

냉동공조용 증발기에서 서리의 발생 및 제상 메커니즘에 관한 연구

지재훈[†] · 김창복[‡] · 김명환^{‡‡‡} · 오 철^{‡‡‡}

A study on frost generation and difrosting mechanism on evaporating tubes for Air-conditioning system

Jae-Hoon Jee[†] , Chang-Bok Kim^{‡‡}, Myung-Hwan Kim^{‡‡‡} , Cheol - Oh^{‡‡‡}

Abstract : In this experiment study, to acquire elementary data for explaining to generate frost layer in the fin - tube evaporator. the experiment condition is to supply air on 0.3m/s, 0.6m/s, 0.9m/s and inlet air temperature is kept constantly 20℃, supplied air relative humidity is 70%, 80, 90%. And brine temperature in the copper tube was kept -15℃ because, generally cooling temperature range is constantly -15℃ in the heat exchanger for air conditioning system. in conclusion, through this experiment, we did compare with frost layer and frost quantity in each condition and examine these data

Key words : Evaporator(핀-튜브형 증발기), Frost layer(서리층), Relative humidity (상대습도)

기호설명

T_{∞} : 입구공기온도 [℃]
 T_w : 동관 내 브라인 온도 [℃]
 U_{∞} : 입구공기풍속 [m/s]
 φ_{∞} : 입구공기 상대습도 [%]

1. 서론

인간이 쾌적한 생활을 영위하고자 하는 것은 근본적인 욕구로, 유사 이래 이것을 지향하기 위한 끊임없는 노력이 추구되어 왔으며 경제적 발전과 생활수준의 향상으로 현대사회에서는 보다 쾌적한 생활환경을 요구하고 있다. 따라

서 20세기 후반 생활수준의 전반적인 향상과 더불어 냉장고, 에어컨 등의 냉동 및 공기조화 산업은 급격히 발전되어 왔는데, 그에 따른 공기조화장치는 가정용에서부터 산업용에 이르기 까지 폭넓게 보급되어왔다. 국내의 경우 이러한 공기조화장치의 보급률은 매년 꾸준히 증가하고 있다. 에어컨 판매수량은 IMF사태로 인한 1998년, 1999년을 제외하면 그 수요는 매년 증가할 것으로 예상할 수 있다. 또한 국민소득 수준의 향상에 의한 쾌적성 추구하고 선진국형 고도산업구조로 전환함에 따라 공기조화장치는 인간생활에 없어서는 안 될 중요한 제품 중의 하나로 자리 잡고 있다.

이러한 공기조화장치에 대하여 지금까지 많은 연구가 진행되어져 왔으며, 최근의 냉동 공조산업은 산업의 고도화에 따른 고기능화 및 소형화된 제품개발, 수요자의 여건변화 등에

[†] 한국해양대학교 대학원 기관시스템공학과 (wlwogs@hanmail.net) 051-410-4250

[‡] 한국해양대학교 대학원 기관시스템공학과

^{‡‡‡} 한국해양대학교 기관시스템공학부

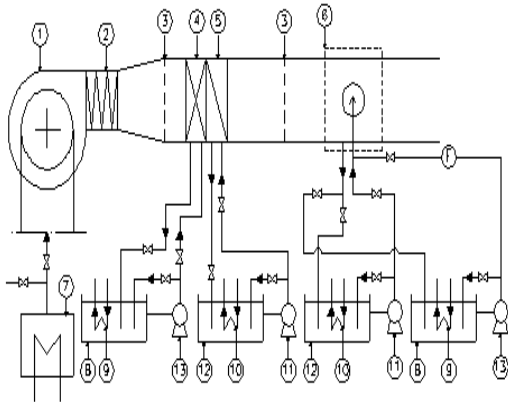
따른 신제품개발 및 수요자의 많은 요구에 따라 신기술개발의 노력이 활발하게 이루어지고 있다. 또한 모든 부분에서 에너지 절약측면에서의 고 효율성이 요구되고 있다.

