

공조용 열교환기 증발관에서 서리 발생에 관한 메커니즘의 실험적 연구

박상균* · 오철**

*한국해양대학교 대학원, **한국해양대학교 기관시스템공학부 교수

An Experimental Study on Frost Generation Mechanism from Evaporator Tube in Air Conditioning System

Sang-Kyun Park* · Cheol Oh**

*National Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

**Division of Marine engineering system, National Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

요 약 : 이 실험의 목적은 튜브형 증발관에서 입구 공기 속도, 온도와 상대 습도에 따른 서리층 생성의 비교 검토에 있다. 입구 공기 속도와 온도는 각각 0.3%, 0.6%, 0.9%, 15°C, 20°C, 25°C로 하였고, 상대 습도는 70%~90%로 하였다. 그리고 일반적인 공조기용 열교환기에서의 서리 발생 현상을 파악하기 위하여 냉각튜브의 온도를 -15°C로 일정하게 유지하였다. 그 결과 공급공기의 상대습도, 유속 및 온도가 증가할수록 서리 생성량이 증가함을 알 수 있었다.

핵심어 : 튜브형 증발기, 서리층, 상대습도

Abstract : The object of this experiment was the evaluation of the growth rate of frost layer conditioned by inlet air's velocity, temperature and relative humidity on the copper tube in evaporator. In this experiment, the inlet air's velocity were 0.3 %, 0.6 %, 0.9 %, temperature were 15 °C, 20 °C, 25 °C and the variation of relative humidity was 70% - 90%. And the brine temperature flowing through the copper tubes was kept -15 °C because generally cooling temperature range is constantly -15 °C in the heat exchanger for air conditioning system. It was found that the amount of frost generation increased so that the relative humidity, velocity and temperature of supply air increased.

Key words : Evaporator, Frost layer, Relative humidity

기호설명

T_{∞} : 입구공기온도[%]

T_w : 동관 내 브라인 온도[%]

U_{∞} : 입구공기풍속 [m/s]

ψ_{∞} : 입구공기 상대습도[%]

1. 서 론

인간이 쾌적한 생활을 영위하고자 하는 것은 근본적인 욕구로서 유사 이래 이것을 지향하기 위한 끊임없는 노력이 행하여져 왔으며, 20세기 후반의 급격한 경제 발전과 생활수준의 향상으로 현대사회에서는 보다 더 쾌적한 생활환경을 요구하고 있다. 따라서 냉동 및 공기조화 산업은 급격히 발전되어 왔으며 그에 따른 공기조화장치도 가정용에서부터 산업용에 이르기까지 폭넓게 보급되어 왔다. 이러한 공기조화장치에 대하

여 지금까지 많은 연구가 진행되어져 왔으며(shaerif et al. 1993; Tao et al., 1994; Yonko et al., 1976; Lee et al., 1999). 최근 산업의 고도화에 따른 고기능화 및 소형화된 제품개발, 수요자의 여건변화 등에 따른 신제품 개발 및 신기술개발의 노력이 활발하게 이루어지고 있다. 무엇보다도 에너지 절약 측면의 고효율성이 절실히 요구되고 있으며 이와 관련한 많은 연구들이 활발히 진행되고 있다. 하지만 열 저항의 80-85%를 차지하는 관 외측 서리층과 관련한 논문들은 현실적으로 미흡한 실정이다. 따라서 핀 효율 개선 및 열교환기 표면의 서리 발생 현상의 파악이 중요한 과제이며 본 연구에서는 튜브형 증발관에서 공급 공기의 유속, 온도, 및 상대습도에 의한 서리 발생량의 변화에 대하여 실험적 검토를 수행하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 실험장치의 전체 계통도이다. 실험장치는 개회로 풍동장치로서, 크게 공급공기의 유속을 조절하는 풍량조절부,

