

工學碩士 學位論文

공조용 증발관에서의 상층(霜層)의  
발생 메커니즘 및 제상에 관한 연구

An Study on Frost Generation and Defrosting  
Mechanism on Evaporating Tubes for Air Conditioning  
System

指導教授 吳 喆

2006年 1月 9日

韓國海洋大學 教大學院

機關 시스템 工學科

池 在 勳

本 論 文 을 池 在 勳 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함

主 審 尹 錫 勳 印

副 審 金 明 煥 印

副 審 吳 喆 印

2006年 1月 9日

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

機 關 시 스템 工 學 科

池 在 勳

## 목 차

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| Abstract .....                   | iv |
| 사 용 기 호 .....                    | vi |
| 제 1 장 서 론 .....                  | 1  |
| 1.1 연구의 배경 .....                 | 1  |
| 1.2 종래의 연구와 목적 .....             | 5  |
| 제 2 장 서리발생 및 제상메커니즘 .....        | 8  |
| 2.1 서리생성의 주요인자 .....             | 8  |
| 2.2 서리발생 및 제상에 관한 이론 .....       | 9  |
| 2.2.1 서리발생이론 .....               | 9  |
| 2.2.2 제상이론 .....                 | 10 |
| 제 3 장 단관에서의 서리생성 및 제상 메커니즘 ..... | 13 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 3.1 실험장치 및 실험방법.....             | 13  |
| 3.2 서리량의 정량화 .....               | 20  |
| 3.3 공기유속에 따른 영향 .....            | 21  |
| 3.4 입구공기온도에 따른 영향 .....          | 37  |
| 3.5 입구공기 상대습도에 따른 영향 .....       | 55  |
| 3.6 결 론 .....                    | 68  |
| 제 4 장 관군에서의 서리생성 및 제상 메커니즘 ..... | 69  |
| 4.1 실험장치 및 실험방법.....             | 69  |
| 4.2 공기유속에 따른 영향 .....            | 74  |
| 4.3 입구공기온도에 따른 영향 .....          | 86  |
| 4.4 입구공기의 상대습도에 따른 영향 .....      | 97  |
| 4.5 결 론 .....                    | 109 |

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 제 5 장 총 결 론 ..... | 100 |
| 참 고 문 헌 .....     | 111 |
| 감사의 글 .....       | 113 |

An Study on Frost Generation and Defrosting  
Mechanism on Evaporating Tubes for Air  
Conditioning System

JEE, JAE-HOON

Depart of Marine Engineering  
Graduate School of Korea Maritime University

**Abstract**

Human basically wants to keep comfortable life. Since it was endless effort to orient economic evolution and improvement of life level, human is requiring more enjoyable life - environment in the modern. Thus, with general improvement of life level in the end 20th, refrigerating and air conditioning industrial, like refrigerator, air conditioner and more, have developed continuatively. Therefore air conditioner has widely supplied to home use from industrial use.

those air conditioners have been researched by now.

Refrigerating and air conditioning industrial are actively moving that protecting to understate environment – effect for global environment, developing to be miniaturized and be functioned for product, endeavoring to develop new technology by situation of demander but above all, they are emphasizing high efficiency of energy saving.

As this point, They have widely researched to protect to grow frost in the evaporator of refrigerator and air conditioner and efficiently defrost to save energy. but those research are not much really existed.

Therefore, We estimated mechanism about developing process of frost layer and defrosting in the evaporator through this experiments, it was researched severally inlet air temperature 15°C, 20°C, 25°C, inlet air velocity 0.3m/s, 0.6m/s, 0.9m/s and relative humidity 70%, 80%, 90%.

사용기호

|       |   |               |                           |
|-------|---|---------------|---------------------------|
| $k$   | : | 열전도율          | [ W / m · °C ]            |
| $l$   | : | 두께            | [ m ]                     |
| $L_H$ | : | 잠열            | [ kJ/kg ]                 |
| $T$   | : | 온도            | [ °C ]                    |
| $U$   | : | 속도            | [ m/s ]                   |
| $w$   | : | 질량유속          | [ kg/s · m <sup>2</sup> ] |
| $r$   | : | 동관 중심으로부터의 거리 | [ m ]                     |
| $q_s$ | : | 현열 열유속        | [ W/m <sup>2</sup> ]      |
| $q_l$ | : | 잠열 열유속        | [ W/m <sup>2</sup> ]      |
| $q_t$ | : | 총열유속          | [ W/m <sup>2</sup> ]      |
| $h$   | : | 열전달계수         | [ W/m <sup>2</sup> · °C ] |
| $c$   | : | 비열            | [ kJ/kg · °C ]            |
| $t$   | : | 브라인 온도        | [ °C ]                    |
| $r_e$ | : | 응고열           | [ kJ ]                    |

하첨자

|          |   |     |
|----------|---|-----|
| $i$      | : | 안쪽  |
| $out$    | : | 바깥쪽 |
| $f$      | : | 서리  |
| $\infty$ | : | 공기  |

$b$  : 밑부분  
 $s$  : 동관  
 $sur$  : 표면

그리스 문자

$\rho$  : 밀도 [ kg/m<sup>3</sup> ]  
 $\varphi$  : 상대습도 [ % ]

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구의 배경

인간이 쾌적한 생활을 영위하고자 하는 것은 근본적인 욕구로, 유사 이래 이것을 지향하기 위한 끊임없는 노력이 추구되어 왔으며, 경제적 발전과 생활수준의 향상으로 인하여 현대사회에서는 보다 쾌적한 생활환경을 요구하고 있다. 따라서 20세기 후반 생활수준의 전반적인 향상과 더불어 냉장고, 에어컨 등의 냉동 및 공기조화 산업은 급격히 발전되어 왔는데, 그에 따른 공기조화장치는 가정용에서부터 산업용에 이르기까지 폭넓게 보급되어왔다. 국내의 경우 이러한 공기조화장치의 보급률은 Fig. 1.1에 나타낸바와 같이 매년 꾸준히 증가하는 것을 알 수 있으며, 이는 앞서 설명한 생활수준의 향상과 더불어 보다 쾌적한 생활환경을 요구하는 단적이 예로 설명될 수 있다. Fig. 1.2에 나타낸 바와 같이 국내 에어컨 판매수량은 외환위기(IMF)사태로 인한 1998~1999년을 제외하면 그 수요는 현재까지 꾸준히 증가하고 있다. 또한 국민소득 수준의 향상에 의한 쾌적성 추구하고 선진국형 고도산업구조로 전환됨에 따라 공기조화장치는 인간생활에 없어서는 안 될 중요한 제품 중의 하나로 자리 잡고 있음을 알 수 있다.

이러한 공기조화장치와 관련된 연구는 지금까지 많이 진행되어져 왔으며, 최근의 냉동 공조 산업은 지구환경 보호를 위한 환경영향 축소, 산업의 고도화에 따른 고기능화 및 소형화된 제품개발, 수요자의 여건 변

화 등에 따른 신기술개발의 노력이 활발하게 이루어지고 있지만 무엇보다도 에너지 절약측면에서의 높은 효율성이 많이 강조되고 있다.

냉동기 및 공기조화장치의 증발기에서는 수증기를 포함한 공기가 차가운 온도로 유지되면서 응축이 발생하고, 이 때 차가운 증발기 표면의 온도가 빙점 이하가 되면 서리가 발생하게 된다. 냉동기의 증발기 표면에 서리가 발생되면 공기의 유동면적이 작아져서 공기의 속도가 줄어들고 압력강하가 증가하게 된다. 이 결과 공기를 송풍하기 위한 송풍기의 동력이 더 증가되어 에너지 손실이 증가하게 된다. 서리가 성장하기 시작하면 공기유량이 감소되고 서리층이 열 저항과 같은 역할을 하게 되어 열전달 효율이 떨어지게 되며, 이는 냉동기 전체의 성적계수가 감소함에 따라 효율이 낮아지게 된다.

증발기에 서리의 발생이 예상되면, 서리의 영향을 고려하여 이를 설계시에 고려하여야 한다. 또한 운전과정에서는 서리를 제거해야 할 시점에 대한 판단과 효율적으로 서리를 제거하는 방법에 대한 연구가 필요하다.

지금까지 냉동 공조용 증발기에서 생성되는 서리성장의 억제 와 에너지 절약측면에서 많은 연구가 이루어져 왔지만, 효율적인 제상을 위한 연구는 아직도 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 단관 및 관군의 서리 성장실험을 통하여 증발관에서 생성되는 서리의 성장 및 제상 메커니즘을 체계적으로 규명하여 효율적인 냉동공조장치 설계를 위한 기초자료를 확보하는 것을 목적으로 하고 있다.

|        |      |      |      |      |      |
|--------|------|------|------|------|------|
| 년도     | 1997 | 1999 | 2001 | 2003 | 2005 |
| 보급률(%) | 21   | 23   | 25   | 27   | 28   |

**Fig. 1.1 Supply rate of an air conditioner within a country**

|         |      |      |      |      |      |
|---------|------|------|------|------|------|
| 년도      | 1997 | 1999 | 2001 | 2003 | 2005 |
| 판매량(만대) | 132  | 74   | 116  | 142  | 164  |

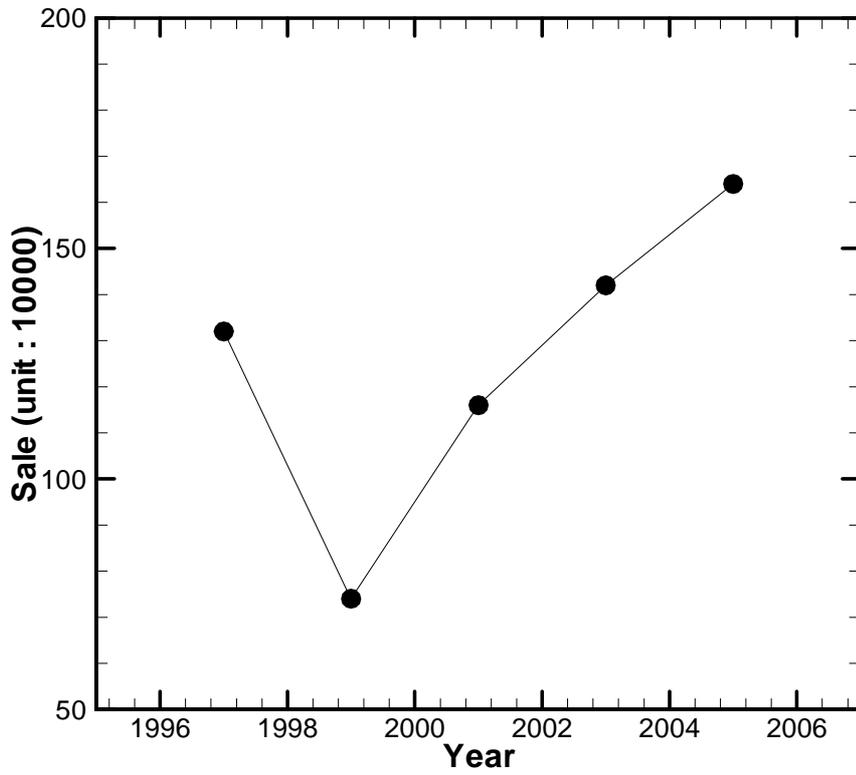


Fig. 1.2 The market scale of an air conditioner within a country

## 1.2 종래의 연구와 목적

지금까지는 일반적으로 각종산업용이나 대형건물, 가정 및 자동차에서 사용되고 있는 공기조화용 열교환기에 대해서 열교환기의 성능 및 에너지 절약의 측면에서의 많은 연구가 진행 되어왔다. 특히 이중에서 핀-관 열교환기에 있어서 열 저항의 80~85%를 차지하는 관 외측 열 저항인 핀 효율의 개선 및 열교환기 표면의 서리성장에 관한 연구 등 많은 연구가 진행 되어왔다.

서리가 발생하는 현상에 관련하여 1930년대에는 주로 실험적인 연구가 대부분이었으며, 1970년대 이후에 이론적인 해석모델 및 이를 검증하는 실험적 연구가 활발하게 진행되어 왔다. O'Neal<sup>[1,16]</sup>의 연구경과 중 하나인 실험적인 방법에서는 서리의 성장 과정, 서리층의 성장 두께, 서리의 밀도와 열전도도, 서리표면의 온도, 열전달계수 및 압력강하 등에 대한 연구 성과를 발표했다. 또한 이론적인 해석 모델에서는 주로 단순한 형상에 대하여 경계층이론을 적용한 1차원적 수치해석을 행하였다. Chung<sup>[3]</sup>은 원관에 대하여 경계층이론을 적용한 해석을 하였는데 자신들이 수행한 실험결과와 잘 일치하는 결과를 보였다. Parish<sup>[4]</sup>는 원관에 경계층이론을 적용하여 유한차분법을 이용하여 수치해석의 결과를 발표하였다. 여기에서 이들의 연구의 결과는 경계층이론을 적용할 수 없는 유동의 박리점 이후의 현상에 대한 연구 성과는 부족한 것으로 나타났다. Parker<sup>[5]</sup>는 평판에 대하여 일차원적 해석모델을 제시하였다. Abdel-Wahed<sup>[6]</sup>는 평판에서 Clapeyron-Clausius식을 이용하여 서리가 생기는 경우에 대하여 상변화 발생하는 서리표면에서의 법선방향의 속도를 표시하는 식을 유도하였다. Sherif<sup>[7]</sup>는, Abdel-Wahed가 평판에 대하여 유도하였던 서리표면에서의 법선방향의 속도를 고려한 경계층 방

정식을 블라지우스의 유동장에 대한 해를 이용하여 해석한 결과를 발표하였다. Padki<sup>[8]</sup>, Raju 및 Sheriif<sup>[9]</sup> 등은 평판과 원판 등의 단순한 형상에 대한 열 및 물질전달계수에 대한 해석을 열 및 물질전달 균형식을 이용하여 수행하였다. 이들이 이용한 서리의 물성치는 Hayashi<sup>[10]</sup>, Yonko<sup>[11]</sup> 및 Raju<sup>[9]</sup> 등이 제시한 실험식을 이용하였다. 또한 열전달계수는 Holman<sup>[17]</sup> 등의 열전달상관식을 이용하였으며, 물질전달계수로는 Colburn<sup>[17]</sup> 등의 실험식을 이용하였다.

그러나 기본적인 형상에 대한 종래의 연구결과들은 연구자에 따라 많은 차이를 보이고 있다. 그 원인은 서리의 성장조건이 온도, 습도 및 풍속 등에 따라 제각기 다른데 비하여, 첫째로 열 및 물질전달에 영향을 미치는 요소에 대한 구체적인 모델링과정의 부족과 둘째로 물질전달로 인해서 추가되는 열전달항을 무시하고 해석하였기 때문이다. 1980년대 이후에는 이상의 연구결과들을 바탕으로 복잡한 형상을 가지는 열교환기를 대상으로 컴퓨터를 이용한 모의실험 및 설계실험을 수행하였다.

또한 착상된 서리의 용해과정에 관한 연구는 열효율적인 측면을 고려할 때 매우 중요한 과제임에도 불구하고 최근까지도 이에 대한 연구가 거의 진행되지 않고 있다. Sanders<sup>[12]</sup>는 여러 가지 제상시스템에서의 제상과정을 전형화 했으며, 단순한 모델을 기초로 그 과정을 계산하였다. Katsuta<sup>[13]</sup> 등은 가열된 공기를 사용하여 착상표면을 용해시키는 방법을 조사하였다. Adachi<sup>[14]</sup> 등은 고온가스제상 시스템(Hot gas defrost)에 관한 연구를 수행하였다. Zakrzewski<sup>[15]</sup>는 최적의 제상 사이클에 대하여 발표하였다. Aoki<sup>[18]</sup> 등은 하층에서 균일 열량이 공급되는 용해모델을 선정하여 서리층에서 일어나는 수분침투와 용해수의 재 응고에 관하여 실험 및 이론 해석을 수행하였다. 또한 전체 제상과정을 용해준비기간, 착상용해기간 및 수분제거기간 등으로 구분하여 실험 및 수치해석 결과를

비교하였다. 이들 연구들은 대부분들이 평판을 모델로 하였다.

따라서 본 연구에서는 지금까지 진행되어온 연구에서 규명되지 않은 서리의 발생 및 제상 메커니즘을 파악하기 위하여 단관 및 관군을 이용하여 실험적 방법으로 접근하였다.

## 제 2 장 서리발생 및 제상메커니즘

### 2.1 서리생성의 주요인자

서리 생성 시 영향을 주는 인자로는 공기의 속도, 습도, 온도 및 냉각면의 온도 등이 주요 인자라고 할 수 있다. 유입공기의 속도가 커지면 레이놀즈수가 증가하여 대류 열전달 계수 및 물질전달 계수의 값이 커지기 때문에 서리의 증착률을 증가시켜 두께 성장률을 촉진시키게 된다.

이에 반하여 레이놀즈수의 증가는 서리층 사이에 존재하는 공기의 온도를 상승시켜 서리표면 근처 수증기의 부분압력이 높아지게 되고, 서리표면과 공기유동간의 농도 구동력을 감소시켜 서리의 증착률을 떨어뜨리게 된다. 하지만 첫 번째 영향이 두 번째보다 더 지배적이어서 레이놀즈수의 증가는 서리층의 성장을 더 촉진시킨다고 알려져 있다. 유입공기의 온도도 서리-공기 사이의 온도에 영향을 줌으로써 서리층 생성에 영향을 주게 되고, 습도는 농도 차에 의한 구동력에 영향을 주어서 그 값이 커지면 서리층의 성장률을 커지게 한다고 알려져 있다<sup>[19]</sup>. 또한 서리표면이 빙점에 도달하게 되면 용해와 재 결빙 과정이 시작되어 서리 표면에서 액화된 물 분자들이 서리층의 아래 부분으로 이동하고 빙점 이하의 표면에 도달하게 되어서 다시 응고되게 된다. 이러한 과정이 반복되면서 서리층의 밀도와 열전도율이 증가하게 한다. 이러한 용해와 재 결빙과정은 유입공기의 온도가 높을수록 습도가 높을수록 더 잘 나타난다고 알려져 있다<sup>[8]</sup>. 이와 같이 유입공기의 온도, 절대습도, 속도 및 냉각표면의 온도는 대류열전달 계수, 물질전달계수, 농도 차에 의한 구동력, 서리-공기간의 온도 및 용해와 재 결빙과정 등과 복잡하게 연결되어서 서리의 착상률 및 열역학적 물성치에 영향을 주게 된다.

## 2.2 서리발생 및 제상에 관한 이론

### 2.2.1 서리발생이론

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

$$q_i = q_s + q_l \quad (2.3.1.1)$$

$$q_l = h(T_\infty - T_f) + wL_H \quad (2.3.1.2)$$

여기서  $q_i$ 는 전체 열유속,  $q_s$ 는 현열을 통한 열유속,  $q_l$ 는 잠열을 통한 열유속이며 하첨자  $\infty$ 는 공기,  $f$ 는 서리표면을 가리킨다. 고체의 열전도율을 측정할 때에는 정상상태 열전달 과정에서의 비교측정법이 사용된다. 시험부의 표면에 서리가 생성되는 과정은 아주 느리게 진행되는 비정상상태이기 때문에 준 정상상태라고 가정할 수 있다.  $q_l$ 는 서리층과 동관을 지나서 2차유체로 전달되게 되며, 시험부에서 실린더 내부의 유동을 동심관사이의 유동으로 하여서 실린더의 Z방향 온도 분포를 일정하게 하였으므로 Z방향의 열전달은 무시하고 반경방향의 열전달만 고려하면 실린더에서의 1차원 열전도식을 사용할 수 있고 다음과 같이 식을 간략화 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
q_t &= \frac{2\pi k_s (T_{s,i} - T_{s,out})}{\ln(r_{s,out}/r_{s,i})} & (2.3.1.3) \\
&= \frac{2\pi k_f (T_{f,b} - T_{f,sur})}{\ln((l_f + r_{s,out})/r_{s,out})}
\end{aligned}$$

### 2.2.2 제상이론

$\tau = 0$ 일 때에 증발기의 벽 및 서리층의 온도는 브라인 온도  $T_b$ 와 같으며, 일정한 열유속이 동관으로부터 공급되는 것으로 한다. 단계 1에서는 동관의 온도가  $0^\circ\text{C}$ 가 될 때까지 가열되고, 동관 전체가 동일한 상태로 가정되며, 서리층의 열용량과 동관의 열저항은 무시한다. 이 경우에 동관이  $0^\circ\text{C}$ 가 되기 전까지 소요되는 시간( $\tau_{all}$ )은 아래의 식으로부터 계산할 수 있다.

$$q = W_s \frac{dT_s}{d\tau} + \left(\frac{1}{h_\infty} + R_f\right)^{-1} (T_s - T_\infty) \quad (2.2.2.1)$$

여기서  $\tau = 0 : T_s = T_b$   $T_s = 0 : \tau = \tau_{all}$ 이다.

식 (2.2.2.1)에서 오른쪽 변의 첫 번째 항은 증발기 벽의 열용량을 고려한 것이며, 두 번째 항은 서리층의 열저항을 고려한 열전달이다. 미분방정식의 해는 아래와 같이 주어진다.

$$T_s = \exp(-s\tau) \left[ \exp(s\tau) \frac{T_b}{s} + c \right] \quad (2.2.2.2)$$

여기서  $c$ 의 값을

$\tau = 0$  :  $T_s = t$  의 조건으로부터 구하며 대입하면

$$T_s = \frac{T}{s} + (t - \frac{T}{s}) \exp(-s\tau) \quad (2.2.2.3)$$

$T_s = 0$  ,  $\tau = \tau_{dl}$  의 조건으로부터 해를 구하면 다음과 같다.

$$\tau_{dl} = \frac{1}{s} \ln \left[ \frac{\frac{T}{s} - t}{\frac{T}{s}} \right] \quad (2.2.2.4)$$

여기서 서리층의 두께  $S$ 와 온도  $T$ 는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$s = \frac{1}{W_s \left( \frac{1}{h_\infty} + R_f \right)} \quad (2.2.2.5)$$

$$T = \frac{q}{W_s} + \frac{T_\infty}{W_s \left( \frac{1}{h_\infty} + R_f \right)} \quad (2.2.2.6)$$

동관의 온도가  $0^\circ\text{C}$ 에 도달하는 순간,

① 서리가 융해하여 융해수가 생기고 그 융해수가 모세관력에 의해

즉시 서리층으로 흡수되는 것으로 가정한다.

② 용해 중에 서리층은 동관에 부착되어 있다. 이 기간동안 동관에 공급되는 열유속은 일정하다. 공급된 열유속에 의해 서리층이 용해되며, 또한 주위로의 열손실이 일어난다.

③ 서리층 표면에서의 온도는  $0^{\circ}\text{C}$ 로 일정한 것으로 가정한다. 용해수를 흡수한 서리층의 열저항은 무시된다.

라고 가정하면, 서리층이 완전히 용해될 때까지 소요되는 시간( $\tau_{\text{d}}$ )은 아래의 식들로부터 계산될 수 있다.

$$q = \rho_f \frac{dx}{dt} r_e + h_{\infty}(-T_{\infty}) \quad (2.2.2.7)$$

식 (2.2.2.7)에서 오른쪽 변의 첫 번째 항은 서리의 용해를 나타내는 항이며, 두 번째 항은 외부로 손실되는 열을 나타내는 항이다. 아래의 주어진 두 조건을 이용하여 위의 미분방정식을 풀면 해는 다음과 같이 주어진다.

$$\tau_{\text{d}} = \frac{l_f \rho_f r_e}{q + h_{\infty} t} \quad (2.2.2.8)$$

여기서  $\tau = 0$ ,  $x = 0$ ,  $\tau = \tau_{\text{d}}$ ,  $x = l_f$ 이다.

## 제 3 장 단관에서의 서리생성 및 제상 메커니즘

### 3.1 실험장치 및 실험방법

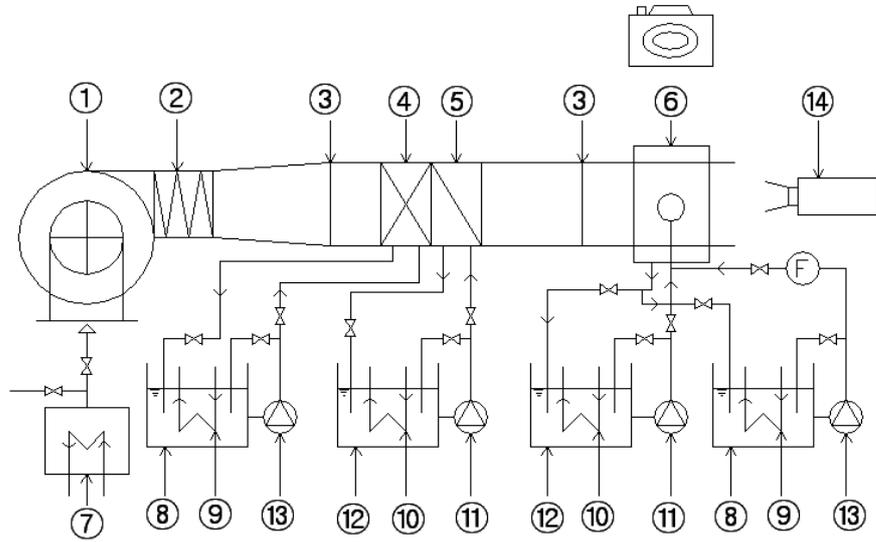
Fig. 3.1은 단관에서의 서리발생 메커니즘의 파악을 위한 실험장치의 전체 계통도이다. 그림에 나타난 바와 같이 실험장치는 개회로 풍동장치로서, 크게 공급공기의 유속을 조절하는 풍량 조절부, 공급공기의 온도를 조절하는 공기가열부 및 냉각부, 공급공기의 습도를 조절하기 위한 가습부, 동관의 온도를 조절하기 위한 브라인 순환부, 시험부 및 가시화부로 구성되어 있다.