지금까지 일반적으로 각종산업용이나 대형건물, 가정 및 자동차에서 사용되고 있는 공기조화용 열교환기에 대해서 경제적 및 에너지 절약적인 측면에서 많은 연구가 진행되어왔다. 특히 핀-관 열교환기에 있어서 열 저항의 80 ~ 85%를 차지하는 공기 측 열 저항의 가장 큰 비중을 차지하는 열교환기 표면의 서리성장에 관한 많은 연구가 진행되어왔으나 이러한 문제점을 해결하기에는 연구가 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 동관을 이용하여 서리성장의 메커니즘의 파악을 위하여 실험적으로 연구를 수행하였다.

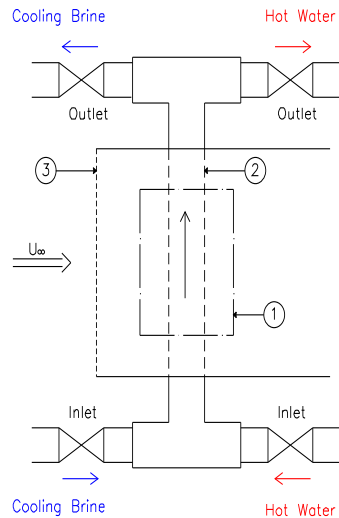
2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 2.1은 실험장치의 전체 계통도이다. 그림에 나타난 바와 같이 실험장치는 개회로 풍동장치로서, 크게 공급공기의 유속을 조절하는 풍량조절부, 공급공기의 온도를 조절하는 공기 가열부 및 냉각부, 공급공기의 습도를 조절하기 위한 가습부, 냉각면의 온도를 조절하기 위한 브라인 순환부, 시험부 및 가시화부로 구성되어 있다. 풍량조절부①은 1.5kw의 3상 유도전동기를 이용한 1750rpm의 원심형 팬을 사용하였으며, 팬 입구의 댐퍼를 조절함으로써 소정의 풍속을 유지하고 조절하였다. 공기가열부④ 및 냉각부⑤는 가로 470mm, 세로400mm, 9단 4열의 핀-튜브 열교환기로 들어가는 온수 및 브라인의 양을 조절하여 공기를 소정의 온도로 유지하였다. 가습부⑦은 2kw의 히터를 내장한 증기가습기로 슬라이드스에서 공급전압을 조절하여 발생 증기량을 조절하였으며, 팬 입구부에 설치하여 공급공기의 습도를 조절하였다.



- ① BLOWER
- ② CANVAS
- ③ SCREEN
- ④ HEAT EXCHANGER(HEATING COIL)
- ⑤ HEAT EXCHANGER(COOLING COIL)
- ⑥ TEST SECTION
- ⑦ HUMIDIFIER
- ⑧ WATER TANK
- ⑨ HEATER
- ⑩ REFRIGERATOR
- ⑪ BRINE PUMP
- ⑫ BRINE TANK
- ⑬ WATER PUMP

Fig. 2.1 Schematic diagram of experimental apparatus



- ① acryl plate
- ② copper tube
- ③ screen

Fig. 2.2 Diagram of test section apparatus

Fig. 2.2는 시험부의 상세도를 나타낸다. 시험부는 길이 450mm, 외경 41.3mm의 동관을 사용하였다. 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, 동관 입출구부에서의 상대습도를 측정하기 위해 습도계(HMP-234)를 부착하였다. 공급공기의 풍속측정을 위해 피토티관(Pitot tube)을 동관 입구부에 설치하여 덕트내의 풍속을 측정하였다.

Fig. 2.3은 실험장치의 전경사진을 나타낸다. 실험조건으로서 공급공기의 유속을 0.3m/s, 0.6m/s 및 0.9m/s로 공급공기는 20℃로 일정하게 공급하였으며, 공급공기의 상대습도는 70%, 80% 및 90%로 하였다. 또한 동관내의 브라인의 온도는 일반적 냉동 공조용 열교환기의 냉각온도범위를 고려해 -15℃로 일정하게 유지하였고 이들 각각의 조건에서 생성되는 서리형상 및 량을 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 공급하는 시간을 실험개시 시간으로 하였다.