* 대표저자 : 박상균(정회원), jasija@hanmail.net, 051)410-4268

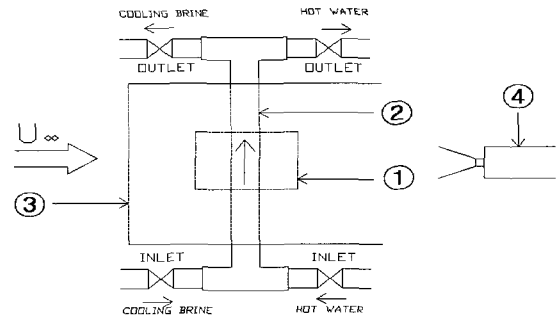
** ohcheol@mail.hhu.ac.kr, 051)410-4268

공급공기의 온도를 조절하는 공기가열부 및 냉각부, 공급공기의 습도를 조절하기 위한 가습부, 냉각면의 온도를 조절하기 위한 브라인 순환부, 시험부 및 가시화부로 구성되어 있다. 풍량조절부 ①은 1.5kW의 3상 유도전동기를 이용한 1750rpm의 원심형 팬을 사용하였으며, 팬 입구의 댐퍼를 조절함으로써 소정의 풍속을 유지, 조절 하였다. 공기가열부 ④ 및 냉각부 ⑤는 가로 470mm, 세로400mm, 9단 4열의 핀-튜브 열교환기로, 열교환기에 공급되는 온수 및 브라인의 양을 조절하여 공급공기를 소정의 온도로 유지하였다. 가습부 ⑦은 2kW의 히터를 내장한 증기가습기로 슬라이드에서 공급전압을 조절하여 발생 증기량을 조절하였으며, 팬 입구부에 설치하여 공급공기의 습도 조절시 사용하였다.

Fig. 2는 시험부의 상세도이다. 시험부는 길이 450mm, 외경 41.3mm의 동관을 사용하였으며 동관내의 온도를 측정하기 위하여 동관의 입구 및 출구에 각각 2개의 열전대(C-A type)를 설치하였다. 가시화부는 동관표면의 서리층의 발생현상을 관찰할 수 있도록 두께 20mm의 투명한 아크릴판을 사용하여 제작하였다. 동관 입출구부의 공기온도를 측정하기 위해 열전대(K-type)를 각 1개소 부착하였고, 상대습도를 측정하기 위해 습도계(HMP-234)를 부착하였다.

그리고 동관 입구부에 피토편(Pitot tube)을 설치하여 공급공기의 풍속을 측정 하였다. 또한 촬영 시 상부 촬영효과를 높이기 위하여 가시화부의 아크릴판 하부에 검은색 테이프로 처리하였다.

인의 온도는 일반적 냉동 공조용 열교환기의 냉각온도(T_w)범위를 고려해 -15°C 로 일정하게 유지하였으며, 이들 각각의 조건에서 생성되는 서리형상 및 생성량을 비교 검토하였다. (Table 1)