풍량 조절부 ①은 1.5kw의 3상유도전동기를 이용한 1750rpm의 원심형 팬을 사용하였으며, 팬 입구의 댐퍼를 이용하여 풍속을 조절하였다. 공기가열부④ 및 냉각부⑤는 가로 470mm, 세로 400mm, 9단 4열의 핀-튜브 열교환기로 들어가는 온수 및 브라인의 양을 조절하여 공기를 소정의 온도로 유지하였다. 가습부⑦은 2kw의 히터를 내장한 증기가습기로 공급전압을 조절하여 발생 증기량을 조절하였으며, 팬 입구부에 설치하여 공급공기의 습도를 조절 유지하였다.

시험부(test section)는 길이 450mm, 외경 41.3mm의 동관을 사용하였고 동관내의 온도를 일정하게 유지시키기 위해서 브라인 펌프를 설치하여 브라인을 순환시킴으로서 온도를 일정히 유지하였다. 냉각면을 등온 상태로 유지시키기 위하여 시험부 동관의 입, 출구에 각각 2개씩의 열전대(C-A type)를 부착하였다.

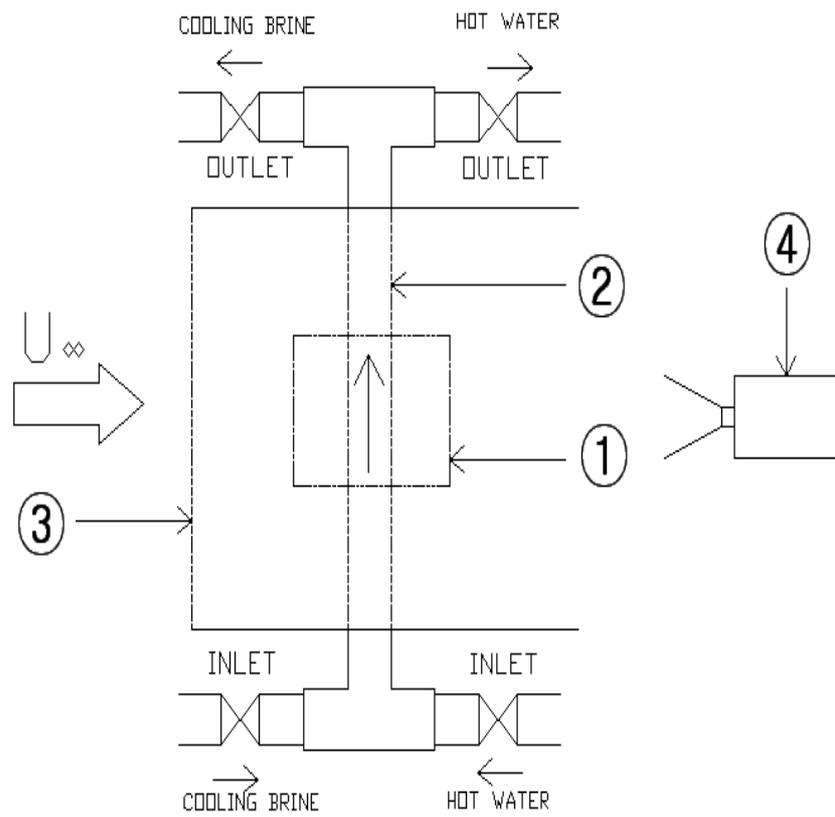
Fig. 3.2는 시험부의 상세도를 나타낸다. 가시화부는 동관 주위에서 발생하는 서리층을 관찰할 수 있도록 두께 20mm의 투명한 아크릴판을 사용하여 제작하였다. 또한 서리층을 가시화 하기위하여 일부 부분을 제외하고는 외부온도의 영향을 받지 않도록 단열 처리 및 서리층의 가시화를 위해 검은색으로 표면을 처리하였다.

동관의 입·출구부의 공기온도를 측정하기 위하여 열전대(K-type)를 2개소에 설치하였고, 동관 입·출구부에서의 상대습도는 습도계(HMP-234)를 이용하여 측정하였다. 공급공기의 풍속을 측정하기 위하여 피토크관(pitot tube)을 동관 입구부에 설치하여 덕트 내의 풍속을 측정하였다. Fig. 3.3은 본 연구에서 이용되어진 실험장치의 전경사진이다.



- |                  |                  |
|------------------|------------------|
| ① blower         | ② canvas         |
| ③ screen         | ④ heat exchanger |
| ⑤ heat exchanger | ⑥ test section   |
| ⑦ humidifier     | ⑧ water tank     |
| ⑨ heater         | ⑩ refrigerator   |
| ⑪ brine pump     | ⑫ brine tank     |
| ⑬ water pump     | ⑭ He-Ne laser    |

**Fig. 3.1 Schematic diagram of experimental apparatus**



- ① acryl plate
- ② copper tube
- ③ screen
- ④ He-Ne laser

**Fig. 3.2 Diagram of test section apparatus**



**Fig. 3.3** Photo of experimental apparatus

제3장에서는 엇갈림 관군에서의 서리생성 및 제상 메커니즘의 파악을 위한 기초 자료를 수집하기 위하여 우선 단관에 대한 실험을 선행한 것으로 유속을 0.3m/s, 0.6m/s 및 0.9m/s로, 공급공기의 온도는 15℃, 20℃ 및 25℃로 하였으며, 공급공기의 상대습도는 70%, 80% 및 90%로 하였다. 또한 동관내의 온도는 일반적 냉동기 및 공기 조화용 열교환기의 냉각온도범위를 고려하여 -15℃로 일정하게 하여 비교 검토하였다 (Table 2.1).

실험은 먼저 송풍기를 운전하여 공급되는 공기의 풍속을 소정의 풍속으로 일정히 유지한 후 대기 중의 공기를 냉각, 가열 및 가습하여 공기의 온도 및 습도가 일정한 실험조건으로 유지된 상태에서 냉각용 브라인을 냉각부로 보내어 소정의 동관 온도로 유지되는 시간을 실험개시 시간으로 하였다. 실험 중 입구공기온도는  $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 의 오차범위, 습도는  $\pm 1\%$ 정도의 오차의 범위 내로 유지하였다.

또한 동관에서 생성되는 서리층에 He-Ne 레이저광을 비추어 반사되는 빛의 양을 상부에서 디지털 카메라로 촬영하여 서리층의 밀도를 가시화 및 정량화 하였으며, 서리층의 두께를 측정하기 위하여 측면에 디지털 카메라를 설치하여 촬영하였다. 소정의 실험조건을 형성하는 동안 촬영부 아크릴판 및 동관에 발생하는 이슬을 제거하여 동일한 실험 초기 조건을 만들기 위해 실험 개시 전 비닐 랩을 부착하였으며 실험개시 비닐 랩을 제거하였다.

매 30분당 동관에서 발생하는 서리층을 디지털 카메라로 촬영과 동시에 각부의 두께를 측정하였다.  $\theta = 0^{\circ}$ 는 동관의 정면을,  $\theta = 90^{\circ}$ 는 동관의 위부분을,  $\theta = 180^{\circ}$ 는 동관의 후면을,  $\theta = -90^{\circ}$ 는 동관의 앞부분을 나타낸다. 실험이 종료된 후는 온수탱크의 40℃ 물을 순환시켜서 동관의 온도가 40℃가 되는 시점을 완전제상 시점으로 보았고 그 시간

을 기록하였다. 그리고 각각의 촬영한 서리층을 빛의 밝기로 하여 수치화하였고 그 수치를 무차원 서리밀도로 하였다.

**Table 3.1 An experimental condition**

| Condition           | Range         |
|---------------------|---------------|
| $\phi_{\infty}$ (%) | 70, 80, 90    |
| $T_{\infty}$ (°C)   | 15, 20, 25    |
| $U_{\infty}$ (m/s)  | 0.3, 0.6, 0.9 |

### 3.2 서리량의 정량화

동관의 냉각면에서 생성되는 서리량을 매 30분당 알아내기란 어려운 설정이다. 따라서 본 실험에서는 어떤 입자에 빛이 다다르면 빛이 갖고 있던 에너지가 전자에 전달되어 진동을 하게 되고 이러한 진동으로 인하여 그 진동수에 해당하는 빛이 사방으로 내보내지게 되는 빛의 산란 현상을 이용하여 서리량을 정량화 하였다. 즉 서리량이 증가할수록 동일한 밝기에서 산란현상이 증가하는 레이저광의 특성을 이용하여 서리량을 정량화하여 비교하였다.

서리의 산란용 광원으로서 20mW의 공랭식 He-Ne 레이저에 원통형 렌즈를 부착하고 서리가 생성된 동관의 단면을 촬영하기 위해서 5mm 두께의 아크릴판을 이용하여 빛을 조사하였으며, 동관에서의 서리발생 현상을 디지털 카메라(COOLPIX-4100)로 촬영하였다.

서리층에 레이저를 비추어 반사되어 나오는 빛의 밝기를 수치화하였고, 여기서 숫자는 가장 어두운 부분을 0, 가장 밝은 부분을 255로 나타나는 데, 서리의 발생량이 증가할수록 수치가 높아짐을 의미한다.

### 3.3 공기유속에 따른 영향

Fig. 3.5는  $\phi_{\infty} = 90\%$ ,  $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$ 상태를 Fig. 3.6은  $\phi_{\infty} = 70\%$ ,  $T_{\infty} = 15^{\circ}\text{C}$ 에서의 공급공기의 유속에 따른 동관에서의 서리발생현상을 실험 시작 후 120분이 경과 되었을 때 동관의 상부에서 촬영하여 가시화한 것이며, Fig. 3.7과 Fig. 3.8은 위의 동일한 조건과 같은 시점에서 동관의 측면을 가시화 한 것이다. 특히 측면에서 촬영한 사진은 그림판독 프로그램에서 색반전의 기능을 사용하여 서리층의 모양을 명확하게 하였다. Fig. 3.9는 위와 같은 조건에서 공급공기의 유속에 따른 서리량을 정량화한 결과를 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 3.10 ~ 3.15는 위의 조건에서의 동관에서 발달하는 서리층을 동관의 위치별로 두께를 측정된 것이다. 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 공급공기의 유속이 증가할수록 서리층의 두께는 계속 증가함을 알 수 있다. 하지만, 방향에 따라서 모두 균일한 두께의 서리층이 생성되지 않고,  $\Theta = 0^{\circ}$ 와  $\Theta = 180^{\circ}$ 인 위치가  $\Theta = \pm 90^{\circ}$ 인 위치보다 더 두꺼운 서리층이 형성되었다.

이것은 실린더의 앞부분인  $\Theta = 0^{\circ}$ 인 위치에서는 정체점이 생성되고 경계층의 두께가 얇아지므로 열 및 물질전달이 활발하게 일어나기 때문에 더 두꺼운 서리층이 생성된 것이며, 실린더의 후면인  $\Theta = 180^{\circ}$ 에서의 두터운 서리층 형성은 박리가 일어난 후, 후류 내의 와류 생성으로 인해 혼합 및 확산효과가 커져서 열 및 물질 전달이 촉진되기 때문에 두꺼운 서리층이 생성된 것이다.

하지만 시간이 흐르면 흐를수록 동관에서의 서리층의 성장 속도가 느려지고 있고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 초기 동관에서의 열 및 물질 전달로 인해서 급속도로 서리층이 발달하였지만 서리층이 발달하면 할

수록 서리층이 단열작용을 하기 때문이다.

Fig. 3.16은 상대습도 90%에서의 공급공기 온도 15℃, 20℃ 및 25℃인 경우에 있어서 공급공기의 유속에 따른 동관에서 생성된 서리량을 실험 종료 후, 서리를 제상한 후 그 양을 측정하여 그래프로 나타내었다.

그리고 Fig. 3.17은 습공기질량유속의 변화에 따른 동관에서 생성된 서리량을 나타낸 그래프로 입구공기유속이 증가함에 따라 습공기 질량유속은 증가하고 동시에 서리발생량의 증가폭이 커지고 있는 것을 알 수 있다. 이는 일정한 입구공기의 온도와 상대습도를 가진 습공기는 공기유속에 의해서 단관에서 생성되는 서리량의 발생율에 크게 영향을 끼치고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3.18은 Fig. 3.5와 Fig. 3.6에서 행한 실험에서 실험종료후 서리가 완전히 제상된 시간을 측정하여 그 시간을 나타낸 것이다.

전술한 바와 같이 풍속이 증가할수록 서리층이 두껍게 발생한 결과 제상 시의 제상량이 많음을 알 수 있으며, 이 결과를 이용하여 냉동기에서 증발기 측의 풍량이 어느 범위가 적당한가를 예측할 수가 있다.



(a)  $U_{\infty} = 0.3\text{m/s}$



(b)  $U_{\infty} = 0.6\text{m/s}$



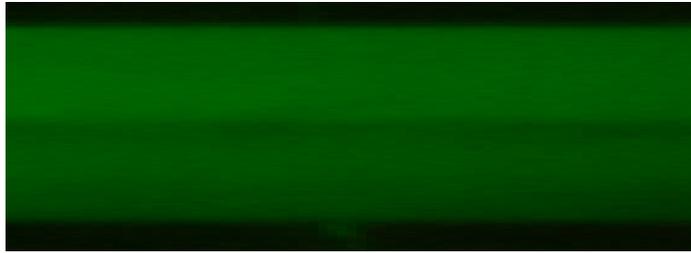
(c)  $U_{\infty} = 0.9\text{m/s}$

Fig. 3.5 Effect on supply air velocity (Upper side)

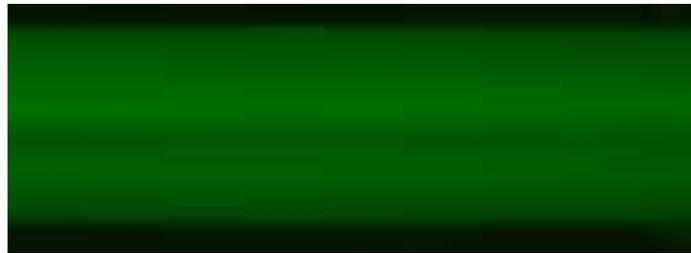
;  $\phi_{\infty} = 90\%$ ,  $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$ , 120min



(a)  $U_{\infty} = 0.3\text{m/s}$



(b)  $U_{\infty} = 0.6\text{m/s}$



(c)  $U_{\infty} = 0.9\text{m/s}$

Fig. 3.6 Effect on supply air velocity (Upper side)  
;  $\phi_{\infty} = 70\%$ ,  $T_{\infty} = 15^{\circ}\text{C}$ , 120min



(a)  $U_{\infty} = 0.3\text{m/s}$



(b)  $U_{\infty} = 0.6\text{m/s}$



(c)  $U_{\infty} = 0.9\text{m/s}$

**Fig. 3.7 Effect on supply air velocity (Right Side)**

**;  $\phi_{\infty} = 90\%$ ,  $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$ , 120min**



(a)  $U_{\infty} = 0.3\text{m/s}$



(b)  $U_{\infty} = 0.6\text{m/s}$



(c)  $U_{\infty} = 0.9\text{m/s}$

**Fig. 3.8 Effect on supply air velocity (Right Side)**  
;  $\phi_{\infty} = 70\%$ ,  $T_{\infty} = 15^{\circ}\text{C}$ , 120min

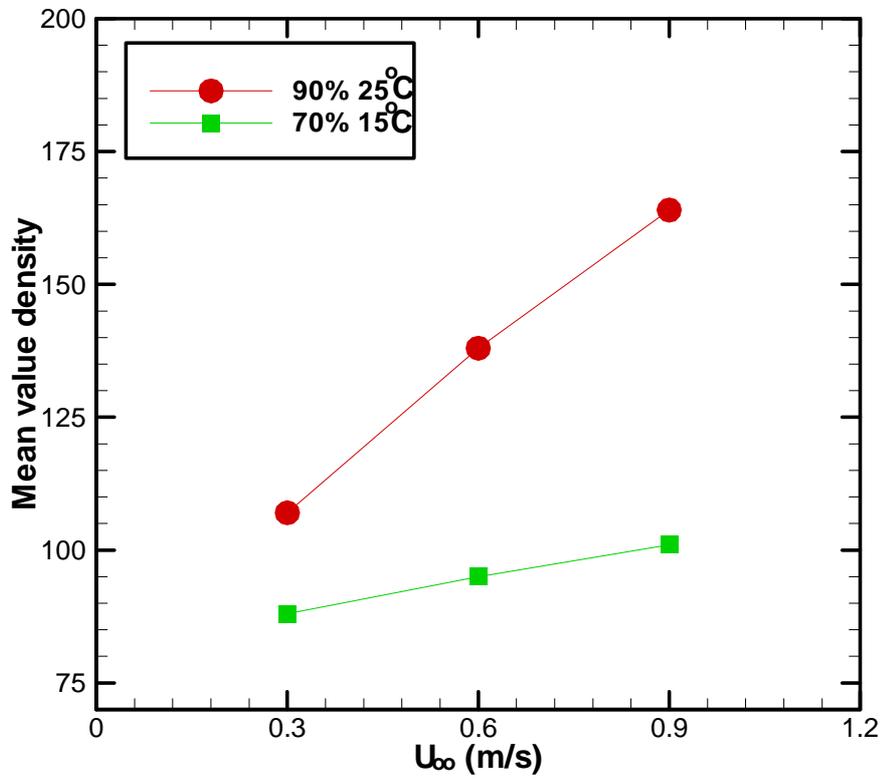


Fig. 3.9 Effect of supply air velocity on mean value of density at steady condition

;  $\phi_{\infty} = 70\%, 90\%$ ,  $T_{\infty} = 15^{\circ}\text{C}, 25^{\circ}\text{C}$

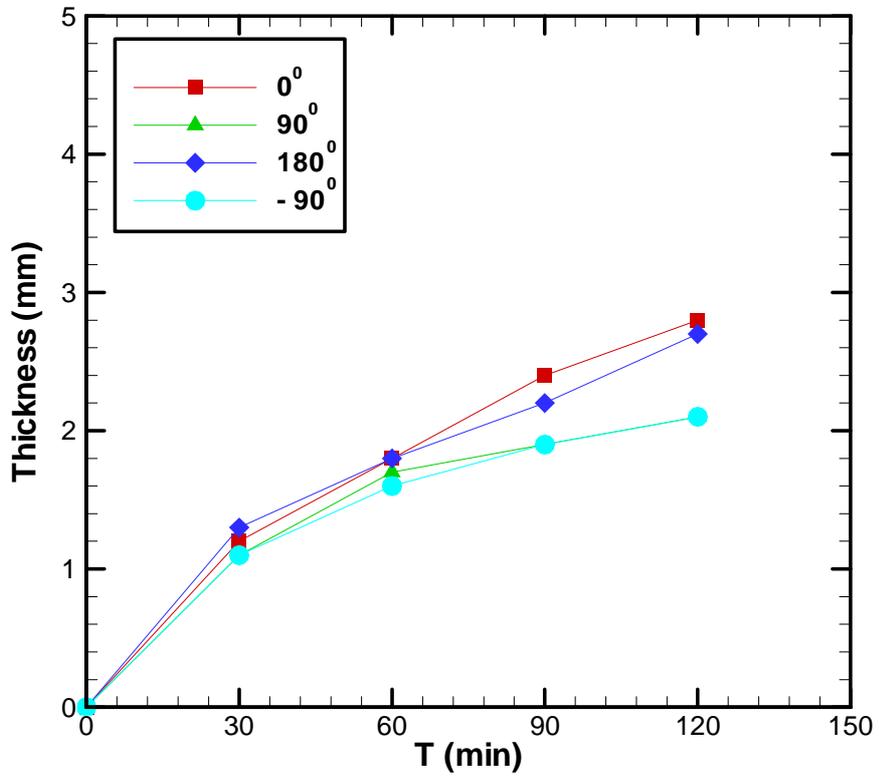


Fig. 3.10 Effect of supply air velocity on frost thickness  
;  $\phi_{\infty} = 90\%$ ,  $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $U_{\infty} = 0.3\text{m/s}$

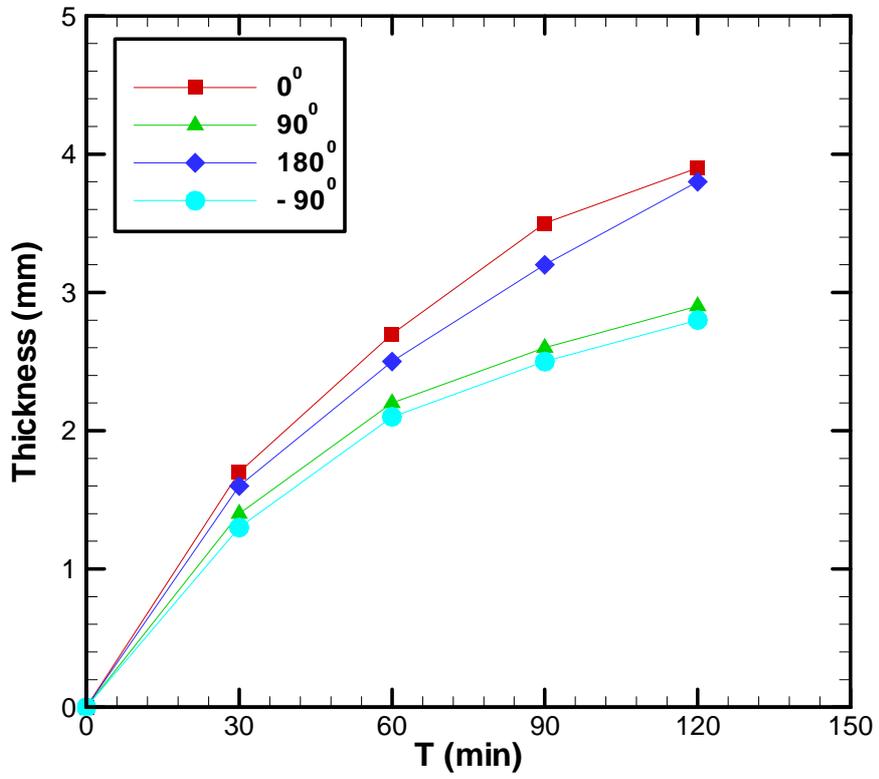


Fig. 3.11 Effect of supply air velocity on frost thickness

;  $\phi_{\infty} = 90\%$ ,  $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $U_{\infty} = 0.6\text{m/s}$

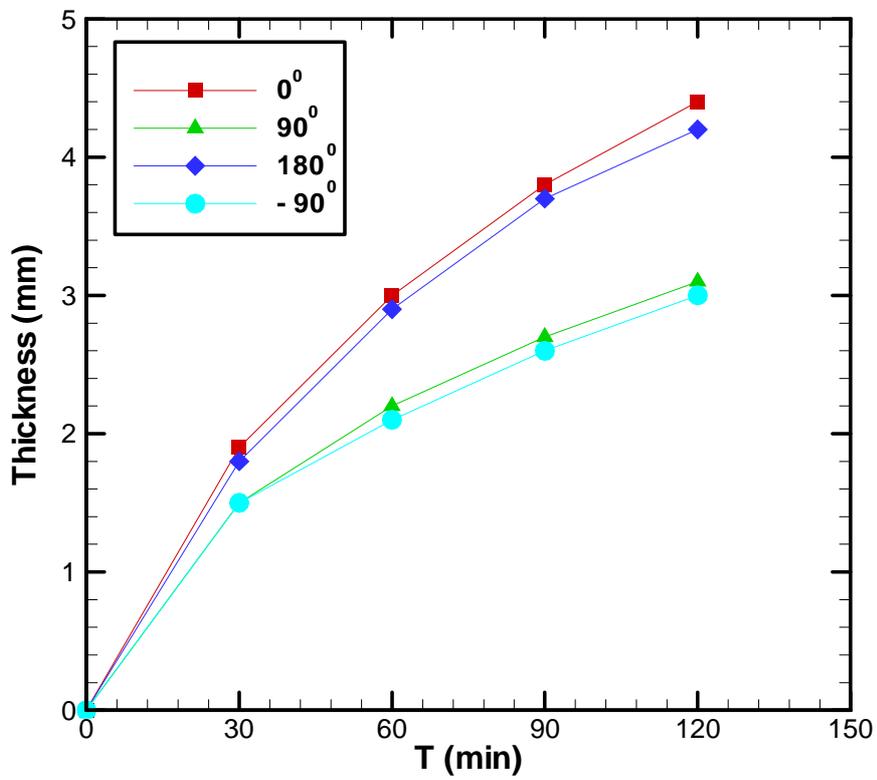


Fig. 3.12 Effect of supply air velocity on frost thickness  
;  $\phi_{\infty} = 90\%$ ,  $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $U_{\infty} = 0.9\text{m/s}$

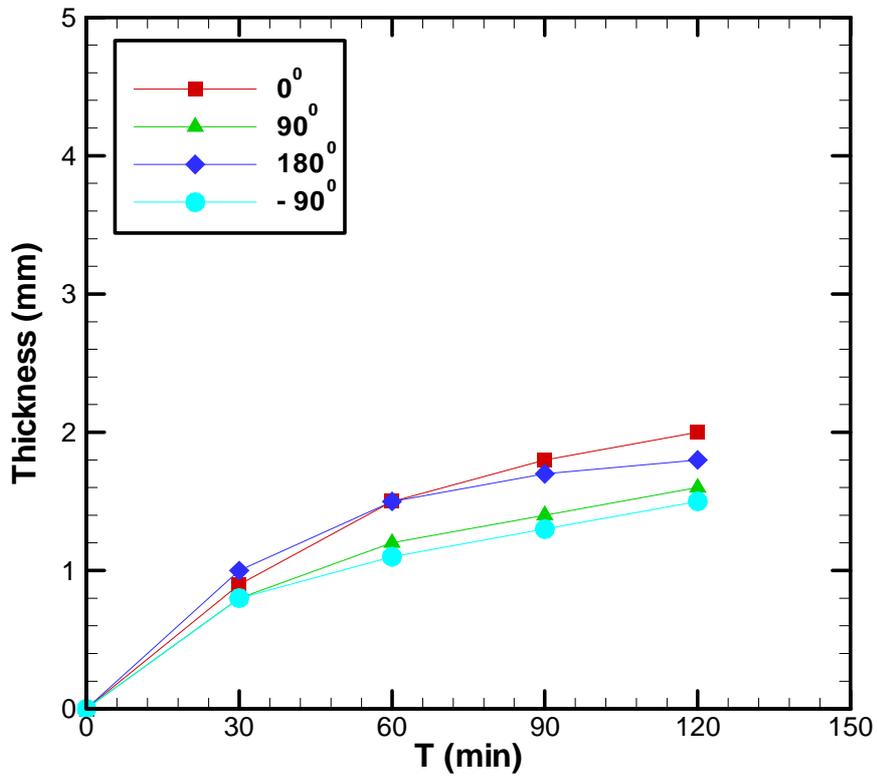


Fig. 3.13 Effect of supply air velocity on frost thickness

;  $\phi_{\infty} = 70\%$ ,  $T_{\infty} = 15^{\circ}\text{C}$ ,  $U_{\infty} = 0.3\text{m/s}$