Fig. 2.3 Photo of experimental apparatus

Table 2.1 An experimental condition

Condition	Range
φ_{∞} (%)	70-90
T_w (°C)	-15
T_{∞} (°C)	20
U_{∞} (m/s)	0.3-0.9

본 실험에서는 입구공기온도 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 의 오차 범위, 습도는 $\pm 1\%$ 정도의 오차까지 허용하였다. 동관표면에서 생성되는 서리형상을 가시화하기위하여 He-Ne 레이저광을 광원으로 이용하였으며, 상부에서 매 10분당 촬영하였다. 동결량은 정상상태에서 부착된 서리를 녹여서 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 상대습도에 따른 영향

착상 현상을 파악하기 위해서는 서리층의 성장과정을 이해하는 것이 무엇보다도 중요하다. 건공기와 수증기가 혼합되어 있는 2상 상태의 습공기가 노점보다 낮은 온도의 표면에 노출되었을 경우, 습공기는 냉각되면서 온도 구배가 생성되고, 표면에 응축현상이 발생하여 수증기 구배가 생성된다. 본 실험을 통해 동관주위의 서리층을 Fig.3.1과 같이 나타내었을 경우 여기서 동관의 후방(F.A)의 측에서는 표면 온도가 빙점 보다 낮아 응결(freezing)현상이 발생하고 공기의 유동이 동관에 미치는 영향으로 인하여 후방에서의 압력이 삼중점에서의 압력

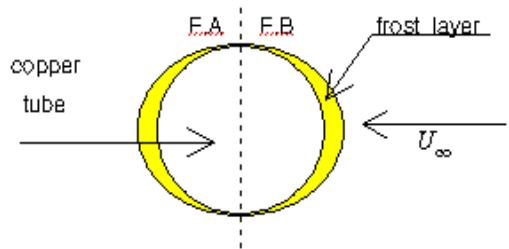
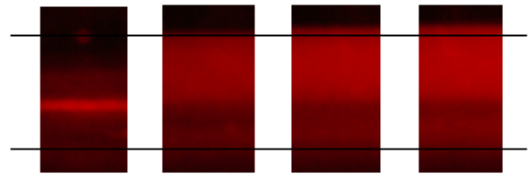


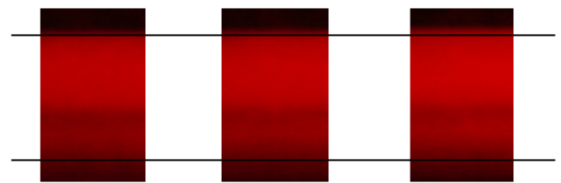
Fig. 3.1 Pattern of frost generation in copper tube

보다 낮아지게 되어 승화현상이 발생한다. 이 응결 또는 승화현상의 결과로 다공성의 서리층이 형성된다. 동관의 전방(F.B)의 측에서는 이 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 다공성의 서리층을 통과하여 결빙되기 전까지 안으로 확산되어 서리층 안의 부분의 밀도를 증가시킨다. 즉, 동관 전방(F.B)에는 밀도가 높고 두께가 작은 서리층이 생성된 반면 관의 후방에는 밀도가 낮고 두께가 큰 서리층이 생성된다. Fig. 3.2, Fig. 3.3 및 Fig. 3.4는 입구공기유속 0.9m/s의 조건에서 입구공기습도를 70%, 80% 및 90%로 변화시켰을 때의 비정상상태를 나타낸다.

Fig. 3.2, Fig. 3.3 및 Fig. 3.4에서 보면 각 조건에서 모두가 실험 시작 후 30분때까지는 서리층의 두께가 초기에 빠른 증가를 보인다. 이러한 현상은 초기에는 물질 전달량이 크기 때문이다.