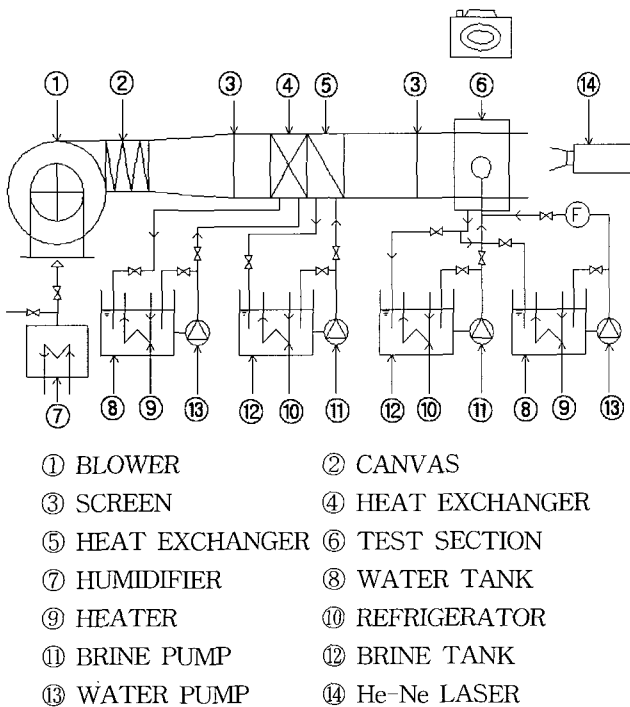


- ① acryl plate
- ② copper tube
- ③ screen
- ④ He-Ne laser

Fig. 2 Diagram of test section

Table 1 An experimental condition

Condition	Range
$\psi_{\infty}(\%)$	70, 80, 90
$T_w(^{\circ}\text{C})$	-15
$T_{\infty}(^{\circ}\text{C})$	15, 20, 25
$U_{\infty}(m/s)$	0.3, 0.6, 0.9



- 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. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

실험조건으로는 공급공기의 유속(U_{∞})을 0.3m/s, 0.6m/s, 0.9m/s, 공급공기의 온도(T_{∞})를 15 $^{\circ}\text{C}$, 20 $^{\circ}\text{C}$, 25 $^{\circ}\text{C}$, 공급공기의 상대습도(ψ_{∞})를 70%, 80%, 90%로 하였으며, 동관내의 브라

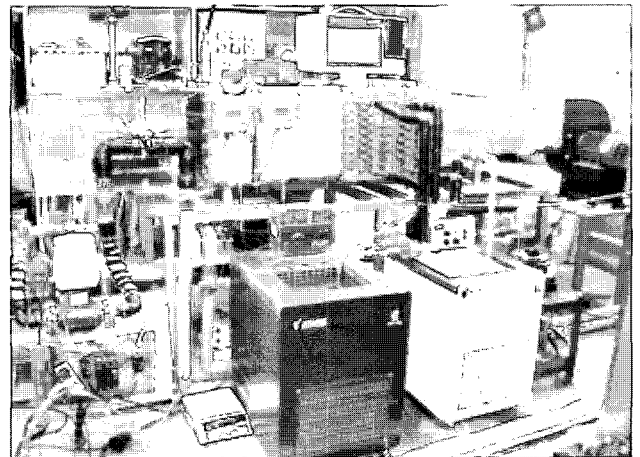


Fig. 3 Photo of experimental apparatus

실험은 먼저 송풍기를 운전하여 공급 공기의 풍속을 소정의 풍속으로 일정히 유지한 후 냉각, 가열 및 가습을 통하여 공급공기의 온도 및 습도가 일정하게 유지된 상태에서 냉각용 브라인을 시험부로 공급하는 시간을 실험 개시 시간으로 하였다. 소정의 실험 조건을 형성하는 동안 시험부 동관에 서리의 착상현상 발생을 방지하기위하여 비닐 랩(vinyl rap)을 부착하였으며, 실험 시작과 동시에 제거 하였다. 본 실험의 오차 범위는 입구공기온도 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, 습도 $\pm 1\%$ 이다. 동관표면에서 생

성되는 서리형상을 가시화 하기위하여 He-Ne 레이저광을 비추어 서리층에 반사되는 빛을 시험부의 상부에서 디지털 카메라로 매 30분마다 1회씩 4회 촬영하였다. 서리생성량은 정상 상태에서 부착된 서리를 용해시켜 측정하였다. Fig. 3은 실험 장치의 전경사진이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 서리생성 이론