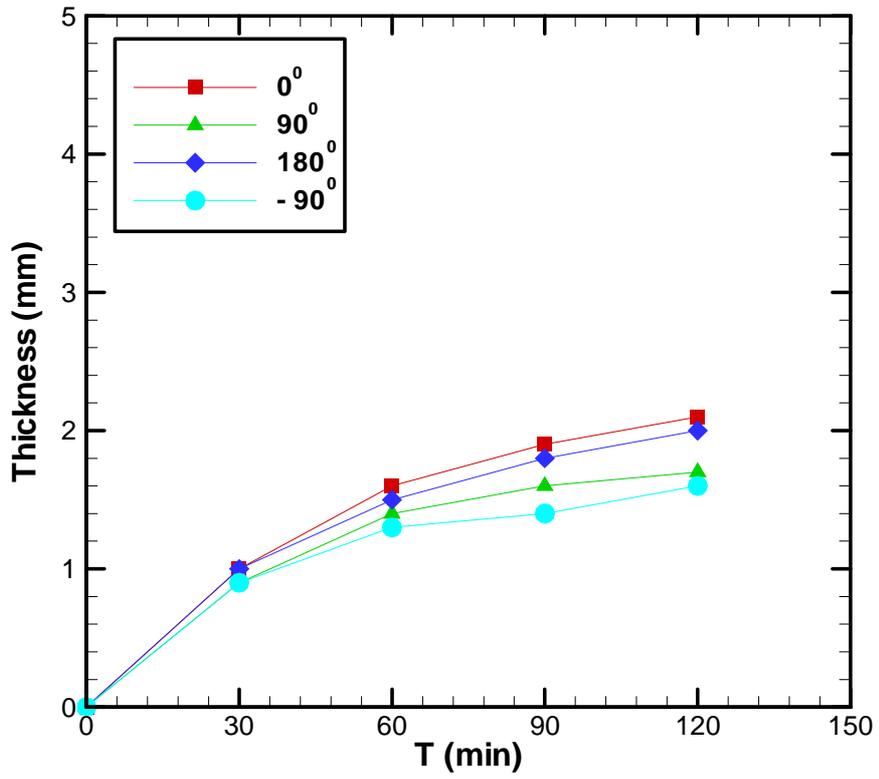


Fig. 3.14 Effect of supply air velocity on frost thickness  
;  $\phi_{\infty} = 70\%$ ,  $T_{\infty} = 15^{\circ}\text{C}$ ,  $U_{\infty} = 0.6\text{m/s}$

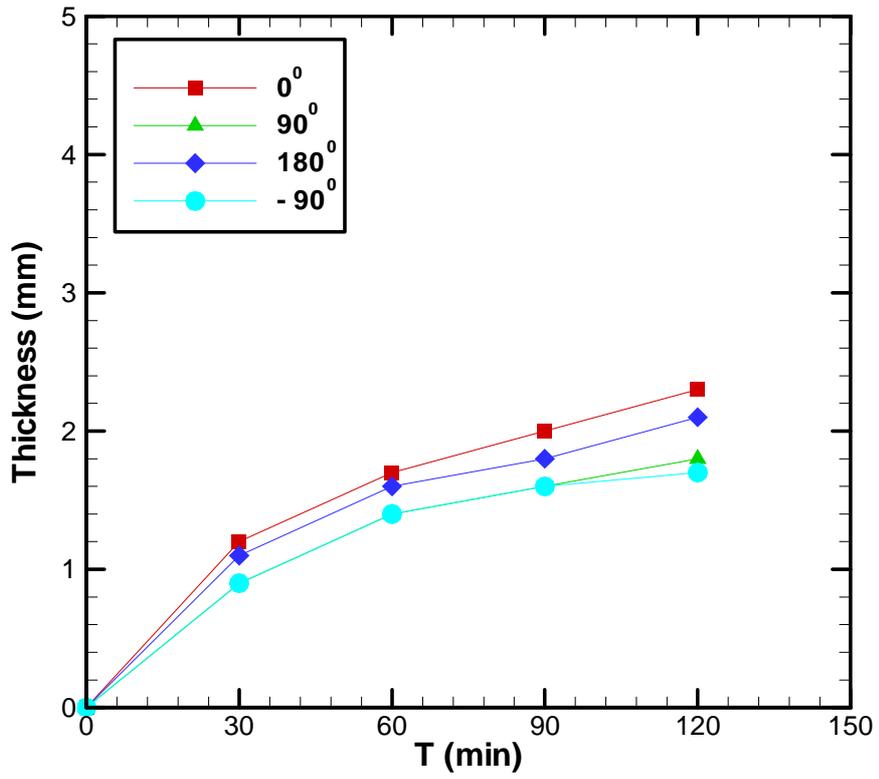


Fig. 3.15 Effect of supply air velocity on frost thickness  
;  $\phi_{\infty} = 70\%$ ,  $T_{\infty} = 15^{\circ}\text{C}$ ,  $U_{\infty} = 0.9\text{m/s}$

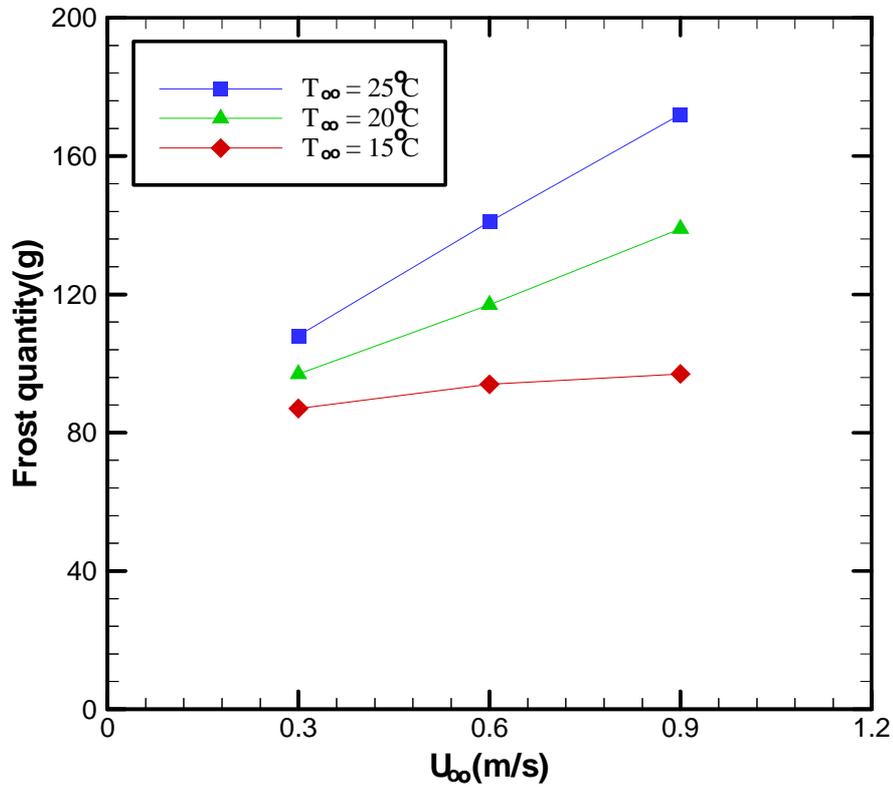


Fig. 3.16 Effect of supply air velocity on frost quantity  
;  $\phi_{\infty} = 90\%$ , 120min

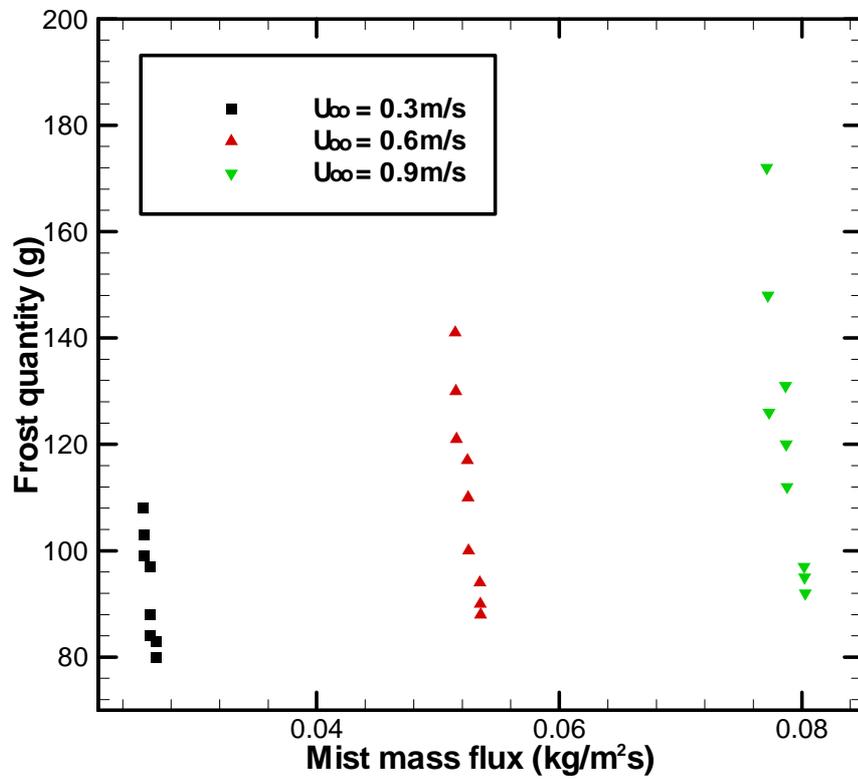


Fig. 3.17 Effect of mist mass flux on frost quantity

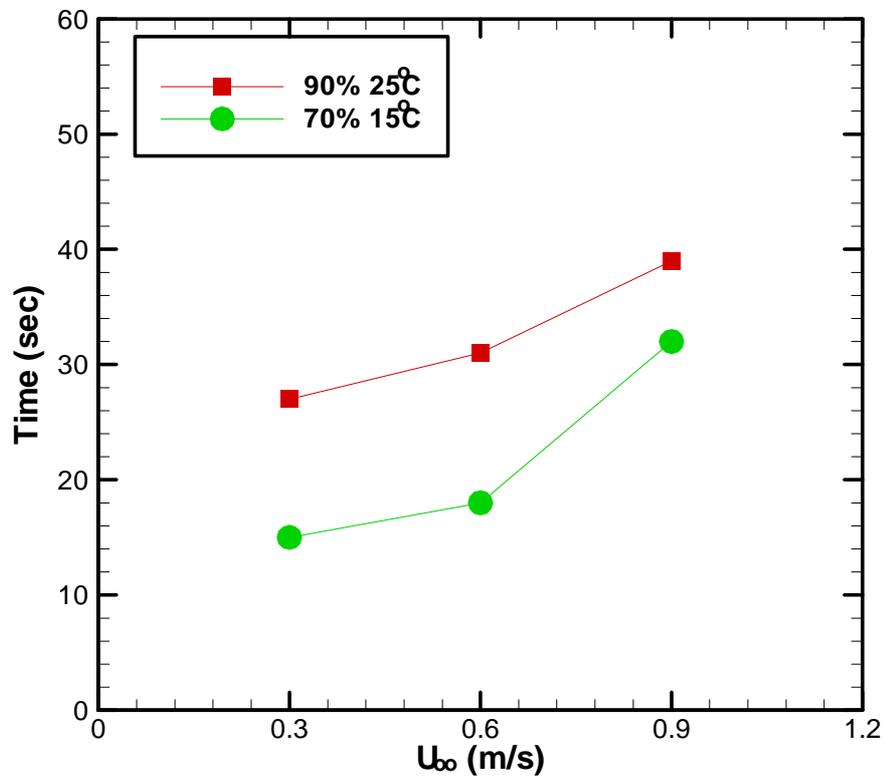


Fig. 3.18 Effect of supply air velocity on defrosting time at steady condition

### 3.4 입구공기 온도에 따른 영향

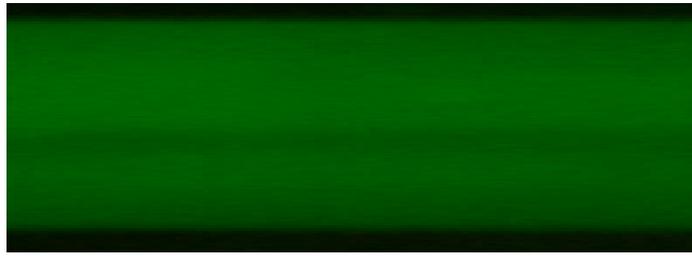
Fig. 3.19는  $\phi_{\infty} = 70\%$ ,  $U_{\infty} = 0.6\text{m/s}$ 와 Fig. 3.20은  $\phi_{\infty} = 70\%$ ,  $U_{\infty} = 0.3\text{m/s}$ 의 상태에서의 공급공기의 온도에 따른 동관에서의 서리 성장을 실험 시작 후 120분이 경과 되었을 때 동관의 상부에서 촬영하여 가시화한 결과이다. Fig. 3.21과 Fig. 3.22는 같은 실험조건 및 시간에서 동관의 측면을 가시화 한 것이다. Fig. 3.23은 위와 같은 조건에서의 공급공기의 온도에 따른 서리발생량을 정량화한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 3.24~3.29는 상기조건과 같은 실험을 통해서 동관에서 성장하는 서리층을 동관의 위치별로 측정하여 그래프로 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 동일한 습도와 유속을 가진 공기의 흐름에서 공급공기의 온도가 상승 할수록 동관에서의 서리층은 더욱 더 발달하고 있다. 이는 공급공기의 온도가 증가할수록 밀도가 크고 두께가 작은 서리층이 동관에서 생성되는데, 밀도가 높은 서리층은 낮은 서리층보다 단열효과의 감소에 의한 열전달의 증가와 초기의 서리증착이 열교환기에서의 핀 효과를 가져와 열전달 촉진의 영향을 받았기 때문이다.

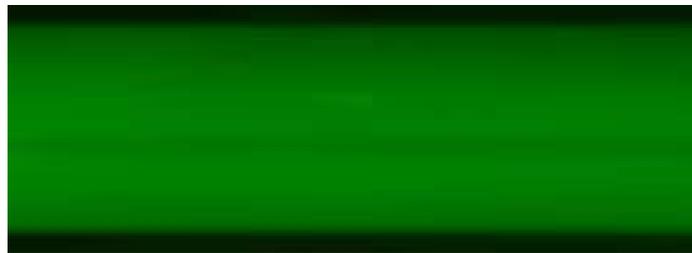
또한 서리층은 초기에 열전달 촉진의 영향을 받기 때문에 성장이 빠르게 진행되지만 시간이 지나면서 서리층은 단열재와 같은 역할을 하게 되어 입구공기와의 열전달율이 낮아지게 되어 서리층의 성장률이 완만하게 진행되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3.30은 공기 유속을  $0.6\text{m/s}$ 로 일정하게 두었을 때 상대습도 70%, 80% 및 90%인 경우에 있어서 공급공기의 온도에 따른 동관에서 생성된 서리량을 실험종료 후, 서리를 제상시켜 그 양을 측정하여 나타낸 그래프이다.

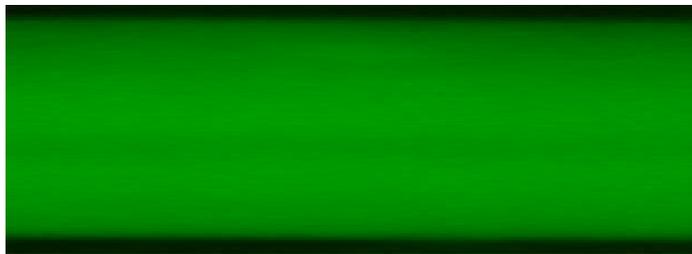
그리고 Fig. 3.31는 습공기 질량유속의 변화에 따른 동관에서 생성된 서리량을 나타낸 그래프로 입구공기온도가 증가함에 따라 단관에서 생성되는 서리량은 증가하였고 비슷한 질량유속의 변화에서는 입구공기가 높을수록 단관에서 생성되는 서리량은 증가함을 알 수 있다. Fig. 3.32은 Fig. 3.19와 Fig. 3.20에서 행한 실험에서 서리가 완전히 제상된 시간을 측정하여 그 시간을 나타낸 것이다.



(a)  $T_{\infty} = 15^{\circ}\text{C}$

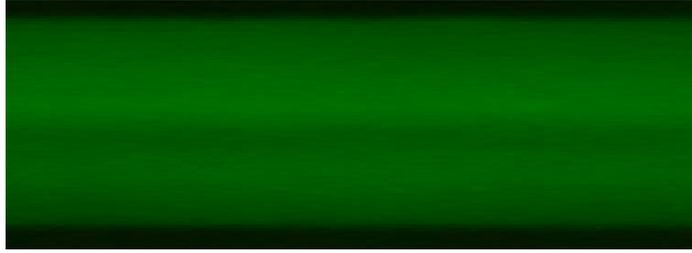


(b)  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$

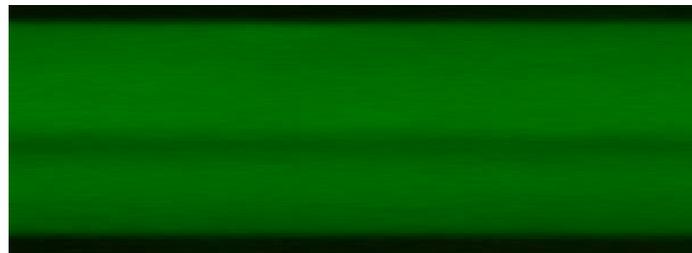


(c)  $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$

Fig. 3.19 Effect on supply air temperature (Upper side)  
;  $\phi_{\infty} = 80\%$ ,  $U_{\infty} = 0.6\text{m/s}$ , 120 min



(a)  $T_{\infty} = 15^{\circ}\text{C}$



(b)  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$



(c)  $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$

Fig. 3.20 Effect on supply air temperature (Upper side)

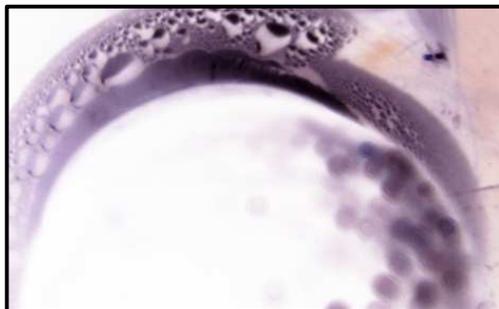
;  $\phi_{\infty} = 70\%$ ,  $U_{\infty} = 0.3\text{m/s}$ , 120 min



(a)  $T_{\infty} = 15^{\circ}\text{C}$



(b)  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$



(c)  $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$

**Fig. 3.21 Effect on supply air temperature (Right Side)**

**;  $\phi_{\infty} = 70\%$ ,  $U_{\infty} = 0.6 \text{ m/s}$ , 120 min**



(a)  $T_{\infty} = 15^{\circ}\text{C}$



(b)  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$



(c)  $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$

**Fig. 3.22 Effect on supply air temperature (Right Side)**

**;  $\phi_{\infty} = 70\%$ ,  $U_{\infty} = 0.3 \text{ m/s}$ , 120 min**

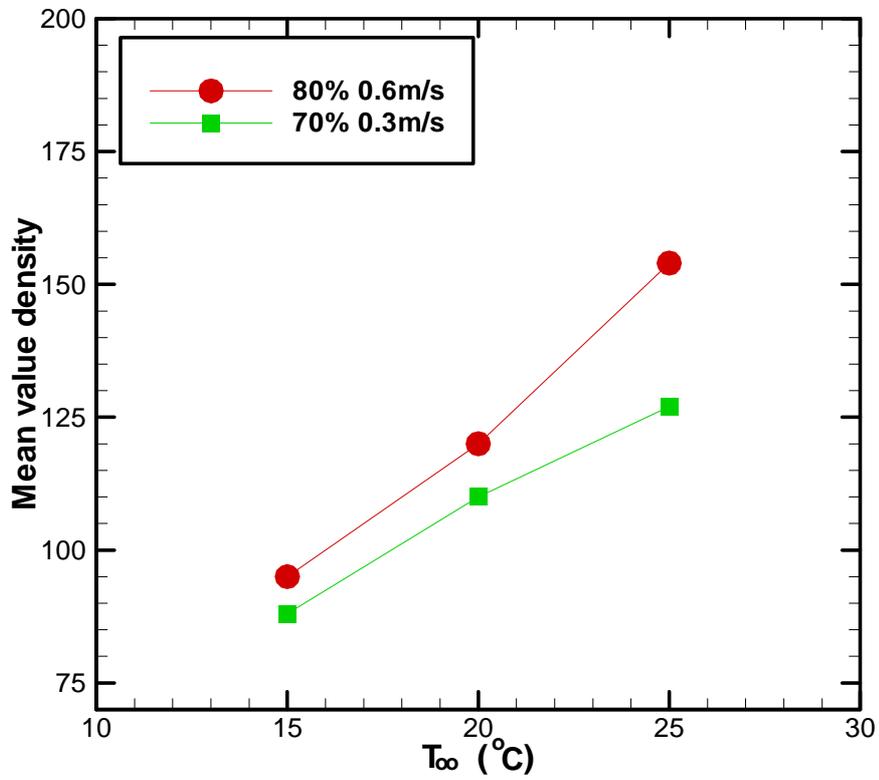


Fig. 3.23 Effect of supply air temperature on mean value of density at steady condition

;  $\phi_{\infty} = 70\%, 80\%$ ,  $U_{\infty} = 0.3\text{m/s}, 0.6\text{m/s}$

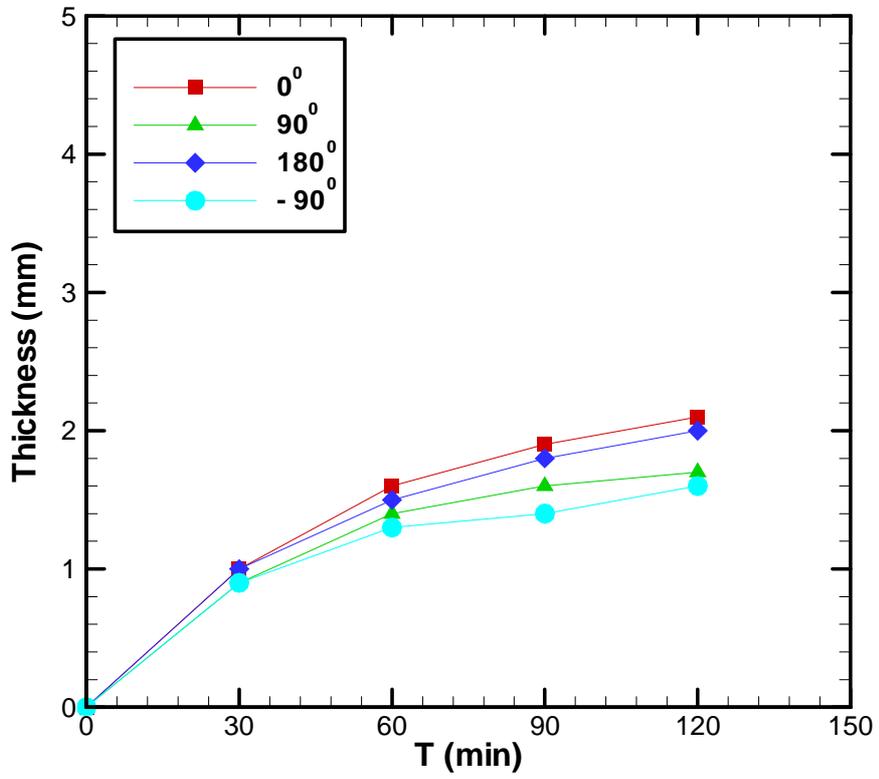


Fig. 3.24 Effect of supply air temperature on frost thickness

;  $T_{\infty} = 15^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi_{\infty} = 70\%$ ,  $U_{\infty} = 0.6\text{m/s}$

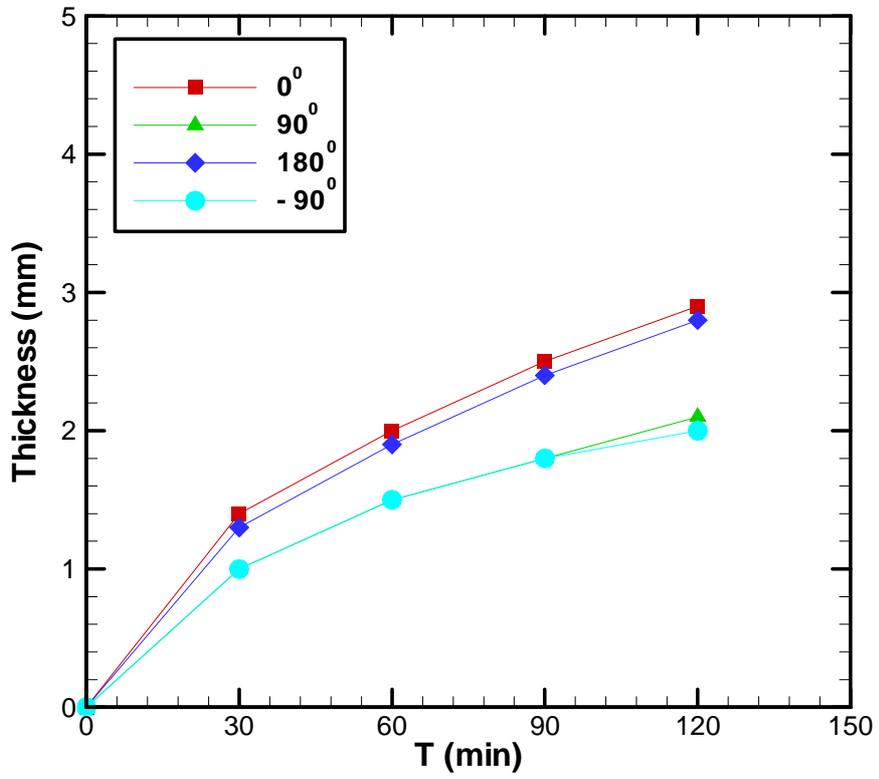


Fig. 3.25 Effect of supply air temperature on frost thickness

;  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi_{\infty} = 70\%$ ,  $U_{\infty} = 0.6\text{m/s}$