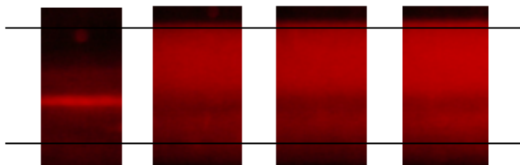


(a)초기 (b)10min (c)20min (d)30min

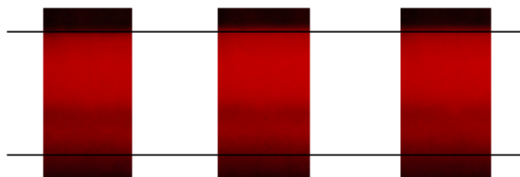


(a)40min (b)50min (c)60min

Fig. 3.3 $\varphi_{\infty}=80\%$

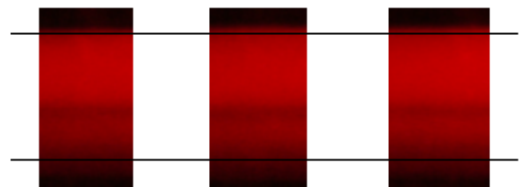


(a)초기 (b)10min (c)20min (d)30min

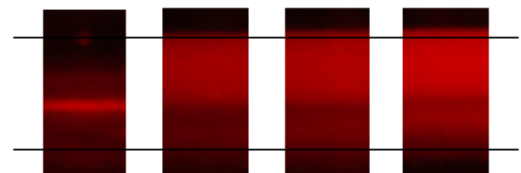


(a)40min (b)50min (c)60min

Fig. 3.2 $\varphi_{\infty}=70\%$



(a)40min (b)50min (c)60min



(a)초기 (b)10min (c)20min (d)30min

Fig. 3.4 $\varphi_{\infty}=90\%$

또한 초기 30분까지는 서리층의 두께가 급속히 증가하지만 40분부터 서리의 증가량이 서서히 감소하는데, 이것은 서리층의 발달에 따른 동관으로부터의 열전달량이 감소하기 때문이다. 또한 정상상태인 60분에서 70%일 때보다 90%일 때의 두께가 더 커지고 밀도가 작아지는 것을 알 수 있다. 이것은 서리 표면 온도에서의 포화 절대습도와 공기의 절대습도간의 차가 증가하여 물질전달 추진력이 커졌기 때문이다.

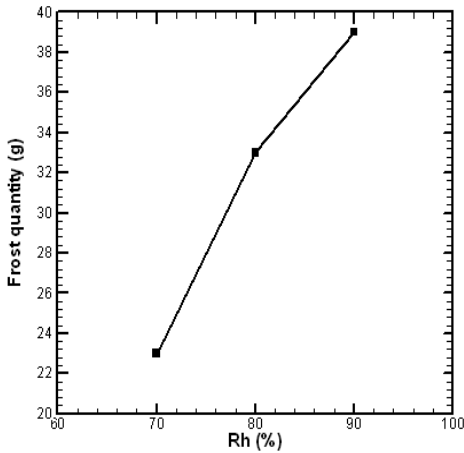


Fig. 3.5 Effect of relative humidity on frost quantity

Fig. 3.5는 풍속이 0.9 m/s로 일정한 상태에서 상대습도를 70%, 80%, 90%로 변화시켰을 때 정상상태에서의 서리량의 측정결과를 나타낸 것이다. 서리량은 실험 시작 후 60분이 경과해 실험을 종료하였을 때 동관 밑에 작은 통을 설치하고 온수탱크에서 온수를 동관에 순환시킴으로써 서리를 용해해서 그 물의 양을 디지털 저울로 측정하였다. 그림에서 알 수 있듯이 상대습도가 증가할수록 서리량이 증가하는 것을 알 수 있으며, 이는 전술한 바와 같이 물질전달량이 증가하기 때문이다.

3.2 공기유속에 따른 영향

Fig. 3.6, Fig. 3.7 및 Fig. 3.8은 각각의 상대습도에 대해서 풍속을 0.3m/s, 0.6m/s 및 0.9m/s로 변화시켰을 때의 풍속에 따른 영향을

나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 풍속이 증가할수록 서리층이 두껍게 나타남을 알 수 있다. 이것은 풍속이 증가할수록 열전달이 활발하게 일어나며 열·물질전달 상사성에 따라 물질전달도 활발하게 일어나기 때문이다.

