types", *ASME Heat Transfer*, Vol. 99, pp. 239-245.
- (6) 이윤빈, 노승탁, 1999, "직교유동 내에 놓인 수평 실린더에서 서리 생성에 관한 실험적 연구", *공기조화냉동공학회 논문집*, 제 11 권, 제 4 호, pp. 448-456.
- (7) 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.
- (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) 한홍도, 노승탁, 1999, "층류유동 저습도 조건에서의 평행평판형 냉각판 서리성장 실험", *공기조화냉동공학회 논문집*, 제 11 권, 제 4 호, pp. 440-447.
- (10) 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. 1.1-1.11.
- (11) 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.