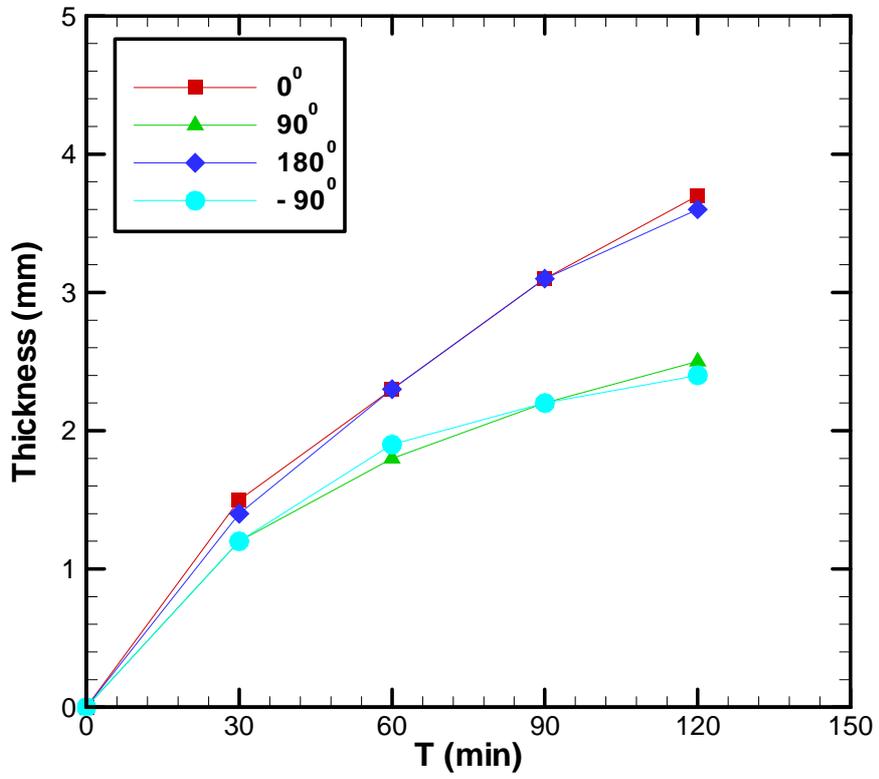


Fig. 3.26 Effect of supply air temperature on frost thickness

;  $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi_{\infty} = 70\%$ ,  $U_{\infty} = 0.6\text{m/s}$

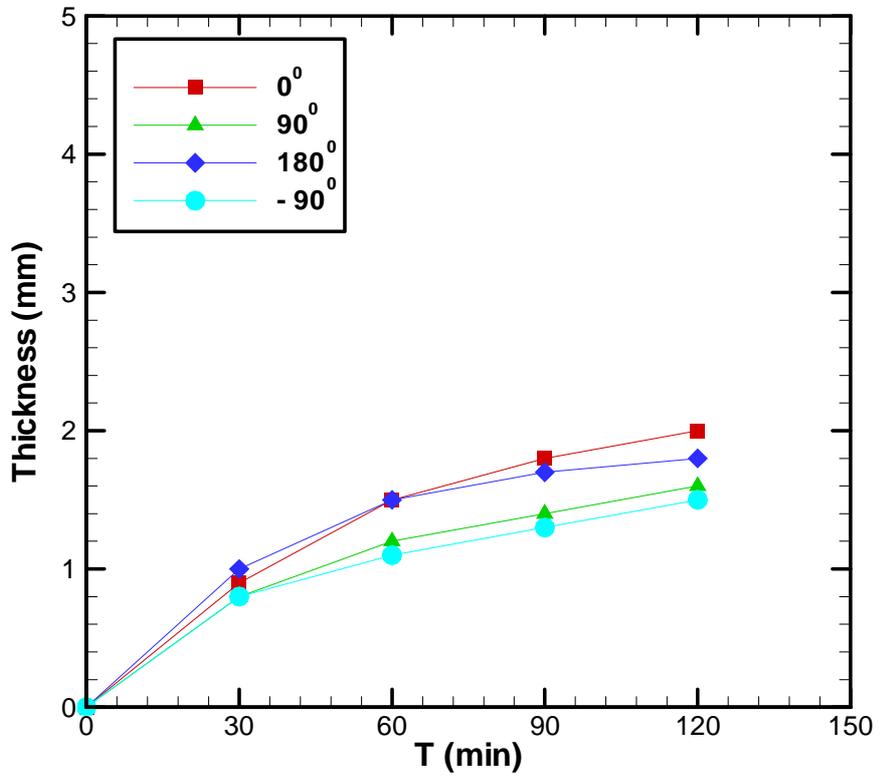


Fig. 3.27 Effect of supply air temperature on frost thickness

;  $T_{\infty} = 15^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi_{\infty} = 70\%$ ,  $U_{\infty} = 0.3\text{m/s}$

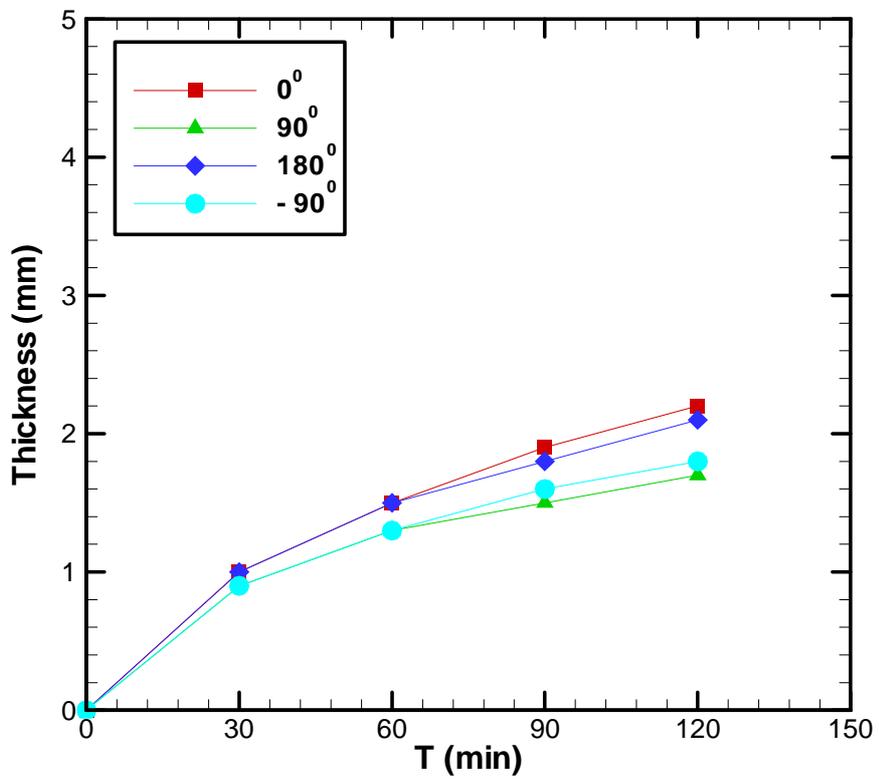


Fig. 3.28 Effect of supply air temperature on frost thickness

;  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi_{\infty} = 70\%$ ,  $U_{\infty} = 0.3\text{m/s}$

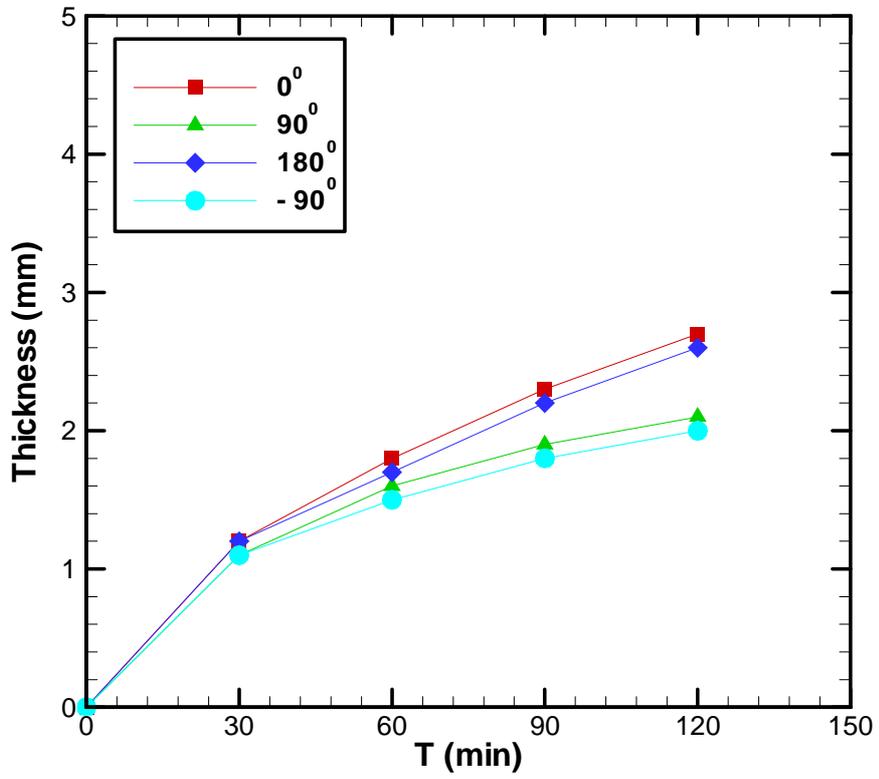


Fig. 3.29 Effect of supply air temperature on frost thickness

;  $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi_{\infty} = 70\%$ ,  $U_{\infty} = 0.3\text{m/s}$

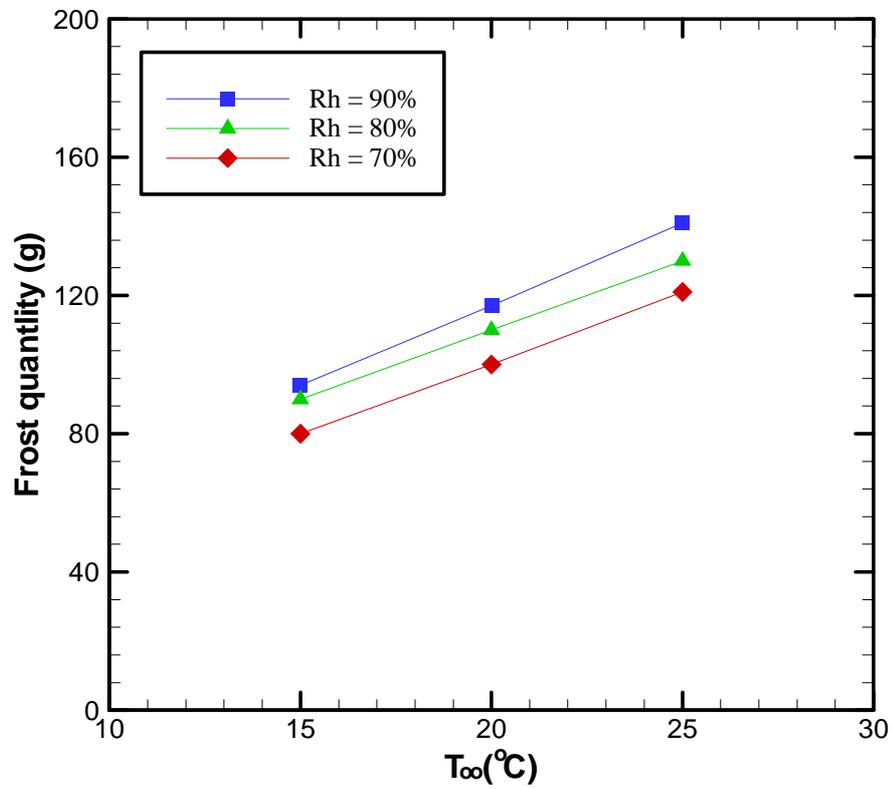


Fig. 3.30 Effect of supply air temperature on  
 frost quantity  
 ;  $U_{\infty} = 0.6\text{m/s}$ , 120 min

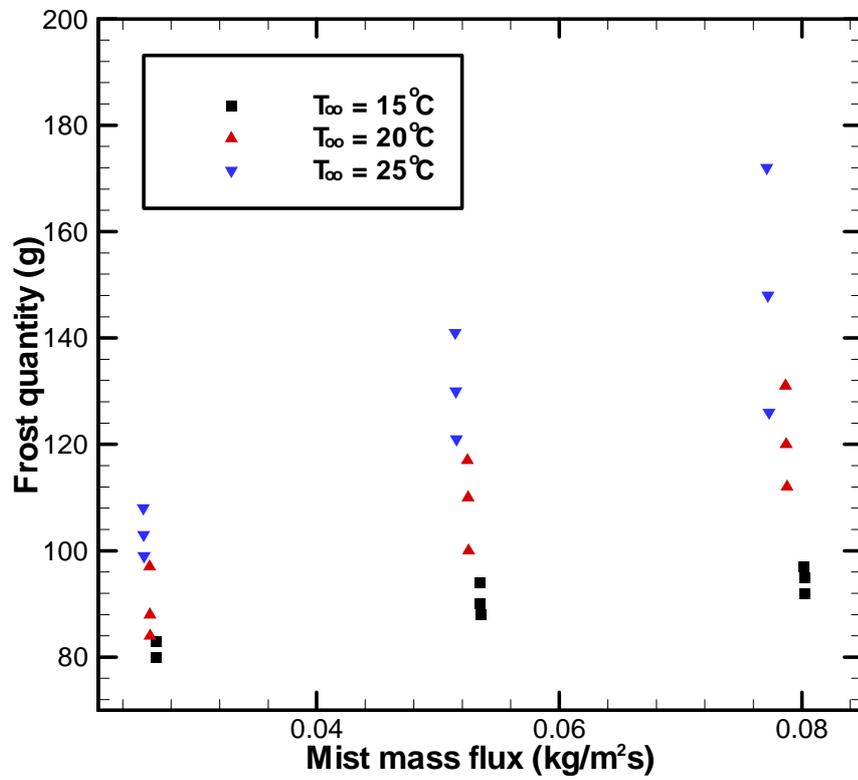


Fig. 3.31 Effect of mist mass flux on frost quantity

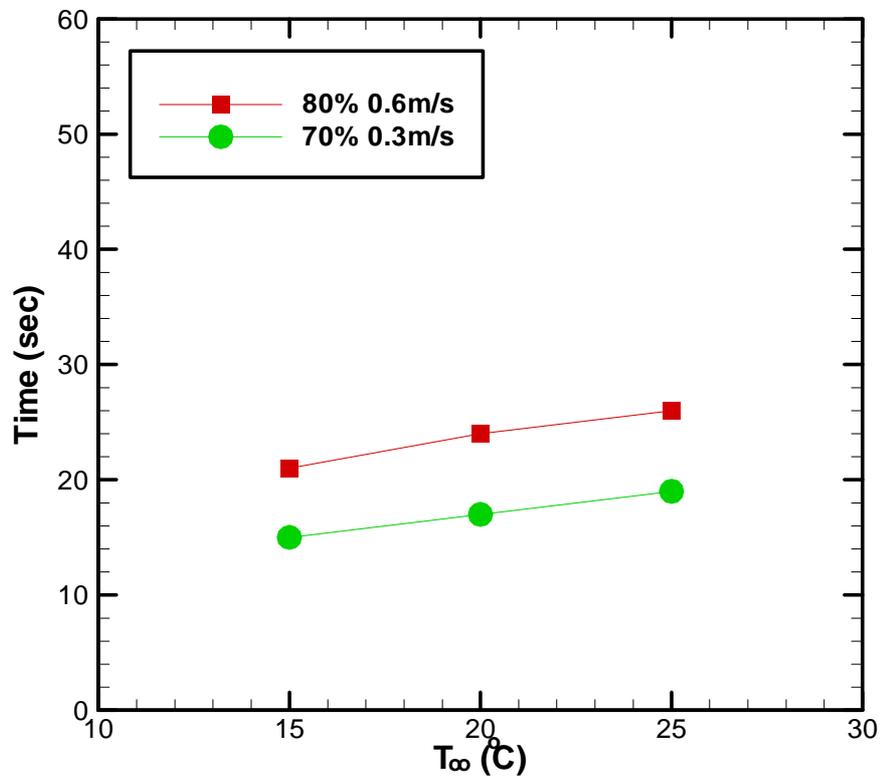


Fig. 3.32 Effect of supply air temperature on defrosting time at steady condition

### 3.5 입구공기 상대습도에 따른 영향

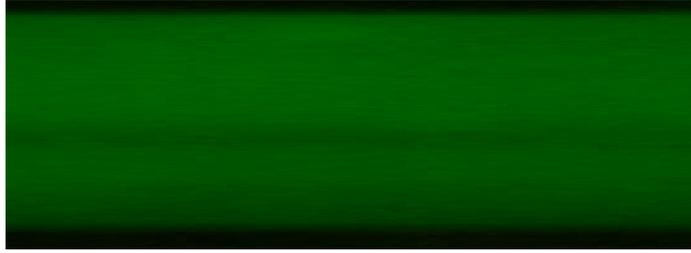
Fig. 3.33은  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $U_{\infty} = 0.9\text{m/s}$ 와 Fig. 3.34는  $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $U_{\infty} = 0.9\text{m/s}$ 의 상태에서의 공급공기의 상대습도에 따른 동관에서의 서리성장을 실험 시작 후 120분이 경과 되었을 때 동관의 상부에서 촬영하여 가시화한 결과이다. Fig. 3.35과 Fig. 3.36은 같은 실험조건 및 시간에서 동관의 측면을 가시화 한 것이다. Fig. 3.37은 위와 같은 조건에서의 공급공기의 상대습도에 따른 서리발생량을 정량화한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 3.38~3.43은 상기조건과 같은 실험을 통해서 동관에서 성장하는 서리층을 동관의 위치별로 측정하여 그래프로 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 공급공기의 상대습도가 높아질수록 동관에서의 서리성장률이 높아지는 것을 알 수 있다. 이는 단위부피당 차지하는 수분의 함유량이 높기 때문에 동관에서 많은 서리층이 발달하기 때문이다.

Fig. 3.44는 공기 유속을  $0.9\text{m/s}$ 로 일정하게 유지 하였을 때 공기온도를  $15^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$  및  $25^{\circ}\text{C}$ 인 경우에 있어서 공급공기의 상대습도에 따른 동관에서 생성된 서리량을 실험종료 후, 서리를 제상하여 그 양을 그래프로 나타내었다.

그리고 Fig. 3.45는 습공기 질량유속의 변화에 따른 동관에서 생성된 서리량을 나타낸 그래프로 입구공기상대습도가 증가할수록 동관에서 생성되는 서리량은 증가함을 보이고 있으나 비슷한 질량유속의 변화에서는 생성되는 서리량은 고루게 분포되고 있는 것을 알 수 있다. 이는 상대습도의 변화와 더불어 입구공기온도와 유속의 변화에 따라서 서리발생율이 달라지기 때문이다.

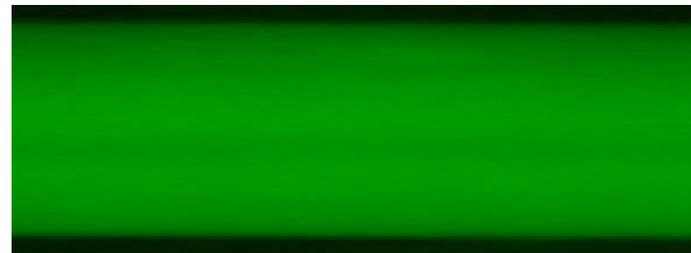
Fig. 3.46은 Fig. 3.33과 Fig. 3.34에서 행한 실험에서 서리가 완전히 제상된 시간을 측정하여 그 시간을 나타낸 것이다.



(a)  $\phi_{\infty} = 70\%$



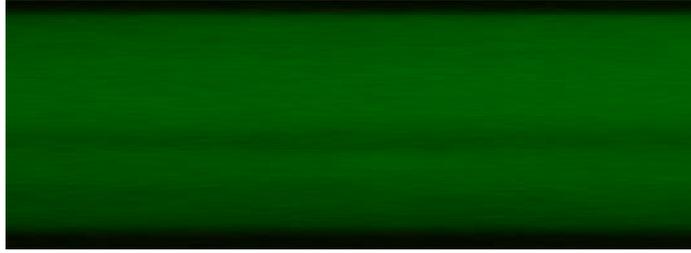
(b)  $\phi_{\infty} = 80\%$



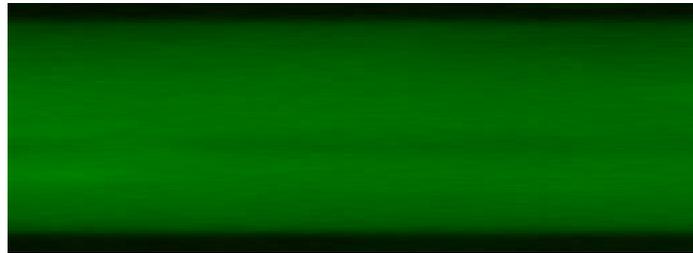
(c)  $\phi_{\infty} = 90\%$

Fig. 3.33 Effect on relative humidity (Upper side)

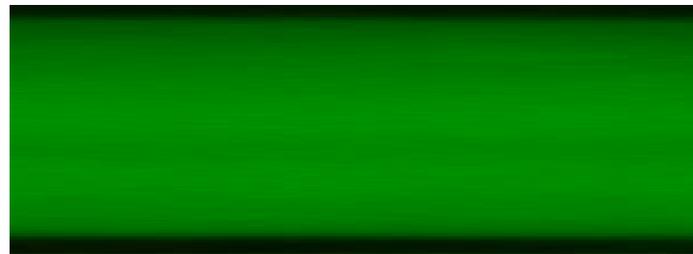
;  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $U_{\infty} = 0.9\text{m/s}$ , 120min



(a)  $\phi_{\infty} = 70\%$



(b)  $\phi_{\infty} = 80\%$



(c)  $\phi_{\infty} = 90\%$

Fig. 3.34 Effect on relative humidity (Upper side)

;  $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $U_{\infty} = 0.9\text{m/s}$ , 120min



(a)  $\phi_{\infty} = 70\%$



(b)  $\phi_{\infty} = 80\%$



(c)  $\phi_{\infty} = 90\%$

**Fig. 3.35 Effect on relative humidity (Right side)**  
;  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $U_{\infty} = 0.9\text{m/s}$ , 120min



(a)  $\phi_{\infty} = 70\%$



(b)  $\phi_{\infty} = 80\%$



(c)  $\phi_{\infty} = 90\%$

**Fig. 3.36 Effect on relative humidity (Right side)**

**;  $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $U_{\infty} = 0.9\text{m/s}$ , 120min**

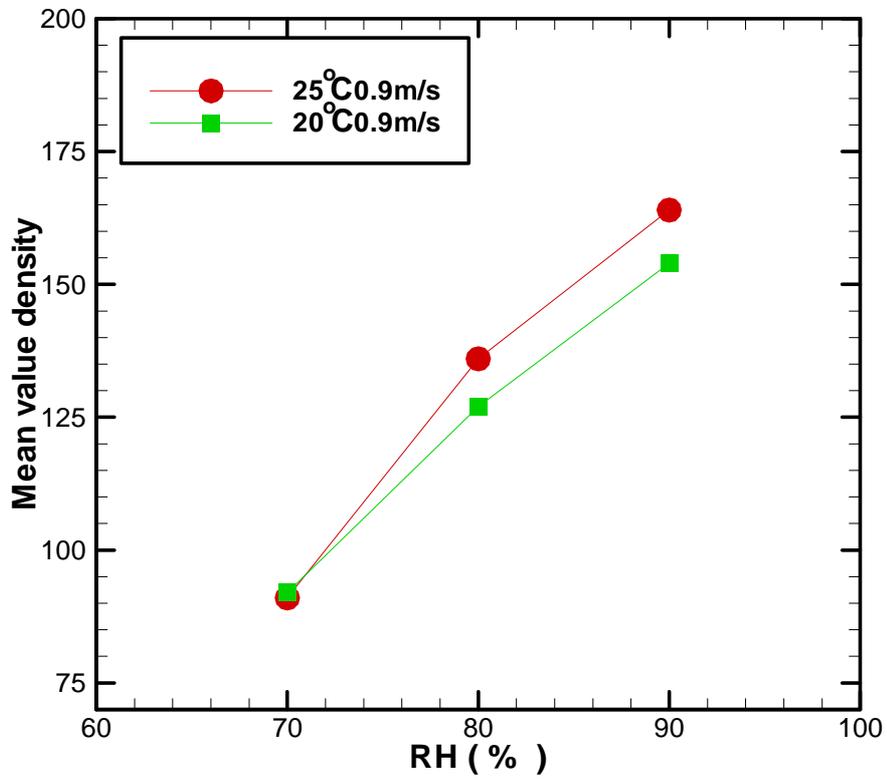


Fig. 3.37 Effect of relative humidity on mean value of density at steady condition

;  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}, 25^{\circ}\text{C}, U_{\infty} = 0.9\text{m/s}$