착상 현상을 파악하기 위해서는 서리층의 성장과정을 이해하는 것이 무엇보다도 중요하다. 건공기와 수증기가 혼합되어 있는 습공기가 노점보다 낮은 온도의 표면에 노출되었을 경우, 수증기가 냉각되면서 온도구배가 형성되고, 승화과정을 거쳐 증착됨으로써 서리층이 형성되게 된다. 이 착상현상은 4가지 요인, 즉 공급공기의 유속, 온도, 습도, 및 냉각면의 표면온도에 영향을 받게 되며, 발생된 서리층은 용해 및 재 응고 과정을 통해서 그 두께와 밀도를 더해간다. 본 실험을 통해 동관 주위의 서리층을 Fig. 4과 같이 나타내었을 경우 여기서 동관의 후방(B)의 측에서는 표면 온도가 빙점 보다 낮아 응결(freezing)현상이 발생하고 공기의 유동이 동관에 미치는 영향으로 인하여 후방에서의 압력이 삼중점에서의 압력 보다 낮아지게 되어 승화현상이 발생한다. 이 응결 또는 승화현상의 결과로 다공성의 서리층이 형성된다. 동관의 전방(F)측에서도 동일한 현상이 일어나면서 인접한 공기를 냉각시켜 더 많은 서리를 발생시키고 서리층의 표면이 빙점에 도달할 때까지 서리층을 성장시킨다. 이 과정에서 수증기의 일부는 표면에서 응결 또는 승화하여 서리층의 두께를 증가시키고, 일부는 응축되어 다공성의 서리층을 통과하여 결빙되기 전까지 안으로 확산되어 서리층 안부분에서 응결, 밀도를 증가시킨다. 즉, 동관 전방(F)에는 밀도가 높고 두께가 작은 서리층이 생성된 반면 관의 후방(B)에는 밀도가 낮고 두께가 큰 서리층이 생성된다.

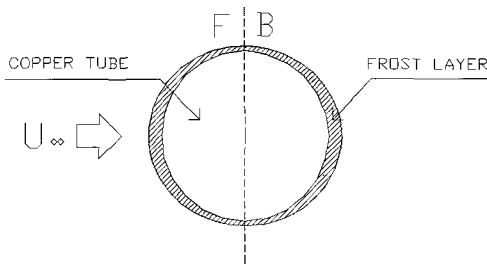


Fig. 4 Pattern of frost generation in copper tube

3.2 상대습도에 따른 영향

Fig. 5, Fig. 6 및 Fig. 7는 실험 시작 120분 경과 후 정상상태에서 촬영한 사진으로, 공급공기의 유속을 0.9m/s로 일정하게 하고 공급공기온도의 변화에 따른 공급공기의 습도를 70%, 80%, 90%로 변화시켰을 때의 각각의 실험 결과를 나타낸다.

그림에서 알 수 있듯이 유입공기의 습도가 증가함에 따라

서리층의 두께가 증가하게 된다. 이는 유입공기의 습도 증가에 따라 유동공기와 서리표면간의 수증기 농도차가 커져 농도차에 의한 구동력이 증가되어 물질증가량이 증가, 서리층의 성장이 촉진되었기 때문이다.



(a) $\psi_{\infty} = 70\%$ (b) $\psi_{\infty} = 80\%$ (c) $\psi_{\infty} = 90\%$

Fig. 5 Effect on relative humidity at $T_{\infty} = 15^{\circ}\text{C}$, $U_{\infty} = 0.9$ m/s, 120 min



(a) $\psi_{\infty} = 70\%$ (b) $\psi_{\infty} = 80\%$ (c) $\psi_{\infty} = 90\%$

Fig. 6 Effect on relative humidity at $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$, $U_{\infty} = 0.9$ m/s, 120 min



(a) $\psi_{\infty} = 70\%$ (b) $\psi_{\infty} = 80\%$ (c) $\psi_{\infty} = 90\%$

Fig. 7 Effect on relative humidity at $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$, $U_{\infty} = 0.9$ m/s, 120 min