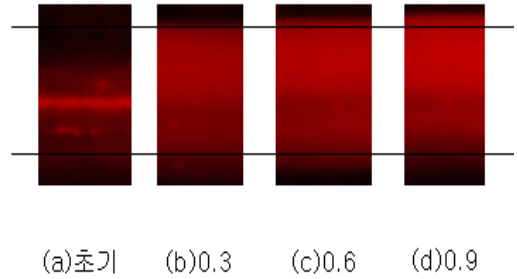


Fig. 3.6 Effect on Air velocity at RH=70%

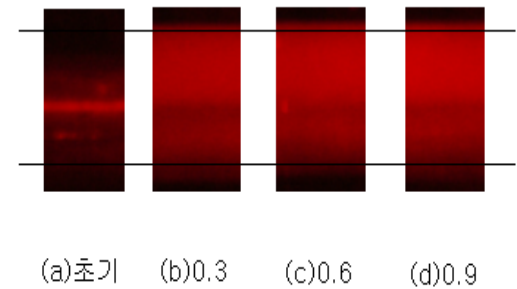


Fig. 3.7 Effect on Air velocity at RH=80%

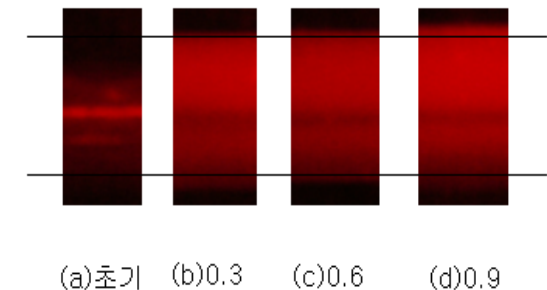


Fig. 3.8 Effect on Air velocity at RH=90%

Fig. 3.9는 상대습도 80%일 때 풍속을 0.3 m/s, 0.6m/s 및 0.9m/s로 변화시켰을 때 정상상태에서의 서리량의 측정결과를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 공기유속이 증가할수록 동관에서 생성되는 서리의 양이 많아지는 것을 알 수 있다. 이것은 전술한 바와 같이 풍속이 증가할수록 열전달이 활발하게 일어나며 열·물질전달 상사성에 따라 물질전달도 활발하게 일어나기 때문이다.

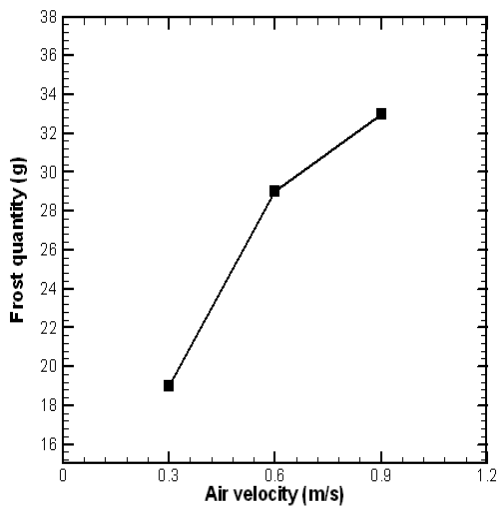


Fig. 3.5 Effect of Air velocity on frost quantity

4. 결 론

본 연구에서는 착상현상에 대해서 실험적으로 검토하여 본 실험범위 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 상대습도가 증가할수록 서리층의 두께가 증가한다.
2. 공기 유속이 증가할수록 서리 두께는 증가하지만 시간의 경과에 따라 증가폭은 서서히 감소한다.
3. 공기 유속이 증가할수록 동관에서 생성되는

서리층의 두께가 증가한다.

참고문헌

- [1] Brian, P.L.T., Reid, R.C., and Shah, Y.T., "Frost Deposition on Cold Surface", *Ind. Eng. Chem, Fund.*, Vol.9, No.3, pp. 129-128. 1970
- [2] Marinyuk, B.T., "Heat and Mass Transfer Under Frosting Conditions", *Int. J. of Refrigeration*, Vol.3, No.6, pp.366-368. 1980
- [3] Tokura, I., Saito, H., and Kishinami, K., Study on Properties and Growth and Rate of Frost Layers on Cold surface, *Journl of Heat Transfer*, Vol. 105, pp.895-901, 1983
- [4] O'neal, D.L, and Tree, D.R., "A Review of Frost Formation in Simple Geometries: ASHRAE Trans. Vol. 91, pp.267-281. 1985
- [5] Rite, R.W., and Crawford, R.R., "The effect of Frost Accumulation on the Performance of Domestic Refrigerator-freezer Finned-tube Evaporator Coil", *ASHRAE Trans*, Vol.,Pt.2, 1991
- [6] 이관수, 이태희, 김우승, "착상조건하에서 평행평판 열교환기의 열 및 물질 전달", *공기조화.냉동공학회 논문집*, 6권 2호, pp.155-165, 1994