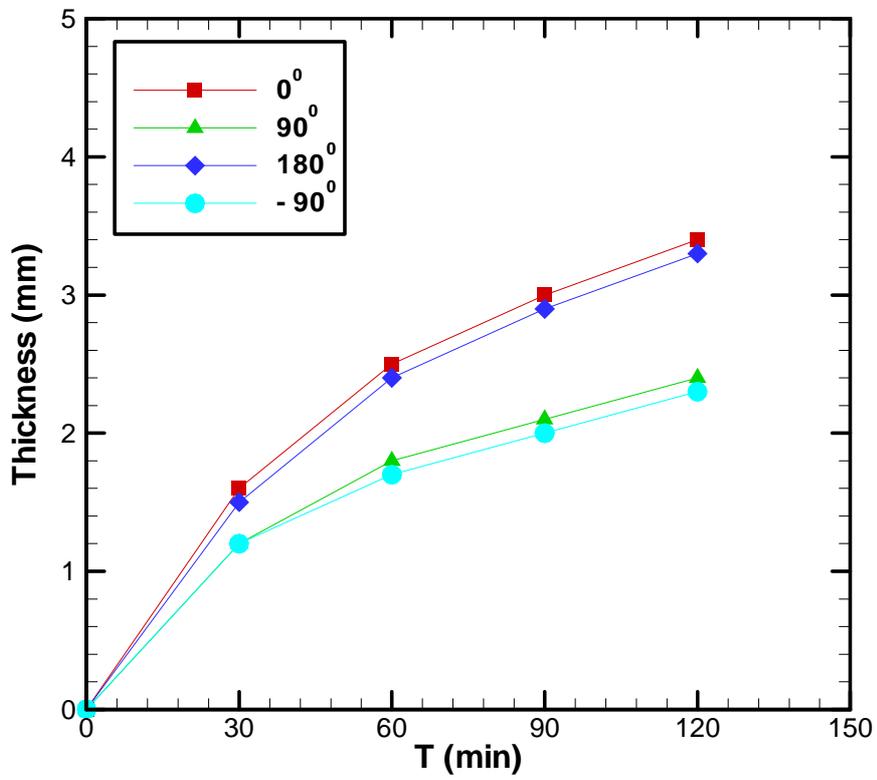


Fig. 3.38 Effect of relative humidity on frost thickness

;  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi_{\infty} = 70\%$ ,  $U_{\infty} = 0.9\text{m/s}$

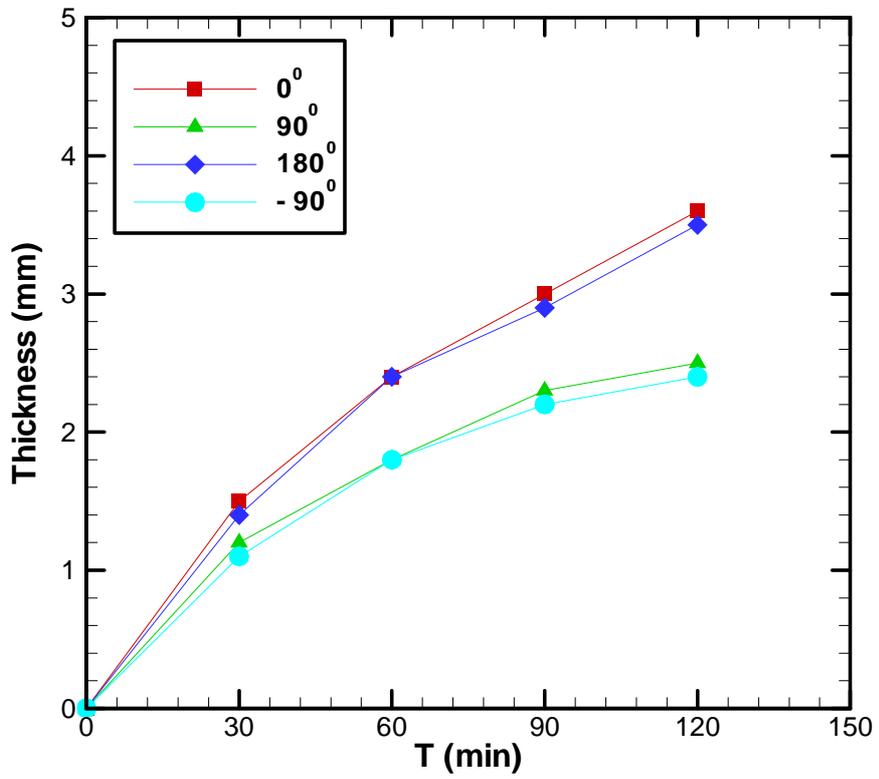


Fig. 3.39 Effect of relative humidity on frost thickness  
;  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi_{\infty} = 80\%$ ,  $U_{\infty} = 0.9\text{m/s}$

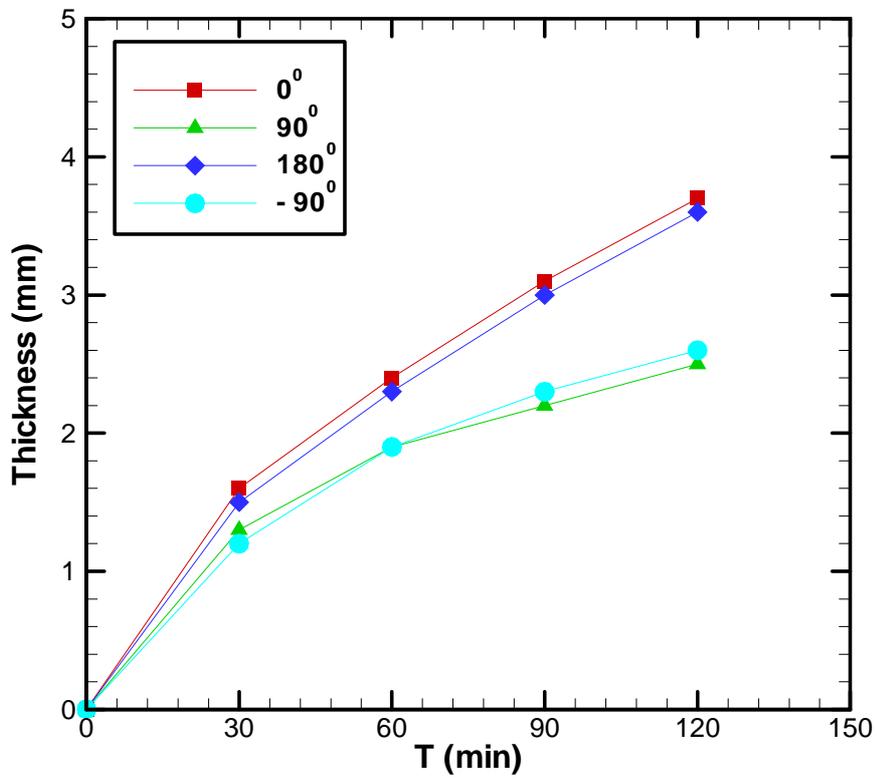


Fig. 3.40 Effect of relative humidity on frost thickness

;  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi_{\infty} = 90\%$ ,  $U_{\infty} = 0.9\text{m/s}$

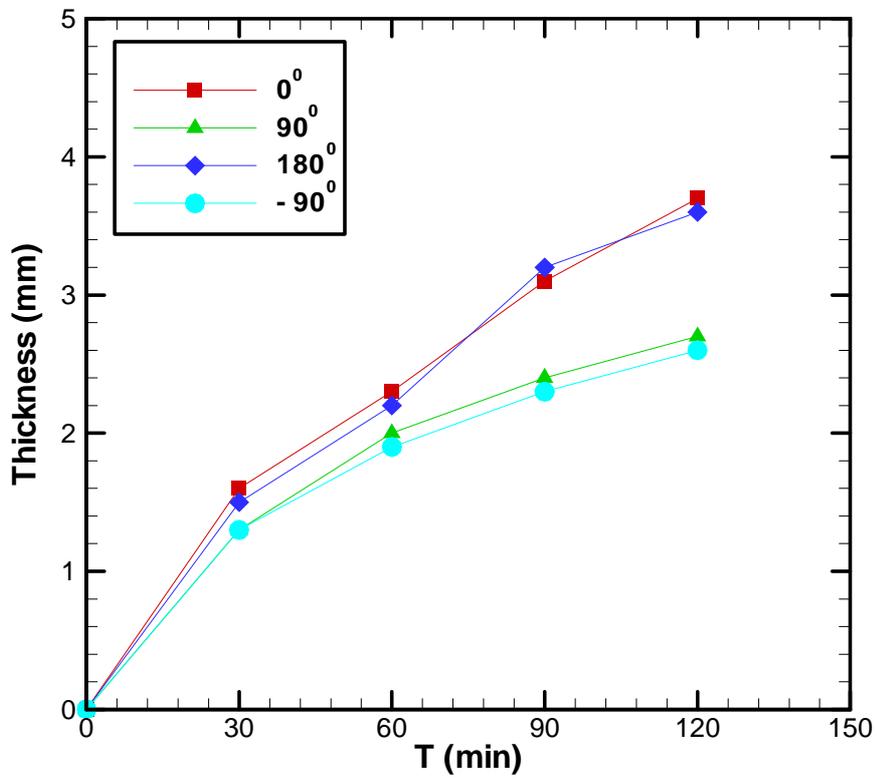


Fig. 3.41 Effect of relative humidity on frost thickness

;  $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi_{\infty} = 70\%$ ,  $U_{\infty} = 0.9\text{m/s}$

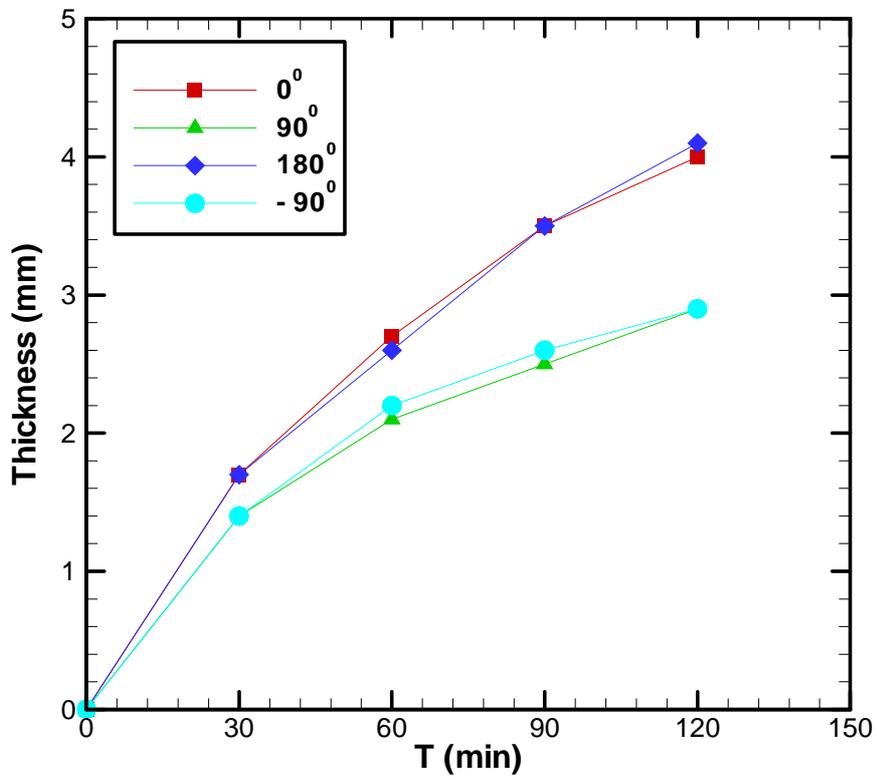


Fig. 3.42 Effect of relative humidity on frost thickness

;  $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi_{\infty} = 80\%$ ,  $U_{\infty} = 0.9\text{m/s}$

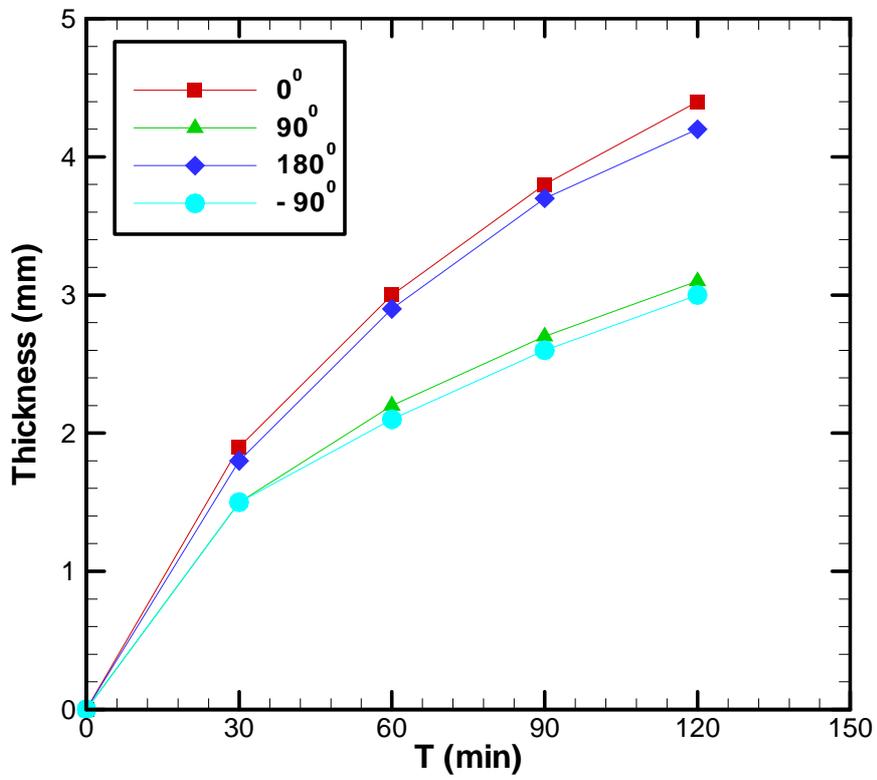


Fig. 3.43 Effect of relative humidity on frost thickness  
;  $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi_{\infty} = 90\%$ ,  $U_{\infty} = 0.9\text{m/s}$

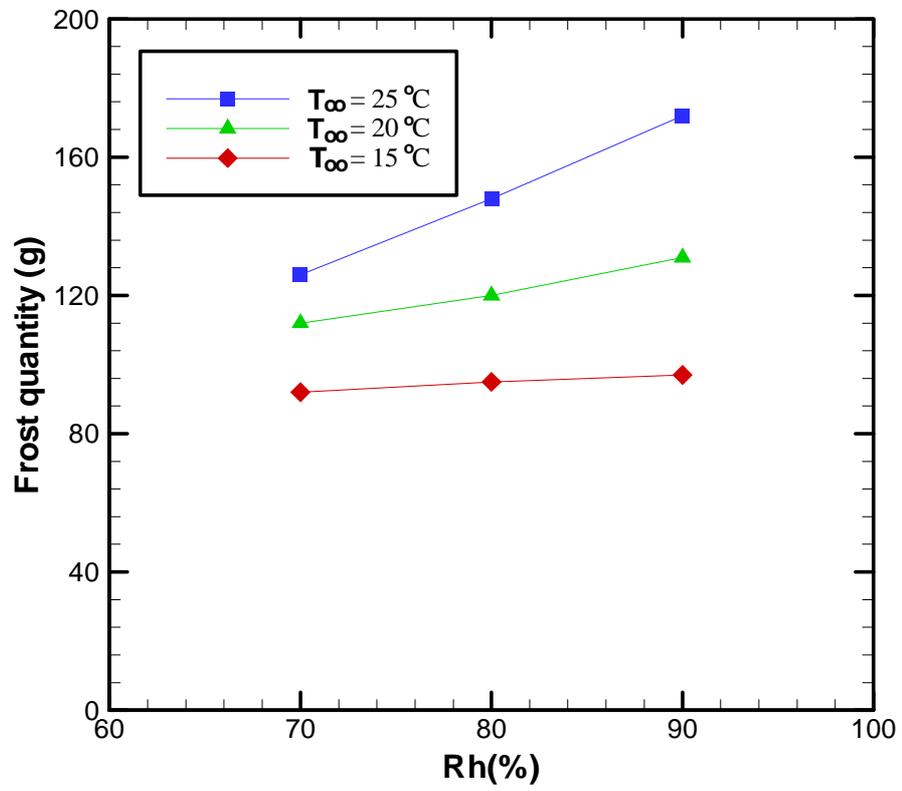


Fig. 3.44 Effect of relative humidity on frost quantity  
;  $U_{\infty} = 0.9\text{m/s}$ , 120min

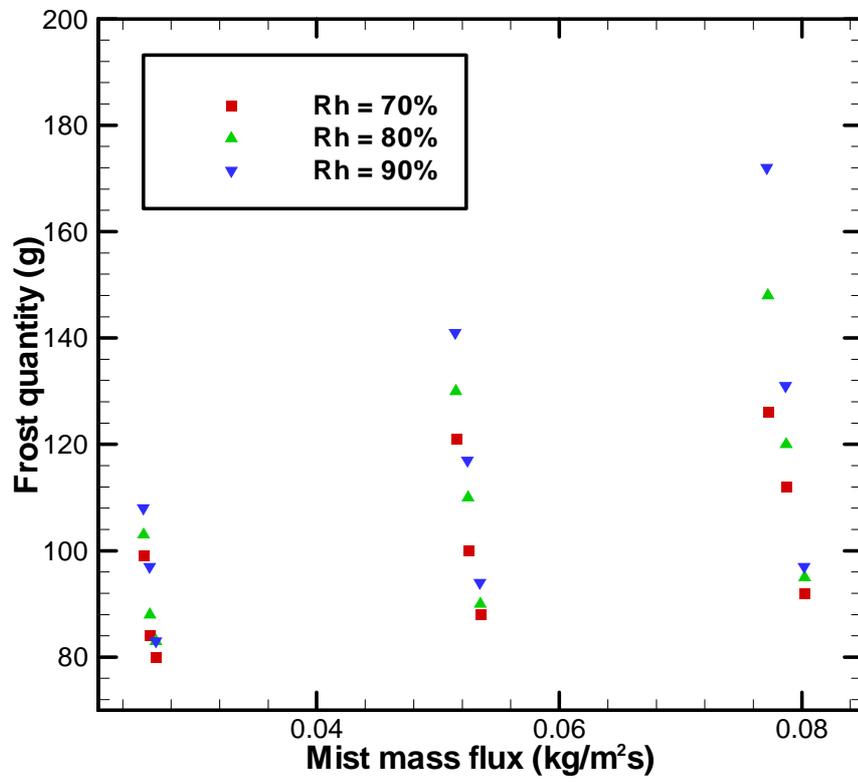


Fig. 3.45 Effect of mist mass flux on frost quantity

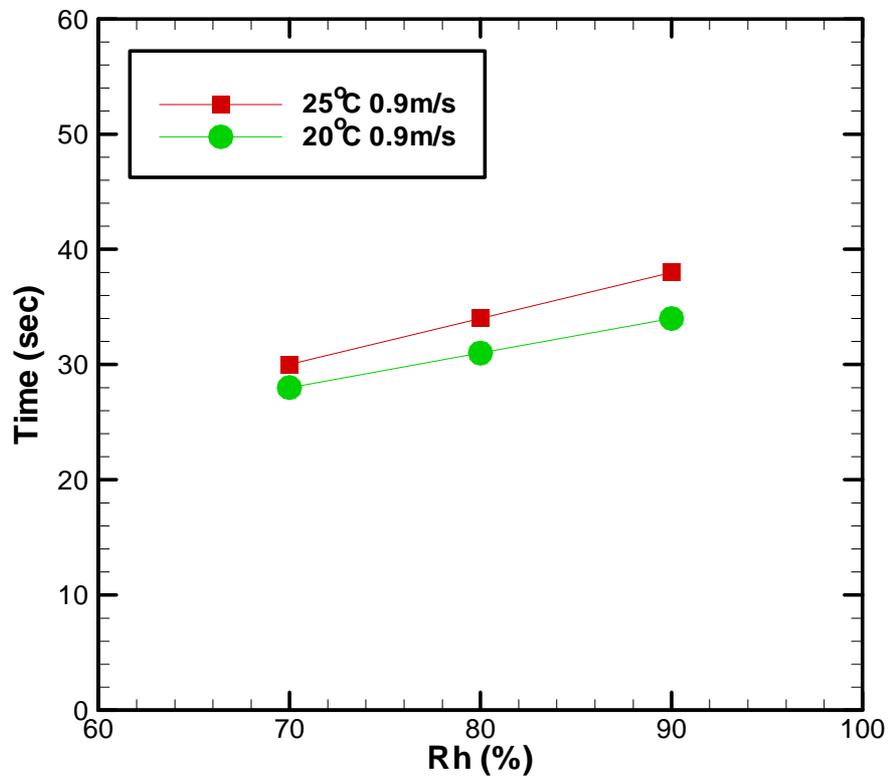


Fig. 3.46 Effect of relative humidity on defrosting time at steady condition

### 3.6 결론

본 장에서는 관군에서의 서리발생 및 제상 메커니즘의 파악을 위하여 단관에서 공급공기의 유속, 공급공기의 온도, 상대습도에 따른 영향을 평가하여 본 실험의 범위 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 공급공기의 유속이 증가할수록 서리층은 두꺼워진다.
- (2) 유속이 있는 가운데 단군에서의 서리발생은 상부 면 및 하부면 보다 정면과 후면에서 더욱 더 발달한다.
- (3) 공급공기의 온도가 상승할수록 서리층은 두꺼워진다.
- (4) 공급공기의 상대습도가 높을수록 서리층은 두꺼워진다.
- (5) 초기의 서리층은 핀 효과 작용으로 인해서 서리층의 발달은 촉진시키지만 시간이 경과하면서 두꺼워진 서리층은 단열재 역할을 하게 되어 성장속도는 감소한다.
- (6) 동관에서의 서리층 밀도가 높을수록 제상시간은 증가 한다
- (7) 동관에서 생성되는 서리층은 입구공기상대습도, 입구공기온도, 입구 공기상대습도의 영향중에서 공기유속이 제일 크다.

## 제 4 장 관군에서의 서리생성 및 제상 메커니즘

### 4.1 실험장지 및 실험방법

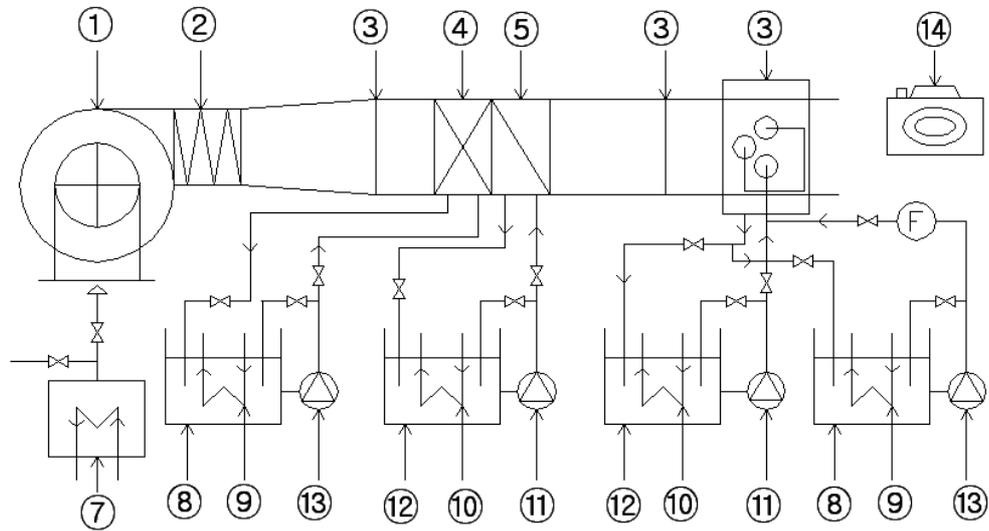
Fig. 4.1은 관군에서의 서리발생 메커니즘의 파악을 위한 실험장치의 전체 계통도이다. 그림에 나타난 바와 같이 실험장치는 개회로 풍동장치로서, 크게 공급공기의 유속을 조절하는 풍량 조절부, 공급공기의 온도를 조절하는 공기가열부 및 냉각부, 공급공기의 습도를 조절하기 위한 가습부, 동관의 온도를 조절하기 위한 브라인 순환부, 시험부 및 가시화부로 구성되어 있다.

풍량 조절부 ①은 1.5kw의 3상유도전동기를 이용한 1750rpm의 원심형 팬을 사용하였으며, 팬 입구의 댐퍼를 조절함으로써 소정의 풍속을 유지하고 조절하였다. 공기가열부④ 및 냉각부⑤는 가로 470mm, 세로 400mm, 9단 4열의 핀-튜브 열교환기로 들어가는 온수 및 브라인의 양을 조절하여 공기를 소정의 온도로 유지하였다. 가습부⑦은 2kw의 히터를 내장한 증기가습기로 공급전압을 조절하여 발생 증기량을 조절하였으며, 팬 입구부에 설치하여 공급공기의 습도를 조절 유지하였다.

시험부(test section)는 단관용 실험장치와 동일한 크기와 재질의 단관 3개를 엇갈림구조로 설치하였다. 이는 공기유속, 온도 및 상대습도의 영향이 각각 단관에 어떤 영향이 있는가를 파악하기 위함이다. Fig. 4.2는 시험부의 상세도를 나타내며, Fig. 4.3은 본 연구에서 이용되어진 실험장치의 전경사진이다.

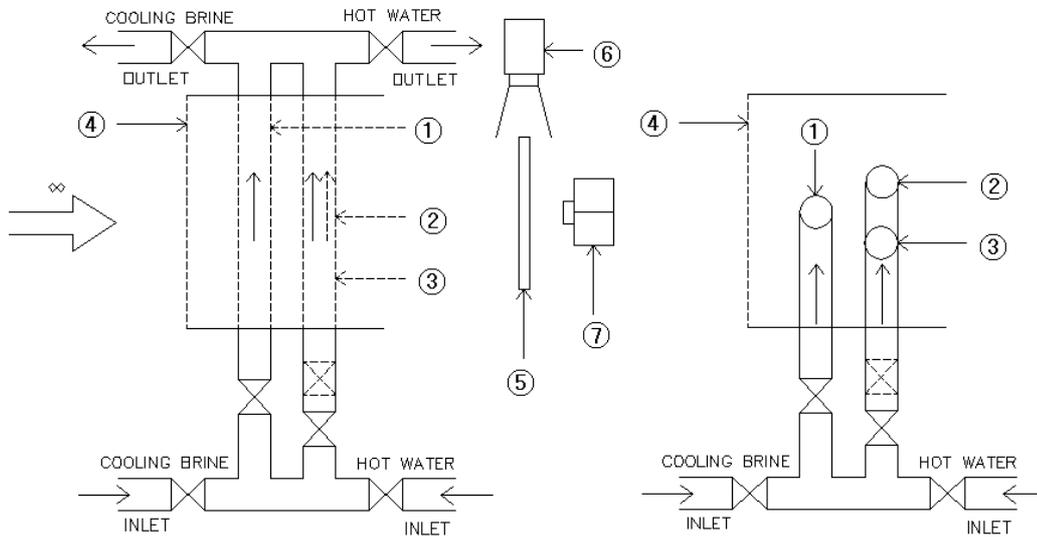
실험방법과 실험조건은 제3장에서 행해진 방법과 조건이 동일하지만 이번 실험은 He-Ne 레이저 측면에 설치하고 후면에 카메라를 설치하여

동관의 후면을 촬영하여 3개의 동관에서 일어나는 서리층의 발생 현상을 관찰하였다.