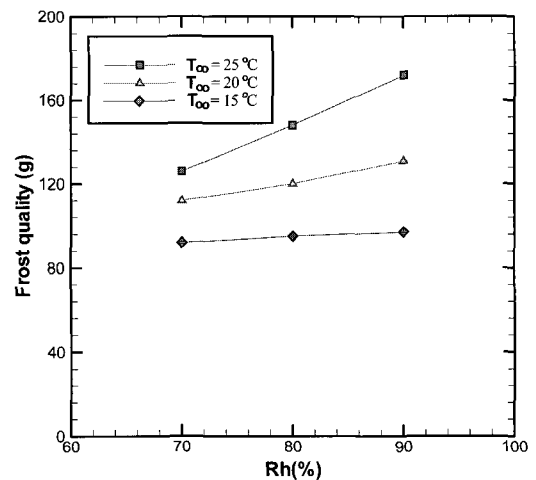


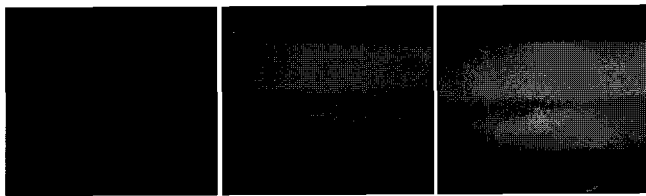
Fig. 8 Effect of relative humidity on frost quantity

Fig. 8는 공급 공기의 유속을 0.9m/s로 일정인 한 후 공급 공기온도의 변화에 따른 상대습도를 70%, 80%, 90%로 변화시켰을 때 정상상태에서의 서리량 측정결과를 나타낸 것이다.

서리량은 실험 시작 후 120분이 경과해 실험을 종료하였을 시 동판 밑에 작은 집수 장치를 설치하고 온수탱크에서 40°C의 온수를 동판에 순환시킴으로서 서리를 용해하여 그 물의 양을 정밀 저울로 측정하였다. 그림에서 알 수 있듯이 상대습도가 증가할수록 발생 서리량이 증가하게 되며, 이는 전술한 바와 같이 물질 전달량이 증가하기 때문이다.

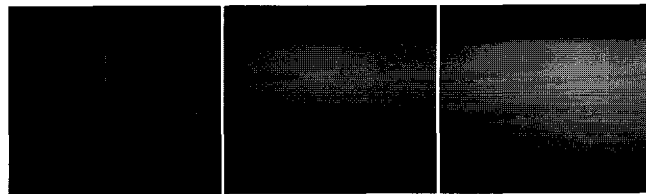
3.3 공급공기 온도에 따른 영향

Fig. 9, Fig. 10 및 Fig. 11은 공급공기의 유속이 0.6m/s로 일정한 조건에서 각각의 상대습도에 대하여 온도를 15°C, 20°C 및 25°C로 변화시켰을 때의 공급공기 온도변화에 따른 영향을 나타낸다.



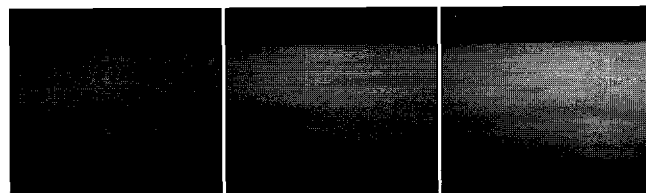
(a) $T_{\infty} = 15^{\circ}\text{C}$ (b) $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ (c) $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$

Fig. 9 Effect on inlet air temperature at $\psi_{\infty} = 70\%$, $U_{\infty} = 0.6 \text{ m/s}$, 120min



(a) $T_{\infty} = 15^{\circ}\text{C}$ (b) $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ (c) $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$

Fig. 10 Effect on inlet air temperature at $\psi_{\infty} = 80\%$, $U_{\infty} = 0.6 \text{ m/s}$, 120min



(a) $T_{\infty} = 15^{\circ}\text{C}$ (b) $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ (c) $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$

Fig. 11 Effect on inlet air temperature at $\psi_{\infty} = 90\%$, $U_{\infty} = 0.6 \text{ m/s}$, 120min

그림에서 알 수 있듯이 공급공기의 온도가 증가함에 따라 서리생성량도 증가한다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 공급공기의 온도가 증가하게 되면 서리층과 공기 사이의 온도차

증가하여 서리층 표면 근처의 절대습도를 증가시켜 농도 차에 의한 농도 구동력을 감소시킴으로 인하여 서리층의 성장률을 감소시킨다고 알려져 있다.(shaerif et al., 1993) 하지만 용해 및 재 응고 과정이 일어나지 않을 시, 서리층의 성장은 공급공기로부터 서리층으로 흡수되는 동결과정에 더 큰 영향을 받는다고 알려져 있다.(Tao et al., 1994) 따라서 공급공기의 온도가 증가할수록 온도구배에 의한 열유속의 증가로 열 및 물질 전달률이 증가하여 서리생성량도 증가하게 된다.