- |                  |                  |
|------------------|------------------|
| ① blower         | ② canvas         |
| ③ screen         | ④ heat exchanger |
| ⑤ heat exchanger | ⑥ test section   |
| ⑦ humidifier     | ⑧ water tank     |
| ⑨ heater         | ⑩ refrigerator   |
| ⑪ brine pump     | ⑫ brine pump     |
| ⑬ water          | ⑭ digital camera |

**Fig. 4.1 Schematic diagram of experimental apparatus**



< Up side >

<Right side>

- ① M.pipe
- ③ B.pipe
- ⑤ acryl plate
- ⑦ digital camera

- ② T.pipe
- ④ screen
- ⑥ He-Ne laser

Fig. 4.2 Diagram of test section apparatus



**Fig. 4.3** Photo of experimental apparatus

## 4.2 공기유속에 따른 영향

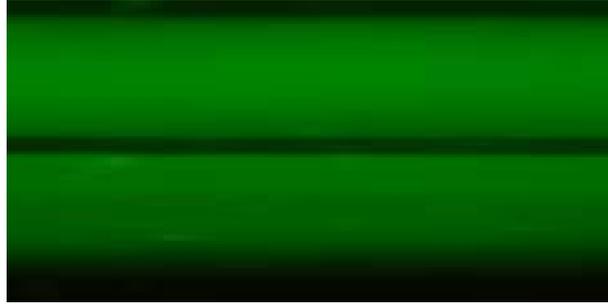
Fig. 4.4는  $\phi_{\infty} = 80\%$  ,  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ 의 상태에서의 공급공기의 유속에 따른 관군에서의 서리발생현상을 실험 시작 후 120분 경과하였을 때 동관의 후면에서 촬영하여 가시화한 것이며, Fig. 4.5는 위의 동일한 조건과 같은 시점에서 동관의 측면을 가시화 한 것이다. Fig. 4.6은 위와 같은 조건에서 공급공기의 유속에 따른 서리량을 정량화한 결과를 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 4.7 Fig. 4.8 및 Fig. 4.9는 위의 조건에서 입구공기유속에 따른 동관에서 발달하는 서리층을 동관별로 두께를 측정 한 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 유속이 증가할수록 서리층이 두껍게 형성되는 것을 알 수 있다. 그리고 서리층은 상부 파이프에서 가장 많이 형성되고 있는 것도 알 수 있다. 제3장에서 전술한 바와 같이 유속이 증가할 수 록 열, 물질 전달이 활발하게 일어나게 되어 동관주위로 서리층이 두껍게 형성된다. 하지만 3개의 동관에서 동일하게 서리층이 형성되지 않고 제일 높은 상부 파이프에서 서리층이 가장 활발하게 형성되고 있는 것을 알 수 있다. 이는 공기유속이 증가할수록 일정한 습도와 온도를 지닌 공기가 중간 파이프의 정면을 지나 유속의 흐름은 상부 파이프와 하부 파이프의 좁은 영역을 지나게 되는데, 이때 공기의 흐름은 급속이 빨라지게 되고 가장 영향을 많이 받는 상부 파이프에서 가장 많은 서리층이 형성되기 때문이다.

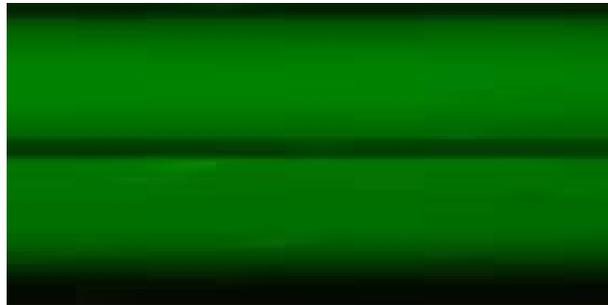
Fig. 4.10은  $\phi_{\infty} = 80\%$  ,  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ 의 상태에서 공기유속을 0.3m/s, 0.6m/s 및 0.9m/s로 변화 하였을 때 실험종료 후 동관의 위치별로 서리량을 측정하여 그래프로 나타낸 것이다.

또한 Fig. 4.11, 4.12 및 4.13은 공기유속이 0.3m/s, 0.6m/s 및 0.9m/s로 변화하였을 때 각 유속에 대하여 습공기질량유속의 변화에 따른 동관의 위치별로 생성된 서리량을 측정하여 그래프로 나타낸 것이다.

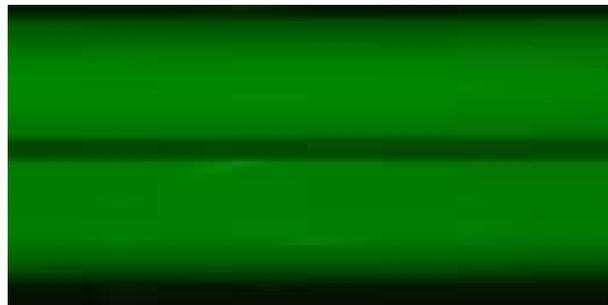
그림에서 알 수 있듯이 전체적으로 유속이 증가할 수 록 T.PIPE와 B.PIPE는 M.PIPE보다 많은 서리량이 생성되는 것을 알 수 있다. 또한 같은 유속의 변화를 나타낸 그래프들을 보게 되면 질량유속이 증가할 수 록 각 동관에서 생성되는 서리량은 모든 그래프에서 같은 패턴을 그리면서 완만하게 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 동관에서 서리층의 발생에 가장 영향을 많이 미치는 인자로 공급공기의 유속을 들 수 있었으며, 유속의 변화에 따라서 생성되는 서리량의 생성편차는 증가함을 보였고, 같은 유속의 변화에 대해서는 공기의 상대습도와 공기온도가 서리층에 미소하게 영향을 미치고 있는 것을 알 수 있다.



$$U_{\infty} = 0.3\text{m/s}$$



$$U_{\infty} = 0.6\text{m/s}$$



$$U_{\infty} = 0.9\text{m/s}$$

Fig. 4.4 Effect on supply air velocity (After Side)

;  $\phi_{\infty} = 80\%$ ,  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ , 120min



$$U_{\infty} = 0.3\text{m/s}$$



$$U_{\infty} = 0.6\text{m/s}$$



$$U_{\infty} = 0.9\text{m/s}$$

Fig. 4.5 Effect on supply air velocity (Right Side)

;  $\phi_{\infty} = 80\%$ ,  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ , 120min

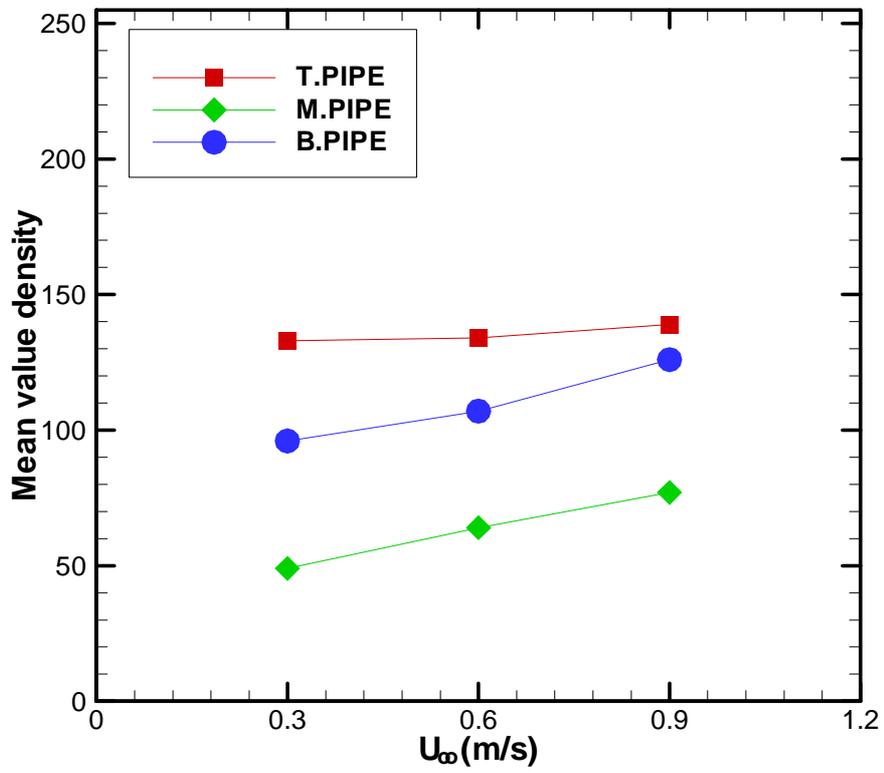


Fig. 4.6 Effect of supply air velocity on mean value of density at steady condition

$$; \phi_{\infty} = 80\%, \quad T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$$

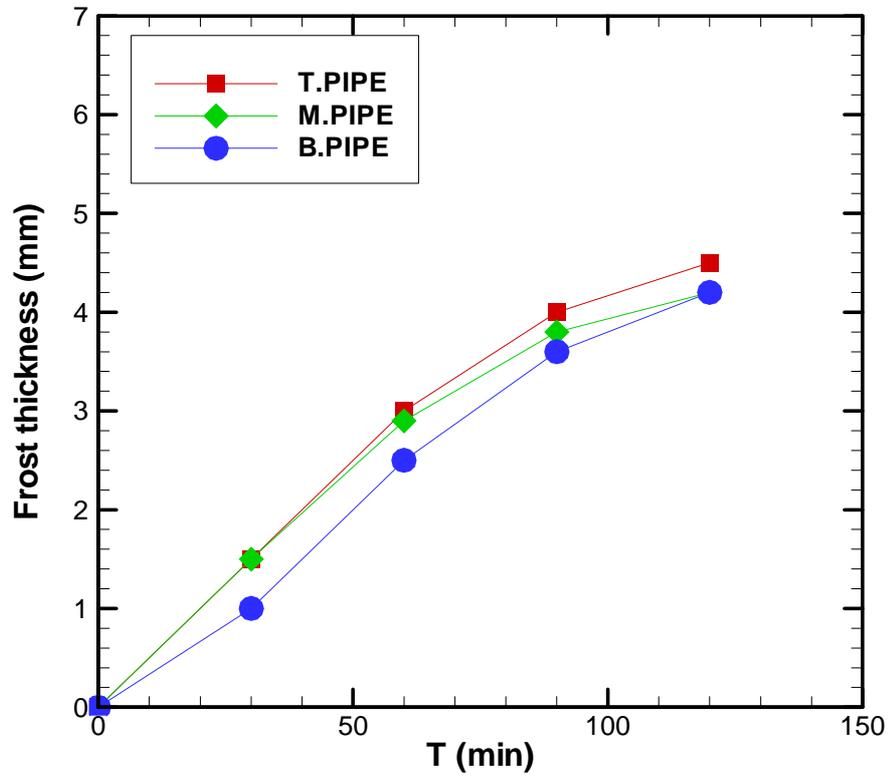


Fig. 4.7 Effect of supply air velocity on frost thickness

;  $\phi_{\infty} = 80\%$ ,  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $U_{\infty} = 0.3\text{m/s}$

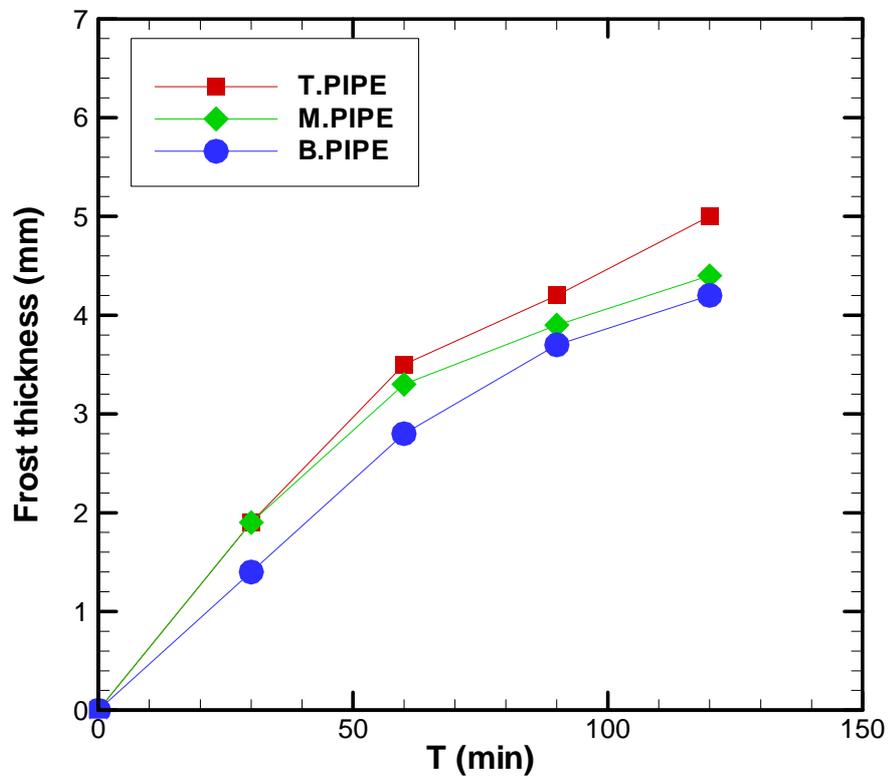


Fig. 4.8 Effect of supply air velocity on frost thickness

;  $\phi_{\infty} = 80\%$ ,  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $U_{\infty} = 0.6\text{m/s}$

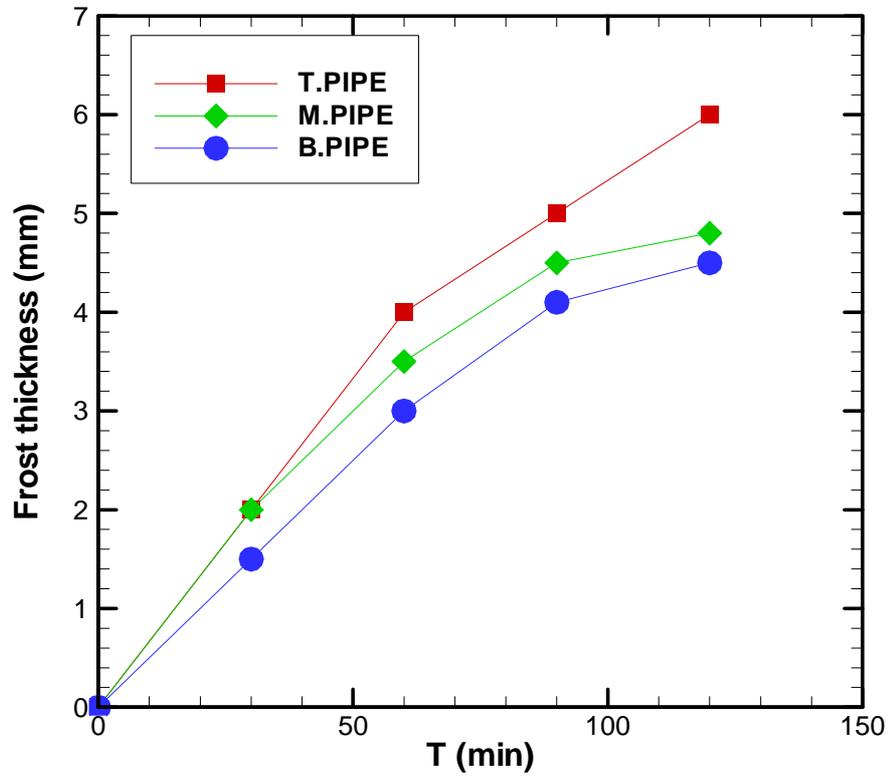


Fig. 4.9 Effect of supply air velocity on frost thickness

;  $\phi_{\infty} = 80\%$ ,  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $U_{\infty} = 0.9\text{m/s}$

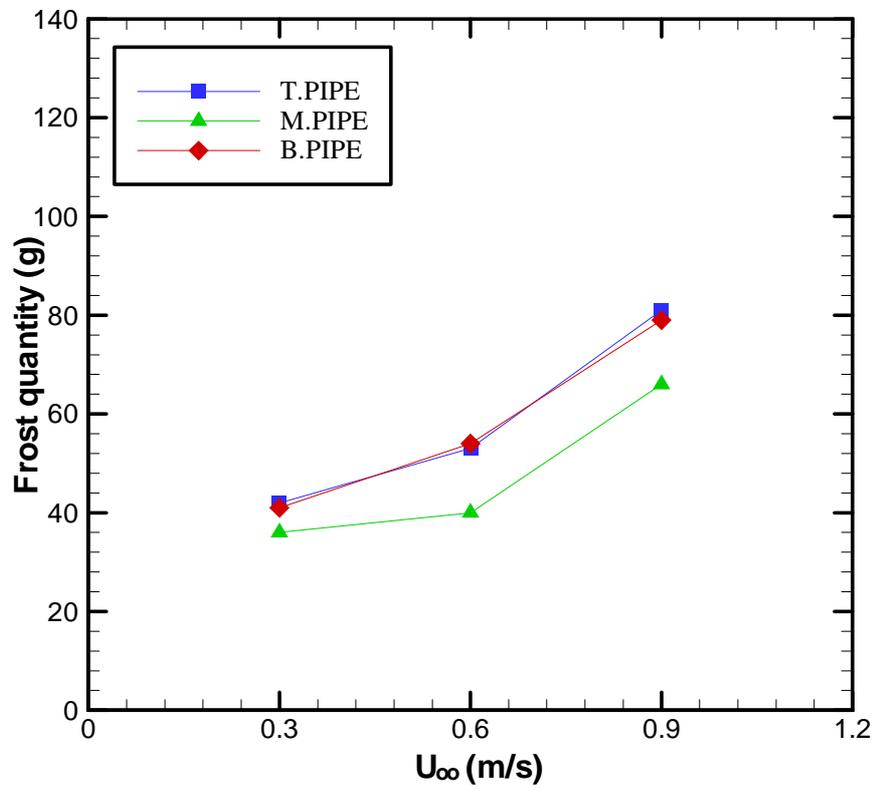


Fig. 4.10 Effect of supply air velocity on frost quantity  
 at ;  $\phi_{\infty} = 80\%$ ,  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ , 120min

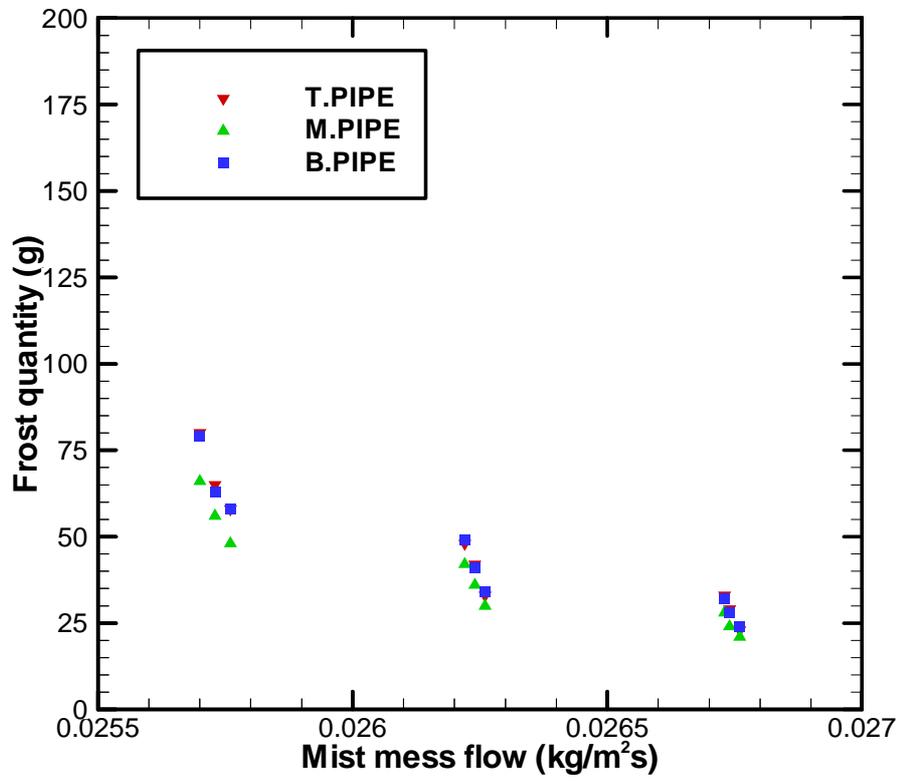


Fig. 4.11 Effect of mist mess flow on frost quantity  
at  $U_{\infty} = 0.3\text{m/s}$

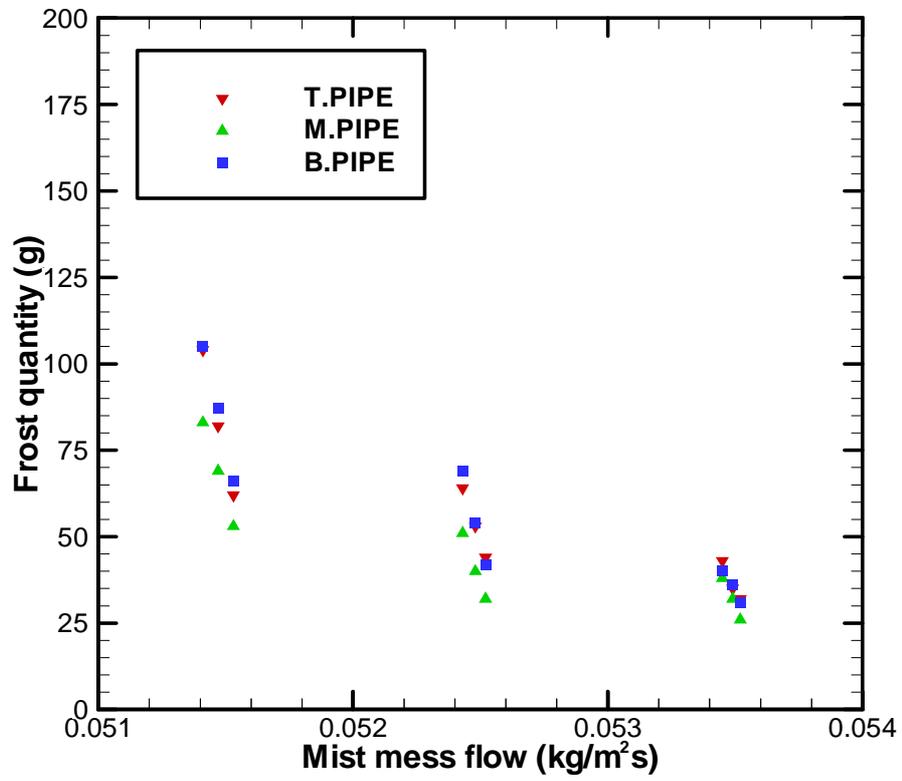


Fig. 4.12 Effect of mist mess flow on frost quantity  
at  $U_{\infty} = 0.6\text{m/s}$

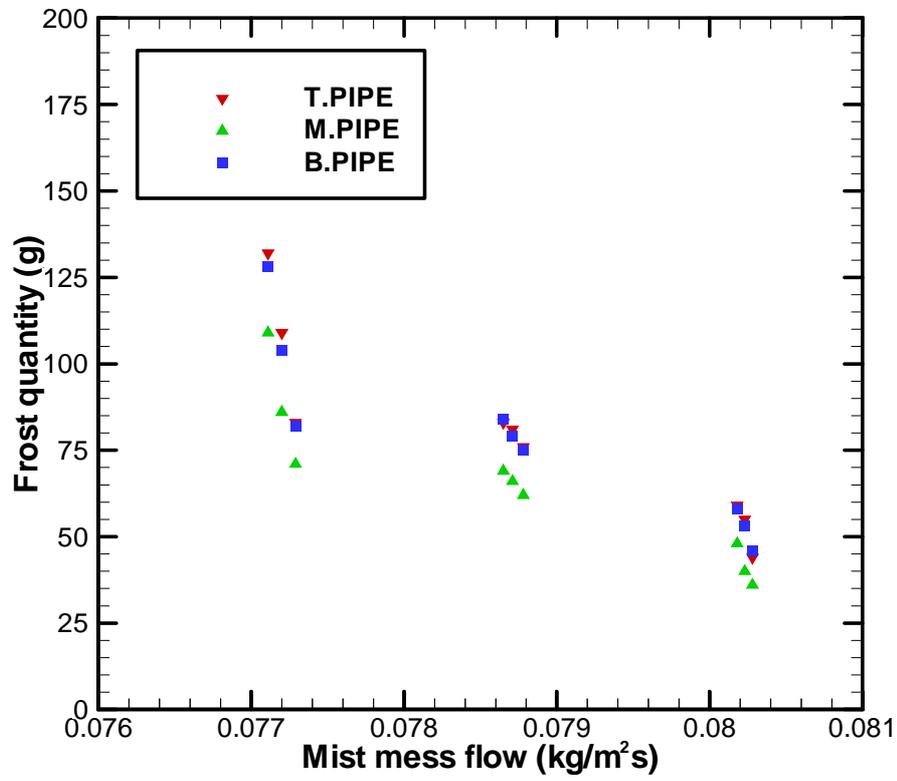


Fig. 4.13 Effect of mist mess flow on frost quantity  
at  $U_{\infty} = 0.9\text{m/s}$

### 4.3 입구공기온도에 따른 영향

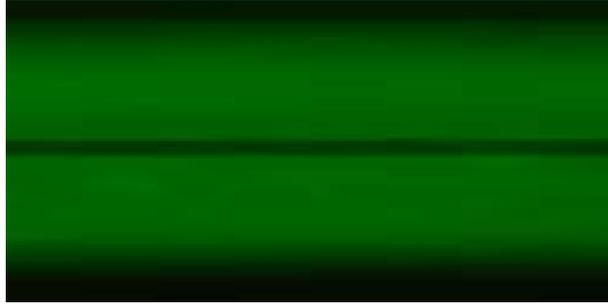
Fig. 4.14는  $\phi_{\infty} = 80\%$  ,  $U_{\infty} = 0.6\text{m/s}$ 의 상태에서의 공급공기의 온도에 따른 관군에서의 서리발생현상을 실험 시작 후 120분이 경과되었을 때 동관의 후면에서 촬영하여 가시화한 것이며, Fig. 4.15는 위의 동일한 조건과 같은 시점에서 동관의 측면을 가시화 한 것이다. Fig. 4.16은 위와 같은 조건에서 공급공기의 온도에 따른 서리량을 정량화한 결과를 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 4.17 , Fig. 4.18 및 Fig. 4.19는 위의 조건에서 입구공기온도에 따른 동관에서 발달하는 서리층을 동관별로 두께를 측정하는 것이다.