Fig. 12는 공급공기의 유속이 0.6m/s로 일정할 때, 공급공기 상대습도의 변화에 따른 공급공기온도를 15°C, 20°C 및 25°C로 변화시켰을 때의 서리생성량을 측정된 결과를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 공급공기의 온도가 증가함에 따라 서리생성량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 공급공기의 노점미 빙점 이상일 땐 공기 중의 수증기 입자가 냉각면 표면에 과냉된 액상으로 응축된 후 다시 응결되어 이것이 서리 층이 된다.(Yonko et al., 1976) 하지만 공급공기의 빙점이 냉각면 근처의 수증기하의 노점을 갖는다면, 응축현상 없이 동결현상을 통하여 고체가 된다. 또 분압이 공급공기의 수증기 분압보다 작아 농도 차에 의한 구동력으로 인하여 수증기 입자가 서리층으로 전달되는 물질 전달이 발생하는데 공급공기의 온도가 증가하면 냉각면 표면과의 온도구배가 증가하게 되고 농도구배도 같이 증가하게 되어 결과적으로 물질전달의 구동력을 커지게 한다.(Lee et al., 1999) 따라서 서리층의 성장은 더 촉진되는 것이다.

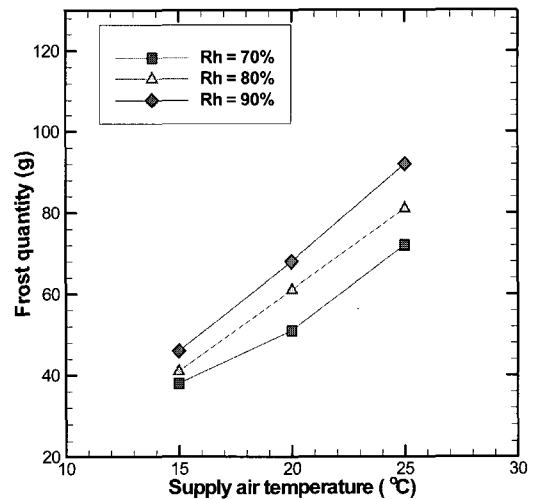


Fig. 12 Effect of supply air temperature on frost quantity

4. 결론

본 연구에서는 공급 공기의 유속, 온도, 및 상대습도에 의한 서리발생량의 변화에 대하여 실험적으로 수행하였으며, 본 실험범위 안에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 공급 공기의 상대습도가 증가할수록 유입공기의 습도 증가함

- 에 따라 유동공기와 서리표면간의 수증기 농도차가 커져 농도 차에 의한 구동력이 증가되어 서리 생성량이 증가 한다.
2. 공급 공기의 유속이 증가할수록 서리 생성량이 증가 한다.
 3. 공급 공기의 온도가 증가할수록 온도구배에 의한 열유속의 증가로 열 및 물질 전달률이 증가하여 서리생성량도 증가 하게 된다.

참 고 문 헌

- [1] Shaerif, S. A., Raju, S. P., Padki, M. M., and Chan, A. B.(1993), "A Semi-empirical Transient Method for Modeling Frost Formation on a Flat Plate", *Rev Int, Froid*, Vol. 16, 5, pp. 321-329.
- [2] 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.28~38.
- [3] Yonko, J. D., Sepsy, C. F.(1976), "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] Lee, Y. B., Ro, S. T., "An experimental study of frost forming on the horizontal cylinder under cross flow", *공기조화 냉동공학 논문집 11호 제 4권* pp. 448-456, 1999.

원고접수일 : 2006년 2월 2일

원고채택일 : 2006년 2월 23일