Fig. 4.20은 입구공기온도에 따른 동관의 위치별로 서리량을 측정하여 그래프로 나타낸 것이다.

또한 Fig. 4.21, 4.22 및 4.23은 입구공기온도가 15℃, 20℃ 및 25℃로 변화하였을 때 습공기질량유속에 따른 동관의 위치별로 서리량을 측정하여 그래프로 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 입구공기의 상대습도 및 유속이 일정할 경우 공기온도가 상승함에 따라 서리층이 발달하는 것을 알 수 있다. 이는 제3장에서 전술한 바와 같이 공급공기의 온도가 증가할수록 밀도가 크고 두께가 작은 서리층이 동관에서 생성되는데, 밀도가 높은 서리층은 낮은 서리층보다 단열효과의 감소에 의한 열전달의 증가와 초기의 서리증착이 열교환기에서의 핀 효과를 가져와 열전달 촉진의 영향을 받았기 때문이다.

또한 공기유속에 따른 영향을 보았을 때는 상부 파이프 부분이 유속의 영향을 받게 되어 서리층이 가장 많이 성장하는 현상이 관찰되었지만 공기온도에 따른 실험 결과로는 각 관의 서리층은 원만한 형태의 성장곡선을 보이고 있다. 이는 서리층의 성장에 관여되는 공기입구온도는 유속에 비하여 그 영향력이 작기 때문이다.



(a)  $T_{\infty} = 15^{\circ}\text{C}$



(b)  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$



(c)  $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$

**Fig. 4.14 Effect on supply air temperature (After Side)**

**;  $\phi_{\infty} = 80\%$ ,  $U_{\infty} = 0.6\text{m/s}$ , 120min**



(a)  $T_{\infty} = 15^{\circ}\text{C}$



(b)  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$



(c)  $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$

**Fig. 4.15 Effect on supply air temperature (Right Side)**

**;  $\phi_{\infty} = 80\%$ ,  $U_{\infty} = 0.6 \text{ m/s}$ , 120min**

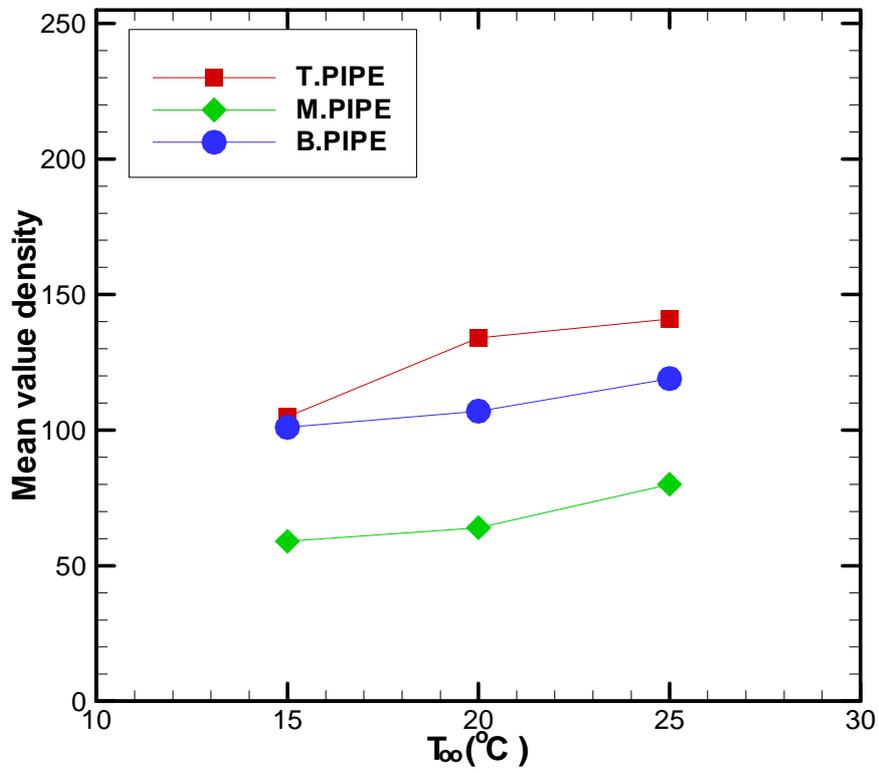


Fig. 4.16 Effect of supply air temperature on mean value of density at steady condition  
;  $\phi_{\infty} = 80\%$ ,  $U_{\infty} = 0.6$  m/s

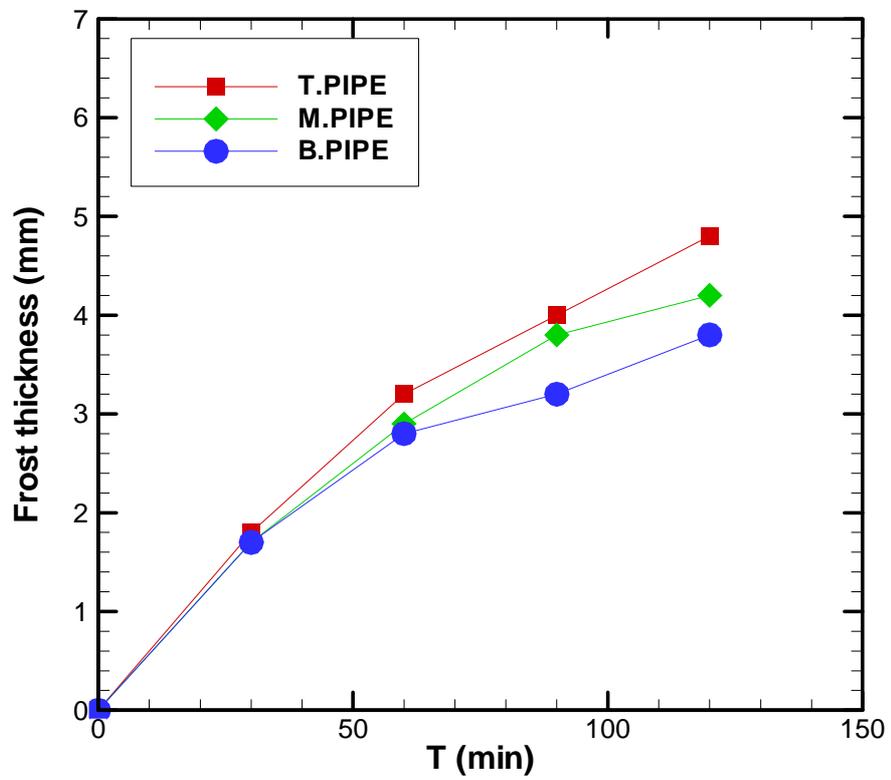


Fig. 4.17 Effect of supply air temperature on frost thickness

;  $T_{\infty} = 15^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi_{\infty} = 80\%$ ,  $U_{\infty} = 0.6\text{m/s}$

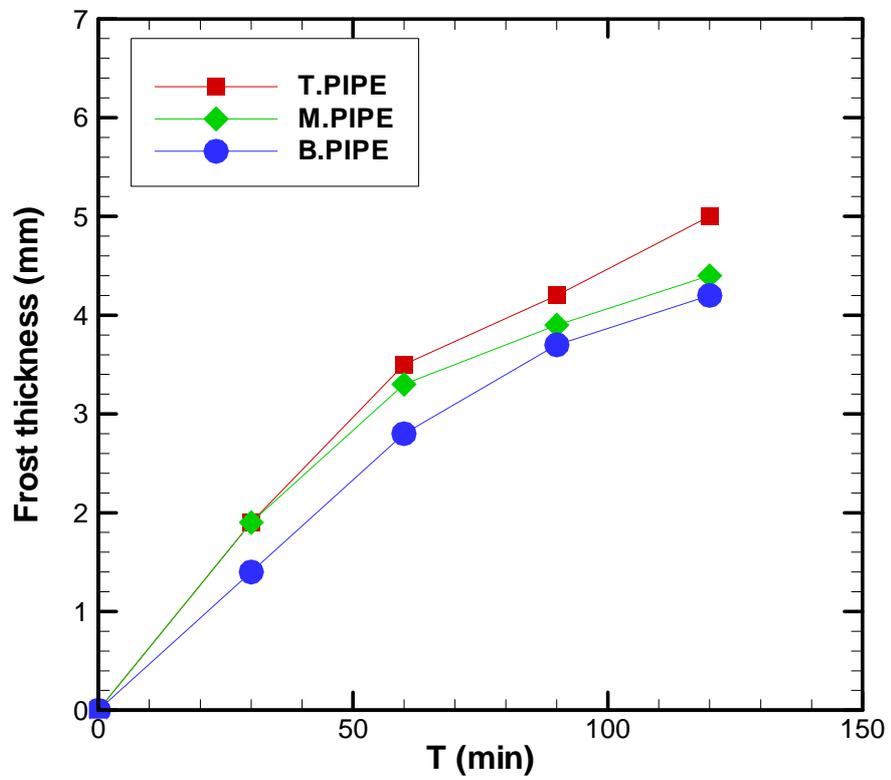


Fig. 4.18 Effect of supply air temperature on frost thickness

;  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi_{\infty} = 80\%$ ,  $U_{\infty} = 0.6\text{m/s}$

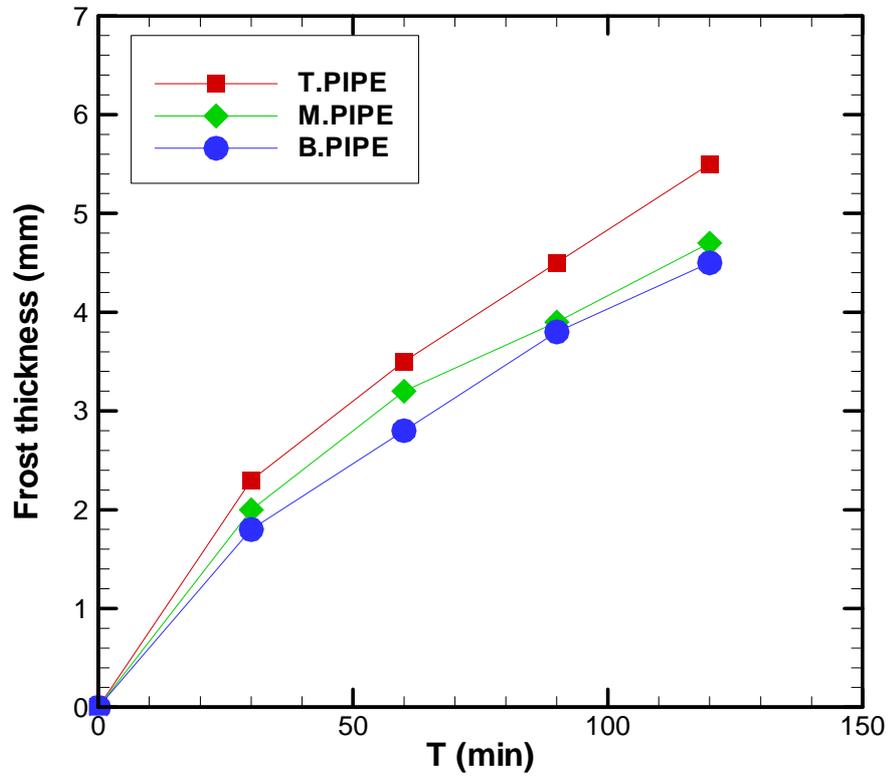


Fig. 4.19 Effect of supply air temperature on frost thickness

;  $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi_{\infty} = 80\%$ ,  $U_{\infty} = 0.6\text{m/s}$

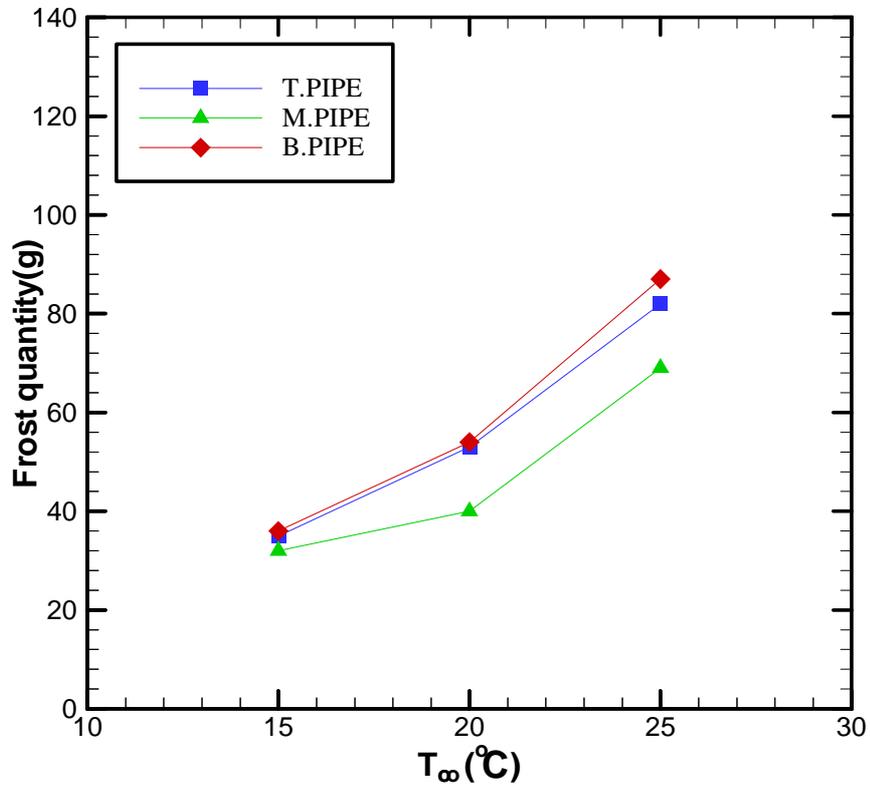


Fig. 4.20 Effect of supply air temperature on frost quantity

;  $\phi_{\infty} = 80\%$ ,  $U_{\infty} = 0.6\text{m/s}$ , 120min

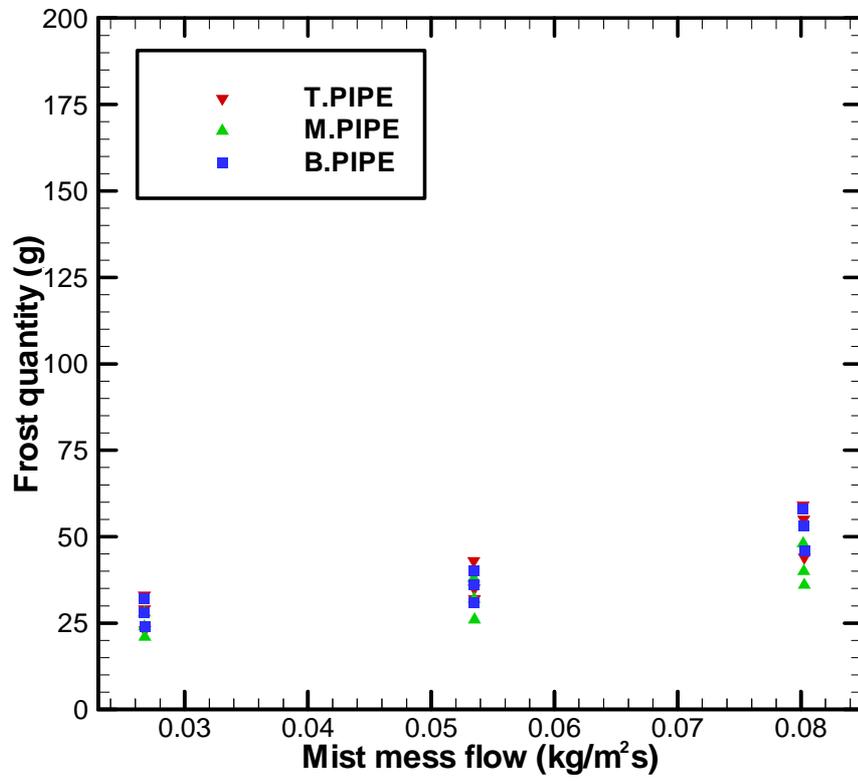


Fig. 4.21 Effect of mist mess flow on frost quantity  
at  $\mathcal{T}_\infty = 15^\circ\text{C}$

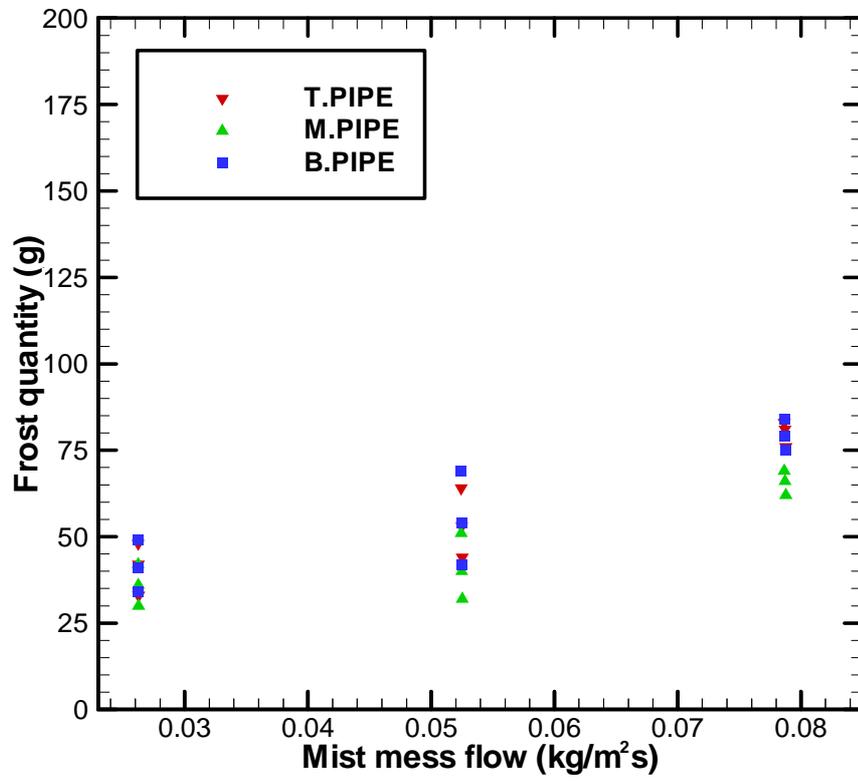


Fig. 4.22 Effect of mist mess flow on frost quantity  
at  $\mathcal{T}_\infty = 20^\circ\text{C}$

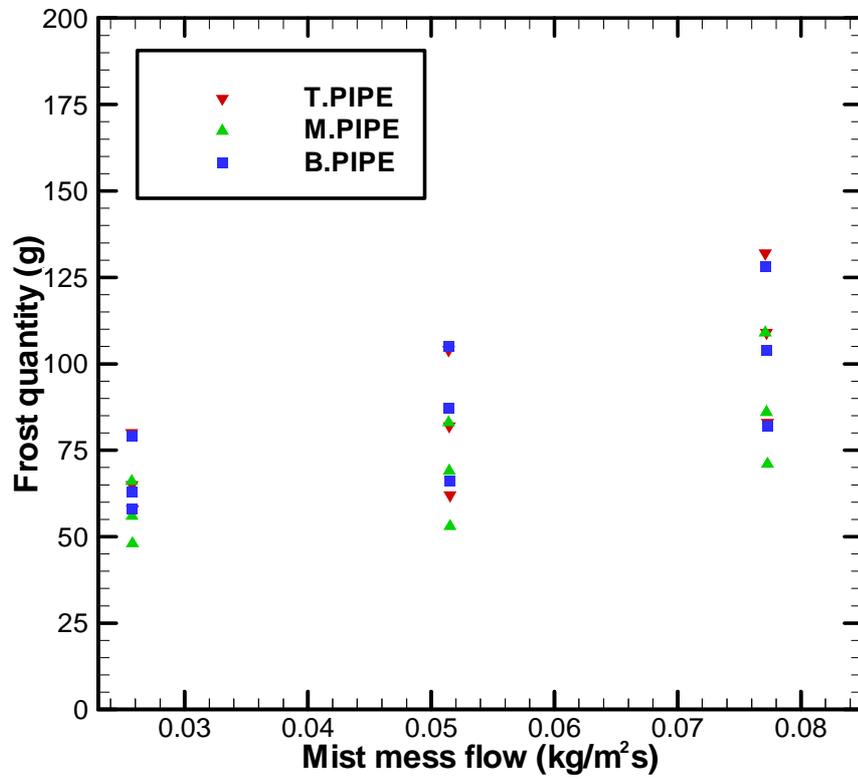


Fig. 4.23 Effect of mist mess flow on frost quantity  
at  $\mathcal{T}_\infty = 25^\circ\text{C}$

#### 4.4 입구공기의 상대습도에 따른 영향

Fig. 4.24는  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $U_{\infty} = 0.6\text{m/s}$ 의 상태에서의 공급공기의 상대습도에 따른 관군에서의 서리발생현상을 실험 시작 후 120분 경과되었을 때 동관의 후면에서 촬영하여 가시화한 것이며, Fig. 4.25는 위의 동일한 조건과 같은 시점에서 동관의 측면을 가시화 한 것이다. Fig. 4.26은 위와 같은 조건에서 공급공기의 상대습도에 따른 서리량을 정량화한 결과를 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 4.27, Fig. 4.28 및 Fig. 4.29는 위의 조건에서 입구공기의 상대습도에 따른 동관에서 발달하는 서리층을 동관별로 두께를 측정하는 것이다.

Fig. 4.30은 입구공기상대습도의 변화에 따른 동관의 위치별로 생성되는 서리량을 측정하여 그래프로 나타낸 것이다.

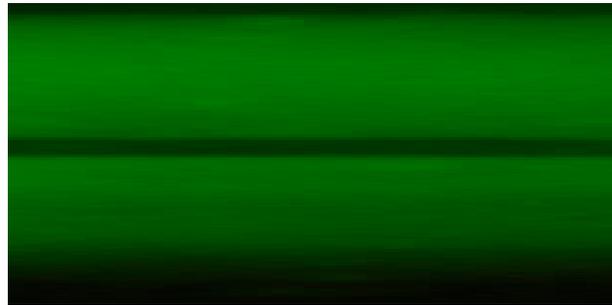
또한 Fig. 4.31, Fig. 4.32 및 Fig. 4.33은 상대습도가 70%, 80% 및 90%로 변화하였을 때 습공기질량유속에 따른 동관의 위치별로 생성되는 서리량을 측정하여 그래프로 나타낸 것이다.

Fig. 4.27~4.29에서 알 수 있듯이 상대습도량이 증가할수록 관군 전체적으로 서리층이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 제3장에서 전술한 바와 같이 단위부피당 차지하는 수분의 함유량 때문이며, 이 실험 또한 전 실험과 마찬가지로 일정한 유속을 가진 상태에서는 관 전체적으로 서리층의 성장율은 일정하게 증가함을 보였다.

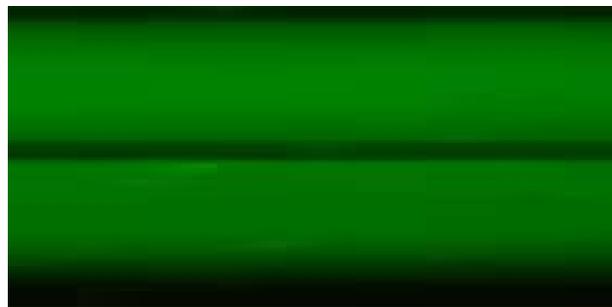
Fig. 4.30에서는 동일한 공기유속과 공기온도의 조건하에서 입구공기상대습도를 변화를 주었을 때 동관에서 생성되는 서리량을 실험 종료 후 그 양을 측정하여 그래프로 나타낸 것으로 상대습도가 증가할 수 록 동관의 위치별로 서리발생율이 일정하게 증가하는 것을 알 수 있다.

그리고 Fig. 4.31~33의 그림에서 알 수 있듯이 상대습도가 일정한 조건하에서는 질량유속이 증가할 수 록 전체적으로 서리량은 일정하게 증가하지

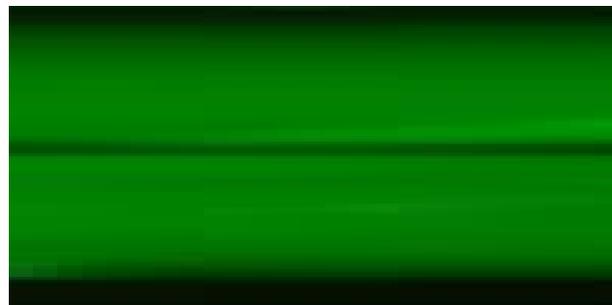
만 증가율은 종전의 유속과 온도의 영향 편에서 설명했던 그 증가율에 비해선 그다지 큰 편은 아니며, 동관의 위치별로 나타낸 그래프에서는 위치별 서리발생량이 골고루 분포되어 있어 서리발생 3가지 요인가운데 가장 영향력이 작은 요인으로 작용하게 된다.



(a)  $\phi_{\infty} = 70\%$



(b)  $\phi_{\infty} = 80\%$



(c)  $\phi_{\infty} = 90\%$

Fig. 4.24 Effect on relative humidity (After Side)

;  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $U_{\infty} = 0.6\text{m/s}$ , 120min



(a)  $\phi_{\infty} = 70\%$



(b)  $\phi_{\infty} = 80\%$



(c)  $\phi_{\infty} = 90\%$

Fig. 4.25 Effect on relative humidity (Right side)  
;  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $U_{\infty} = 0.6\text{m/s}$ , 120min

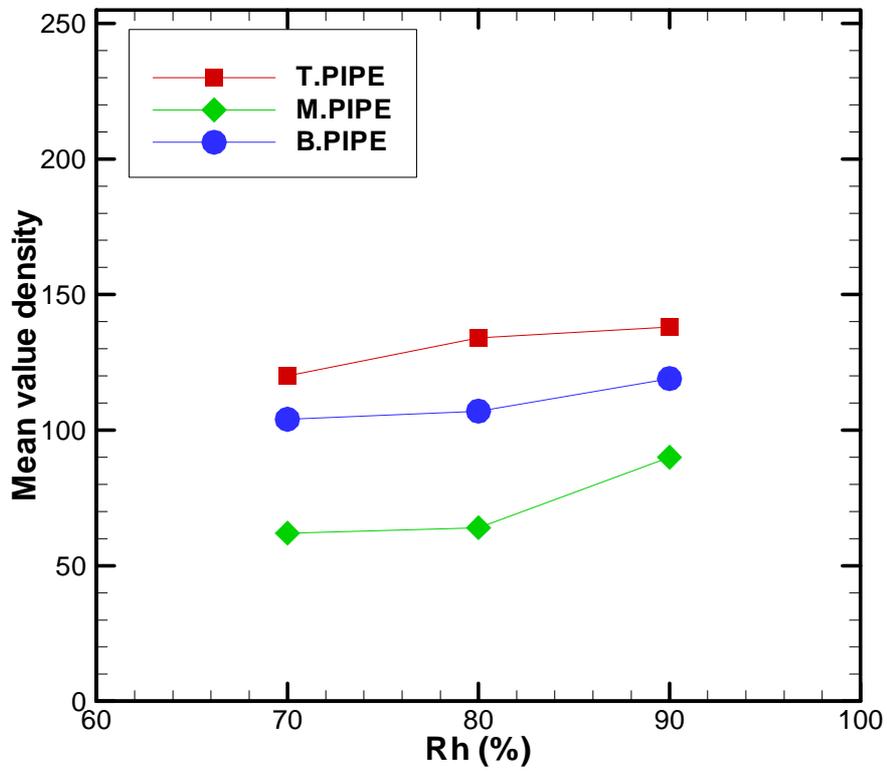


Fig. 4.26 Effect of relative humidity on mean value of density at steady condition  
;  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $U_{\infty} = 0.6\text{m/s}$

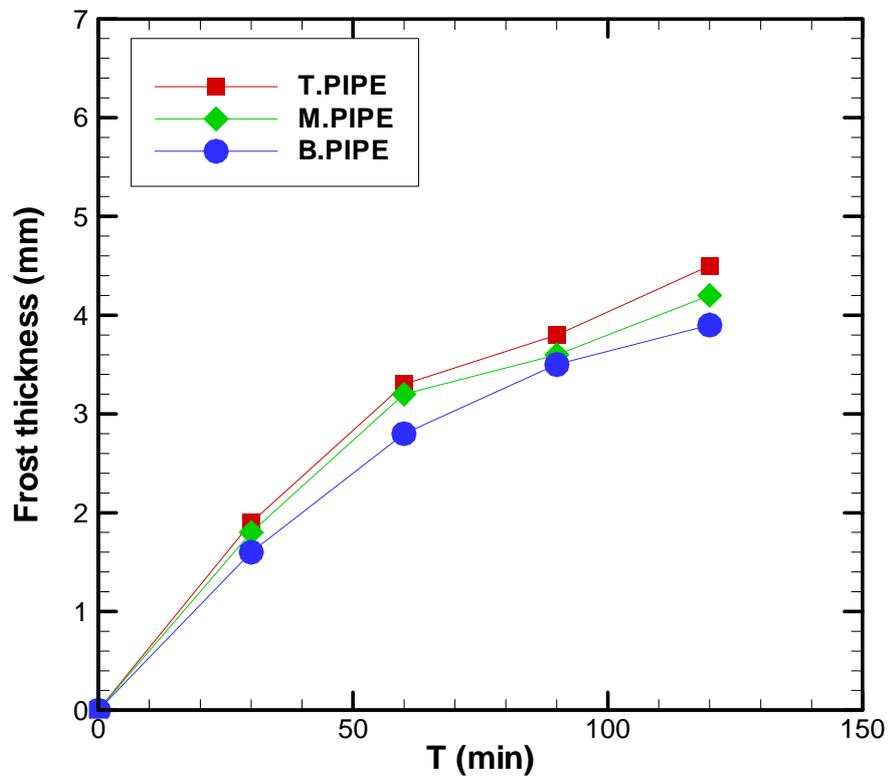


Fig. 4.27 Effect of relative humidity on frost thickness  
;  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi_{\infty} = 70\%$ ,  $U_{\infty} = 0.6\text{m/s}$

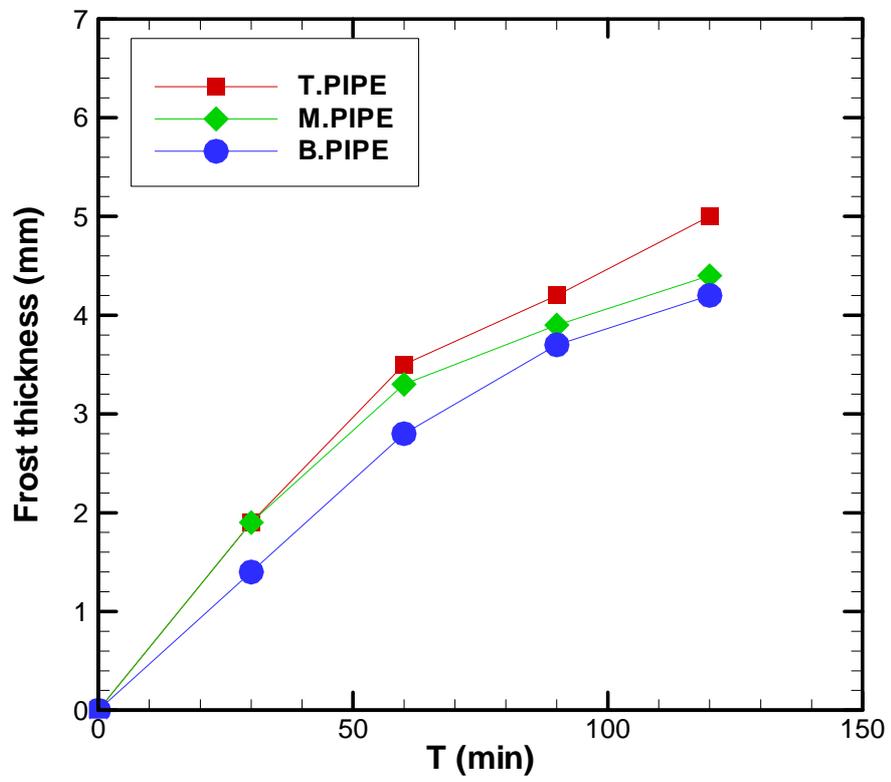


Fig. 4.28 Effect of relative humidity on frost thickness  
;  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi_{\infty} = 80\%$ ,  $U_{\infty} = 0.6\text{m/s}$

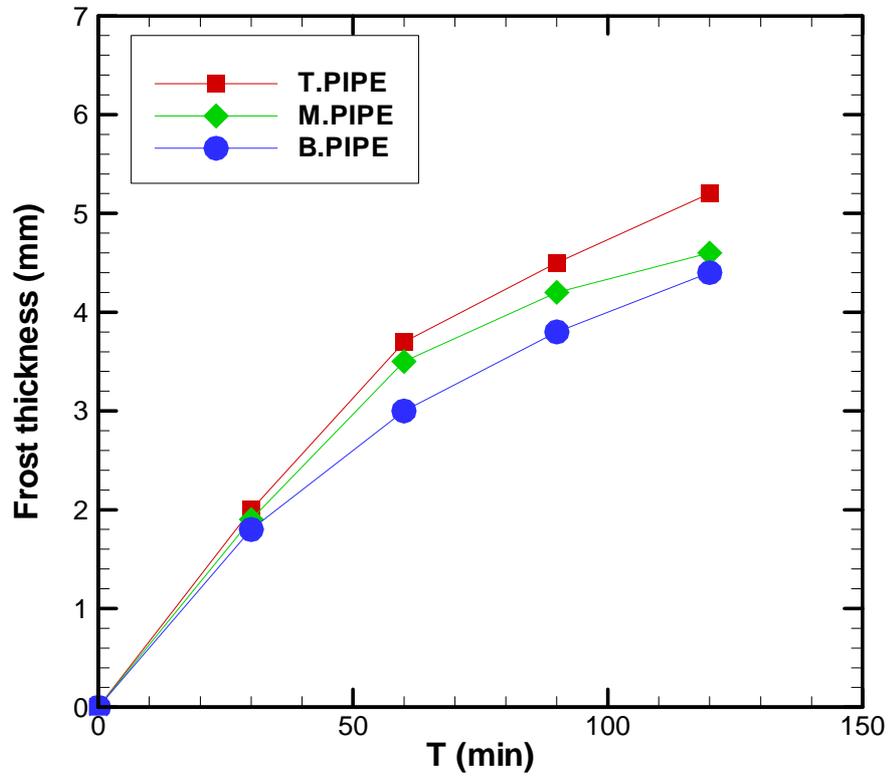


Fig. 4.29 Effect of relative humidity on frost thickness  
;  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi_{\infty} = 90\%$ ,  $U_{\infty} = 0.6\text{m/s}$

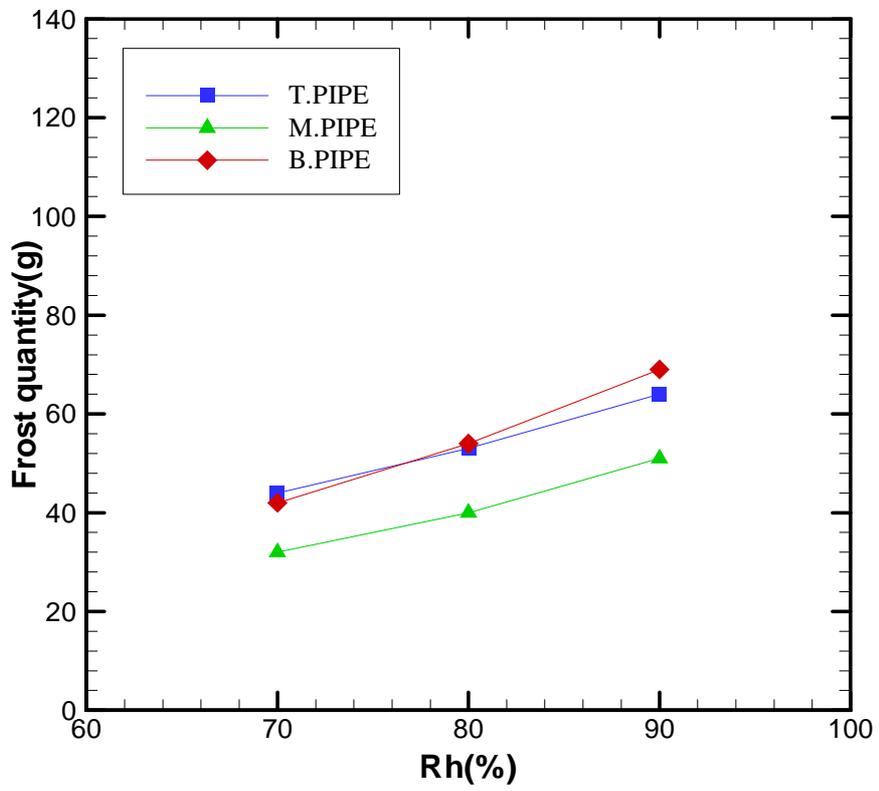


Fig. 4.30 Effect of relative humidity on frost quantity  
;  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $U_{\infty} = 0.6\text{m/s}$ , 120min

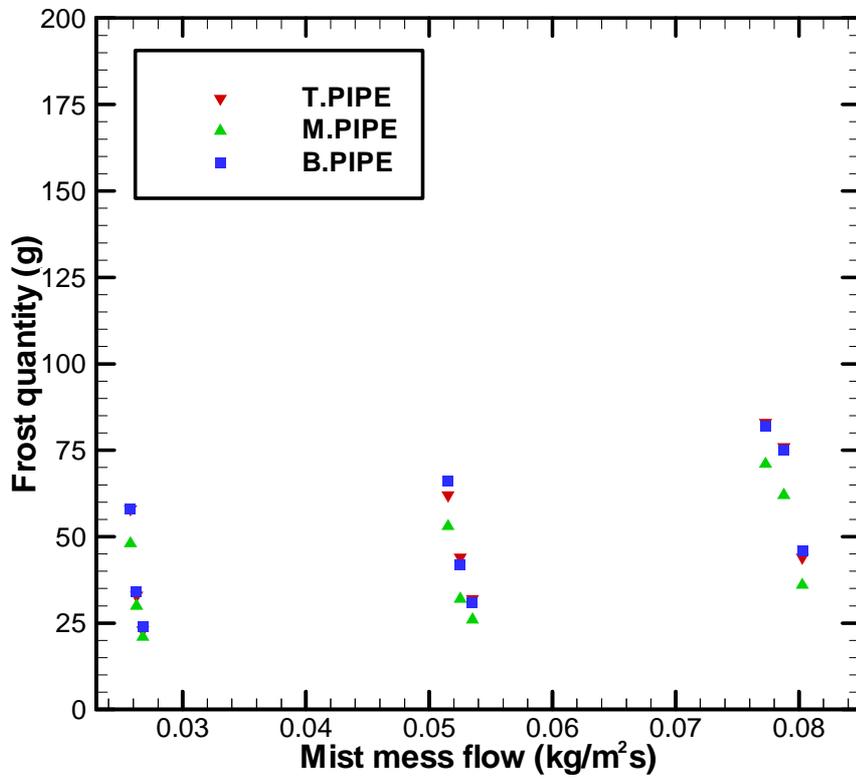


Fig. 4.31 Effect of mist mess flow on frost quantity  
at  $\phi_{\infty} = 70\%$

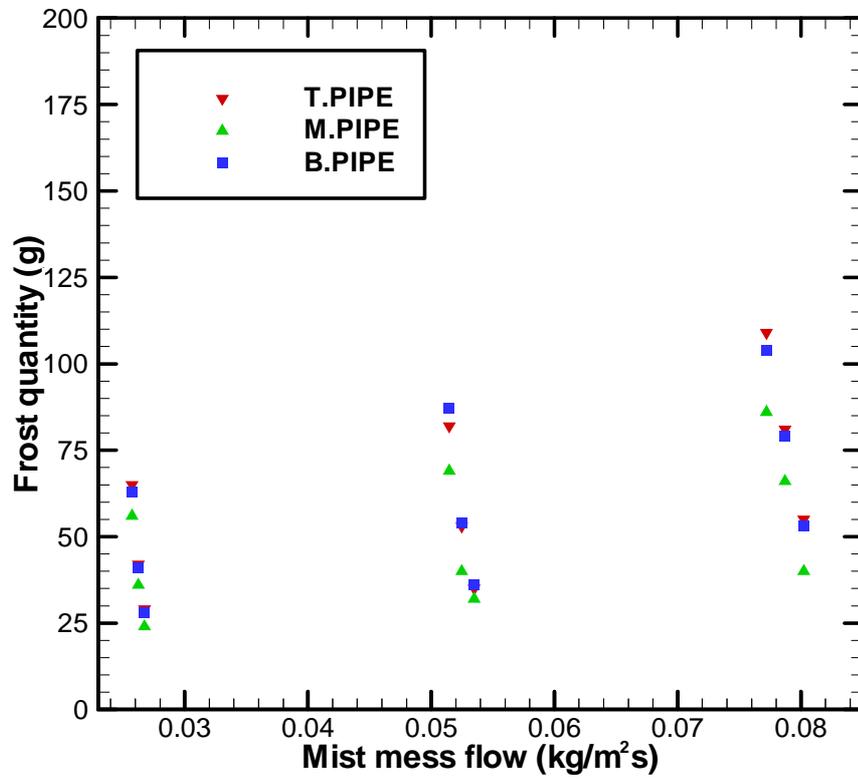


Fig. 4.32 Effect of mist mess flow on frost quantity  
at  $\phi_{\infty} = 80\%$

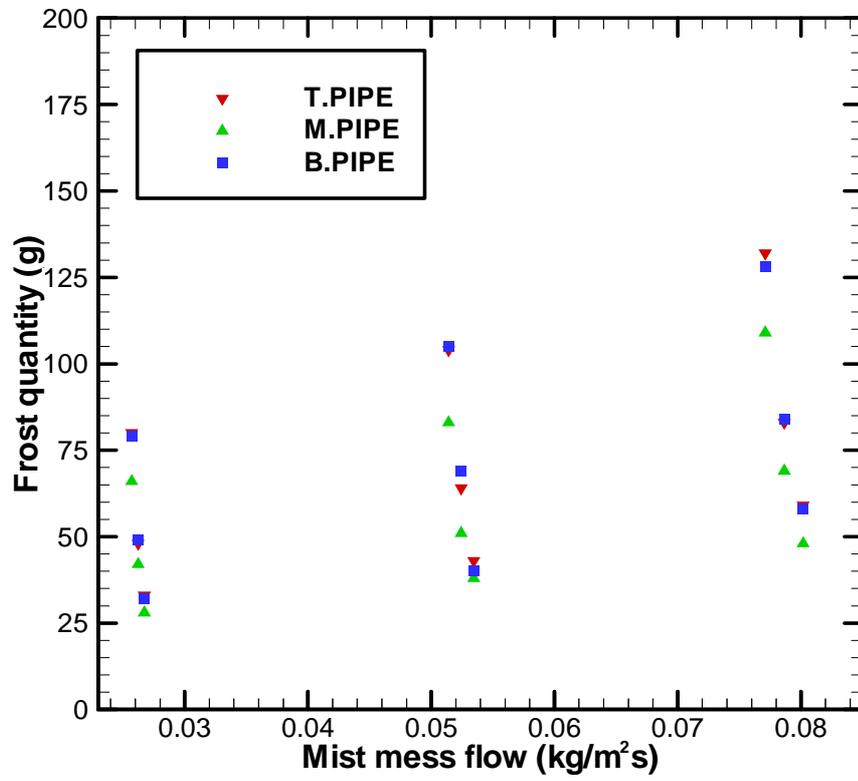


Fig. 4.33 Effect of mist mess flow on frost quantity  
at  $\phi_{\infty} = 90\%$

## 4.5 결론

본 장에서는 증발관에서의 서리발생 메커니즘의 파악을 위하여 관군에서 공급공기의 유속, 공급공기의 온도, 공급공기의 상대습도에 따른 영향을 평가하여 본 실험의 범위 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 공급공기의 유속이 빠를수록 관군 전체에서 발생하는 서리층은 증가한다.
- (2) 공급공기의 온도가 상승할수록 관군 전체에서 발생하는 서리층은 증가한다.
- (3) 공급공기의 상대습도가 높을수록 관군 전체에서 발생하는 서리층은 증가한다.
- (4) 공급공기의 유속은 타 요소에 비해서 서리층의 발생율에 더 크게 작용한다.
- (5) 관군에서 중간 파이프의 서리발생량이 가장 작으며 상부와 하부 파이프에서의 서리 발생량은 비슷하다.

## 제 5 장 총결론

본 연구에서는 증발기에서의 서리 발생 메커니즘의 파악을 위하여 단관과 관군에서 열교환기의 성능에 영향을 미치는 공급공기의 유속, 공급공기의 온도, 공급공기의 상대습도에 따른 영향을 평가하여 본 실험의 범위 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 공급공기유속이 증가할수록 단관과 관군에서 모두 서리층이 증가하였다.
- (2) 공급공기온도가 증가할수록 단관과 관군에서 모두 서리층이 증가하였다.
- (3) 공급공기상대습도가 증가할수록 단관과 관군에서 모두 서리층이 증가하였다.
- (4) 공급공기유속은 입구공기온도 및 상대습도보다 서리층의 성장요인에 크게 작용함을 보였다.
- (5) 단관과 관군에서 모두 서리층의 성장률은 시간이 지남에 따라 낮아진다.
- (6) 관군에서의 서리층의 성장은 모든 파이프에서에서 비슷하게 성장하나 그 중에서 서리량은 중간 파이프가 가장 작다.

## 참 고 문 헌

1. O'Neal,DL., "The effects of frost growth on extended surface heat exchanger:a review". ASHRAE transaction, Vol.93, No.2, 1987.
2. O'Neal.DL., "Perfomance of finned-tube heat exchangers under frosting conditions I.Simulation model and II. Comparion of experimental data with model", Rev.Int.Froid, Vol.16, No.3, 1993.
3. Chung,P.M.et al., "Frost formation and heat transfer on a cylinder in humid air cross flow", ASHRAE transaction Vol.65, 1959.
- 4.Parish,H.C. et al., "A numerical analysis of frost formation under forced convection", ASHRAE transaction, No.2331, pp.236-251, 1972.
5. Jones,B.W and Parker,J.D., "Frost formation with varying environmental parameters", Journal of heat transfer, May 1975.
6. Abdel-Wahel,R.M. et al., "Heat and mass transfer from a laminar air stream to a plater at subfreezing temperature",International Journal of Refrigeration, Vol.7, No.1, pp.49-55, 1984.
7. Sherif,S.A "A mathematical model for the heat and mass transfer on a plate under frosting conditions", ASME proceedings of National Heat Transfer Conference, 1988.
8. Padki.M.M. and Sherif,S.A. et al., "A simple method for modeling the frost formation phenomenon in different geometries",ASHRAE transations, Vol.22, No.1, pp.1127-1137, 1989.
9. Raju,S.P. and Sherif,S.A., "Frost formation and heat transfer on circular cylinder in cross flow",International Journal of Refrigeration, Vol .16, No.6, 1993.

10. Hayashi, Yujiro and Aoki, Kazuro and Yuhara, Hiroshi, "Study of frost formation based on a theoretical model of frost layer", Heat transfer Japanese Vol.6, No.3, pp.79-94, 1977.
11. Yonko, J.D and Sepsy, C.F., "An investigation of thermal conductivity of frost layer while forming on a flat plate", ASHRAE transaction, No, 2043, 1967.
12. Sanders, C. Th., "The influence of frost formance and defrosting on the performance of air coolers", Ph. D. Diss, Technische Hogeschool, Delft University-Netherlands, 1974.
13. Katsuta, K., Ishihara, I., and Mukat, T., Reito, Vol.58, No.665, pp.229-238, 1983.
14. Adachi, M., Inoue, S., and Inoda, K., Reito, Vol.52, No.598, pp.715-727, 1977.
15. Zakrzewski, B., Int. J. of Refrigeration, Vol.7, No.1 pp.41-45, 1984.
16. O'Neal, D.L., "A review of frost formation in simple geometries", ASHRAE transaction, 1985
17. Aoki, K., Hattori, M., Ujiie, T., "Snow melting by heating from the bottom surface", JSME International Journal series II, Vol.58, No.665, pp. 229-238, 1998
18. Holman, J.P., "Heat transfer" ,Mc-Graw Hill, 1986
19. Sherif, S. A., Raju, S. P., Padki, M. M., and Chan, A. B., "A Semi-empirical Transient Method for Modeling Frost Formation on a Flat Plate, Rev. Int. Froid, Vol.16, No.5, pp.321-329. 1993
20. 이윤빈, 노승탁, "직교유동 내에 놓인 수평 실린더에서 서리 생성에 관한 실험적 연구" 공기조화.냉동공학 논문집 제 11 권 제 4 호, pp.448-456, 1999

## 감사의 글

본 논문이 완성되기까지 부족한 저를 항상 따뜻한 사랑과 세심한 정으로 보살펴주시고 학문적, 정신적으로 많은 가르침을 주신 오철 교수님과 김명환 교수님께 진심으로 감사드립니다.

또한 바쁘신 가운데에도 본 논문이 완성되기까지 많은 조언과 관심으로 세심하게 심사해 주시고 다듬어 주신 윤석훈 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

그리고 힘들고 어려울 때 언제나 한가족처럼 옆에서 격려와 도움을 주신 연구실의 박대식, 최영규, 김정식님께 깊이 감사드리며, 항상 옆에서 많은 힘이 되어준 동기 배성우님께도 감사의 마음을 전합니다. 그리고 같이 실험에 참가한 4학년 연구생 신길우 외 후배님께도 깊은 감사의 마음을 전합니다. 또한 바쁘신 가운데에도 항상 많은 관심과 격려를 해주신 기관시스템공학부 학부장님 이하 교수님들께 깊은 감사를 드립니다. 같이 조교생활을 같이 해왔던 동료 조교님들께도 깊은 감사의 마음을 전합니다.

또한 논문을 완성하기 위해 많은 도움을 주신 펜타텍(주) 권영광 사장님 이하 박만용 이사님과 김동일 이사님에게도 깊은 감사의 마음을 전합니다. 지금까지 아들을 믿어주시고, 이해해주시며 정성껏 뒷바라지 해주신 사랑하는 어머님과 하늘나라에서 밝게 미소 짓고 계시는 아버님과 누나, 여동생 그리고 나의 친구들에게 이 영광을 드립니다.

가장 힘들었던 시기에 나를 믿어주고 사랑해준 오명화님에게도 감사의 마음을 전합니다.

비록 짧은 대학원 생활이었지만 제 인생에 있어서 너무나도 소중한 시간이었고 무엇보다도 바꿀 수가 없었던 시간이었습니다. 저를 지켜봐 주시는 모든 분들의 기대에 어긋나지 않도록 언제나 최선을 다하는 모습으로 살아가겠습니다.