

열교환기 설계를 위한 국소 냉각 표면위에서의 습공기 유동의 착상실험

권정태[†] · 임효재 · 박경우 · 김창업* · 김경민** · 권영철***

호서대학교 기계공학과, *호서대학교 전기공학과, **전남대학교 전기공학과, 신문대학교 기계공학과
(2007년 4월 5일 접수, 2007년 12월 28일 채택)

An Experimental Study on Frosting of Humid Air-flow on a Surface with Local Cooling for Heat Exchanger Design

Jeong-Tae Kwon[†], Hyo Jae Lim, Kyoungwoo Park, Chang Eob Kim*,
Kyung-Min Kim** and Young Chul Kwon***

Department of Mechanical Engineering,

**Department of Electrical Engineering, Hoseo University*

***Department of Electrical Engineering, Chonnam University*

****Department of Mechanical Engineering, Sunmoon University*

(Received 5 April 2007, Accepted 28 December 2007)

요 약

본 연구는 착상이 일어나는 조건에서 작은 사각 덕트내의 습공기의 층류유동에서 열 및 물질전달특성을 이해하고자 수행되었다. 알루미늄 평판이 열교환기의 핀부분을 모사하기 위하여 사용되었다. 알루미늄 표면온도는 착상조건에서의 열 및 물질전달 특성을 조사하여 해석하기 위하여 측정되었다. 또한 열교환기 공기측 채널에서 착상에 의한 air-blocking 효과를 확인하기 위해 압력강하가 측정되었다. 그리고 착상조건에서 습공기의 국소 특성을 해석하기 위한 방법이 제시되었다.

주요어 : 착상, 습공기 유동, 열 및 물질전달, 열교환기

Abstract — The present study has been conducted to understand the heat and mass transfer characteristics of humid airflow in frosting conditions. A flat plate of aluminum was used for the simulation of flat surface part of the fin of the heat exchanger. The aluminum surface temperatures were measured and analyzed to clarify the heat and mass transfer characteristics under frosting conditions. Also, the pressure drops were measured to clarify the air-blocking effect of frost in the mini channel of the air-side heat exchangers. A data reduction method was developed for the analysis of local characteristics of humid air under frosting conditions.

Key words : Frosting, Humid airflow, Heat and mass transfer, Heat exchanger

1. 서 론

냉동공조 분야에서 고효율 열교환기 개발을 위한 노력의 일환으로 증발기 및 응축기내에서 관내 2상 유

동 및 열전달특성, 그리고 압력강하특성에 대한 연구는 그동안 국내외적으로 많은 연구가 진척되었다. 또한 이를 열교환기의 성능 향상에 많이 활용되었다. 하지만 서리가 동반되는 열교환기 연구는 미진한 편이다. 특히 겨울철에 가동되는 열펌프의 실외기(증발기) 표면에 발생하는 착상(frosting)현상은 증발기의 열적 성능의 감소를 초래하게 되는 요인으로서 주 연구대상이 되고 있다.

[†]To whom correspondence should be addressed.
Department of Mechanical Engineering, Hoseo University
Tel: 041-540-5803
E-mail: jtkwon@hoseo.edu

착상과 관련한 연구에 대하여 O'Neal과 Tree¹¹⁾는 착상에 관한 연구를 1) 착상의 물성에 관한 연구, 2) 서리 성장 현상에 관한 연구, 3) 열교환기 혹은 단순형상의 표면에서의 실험연구 등 세 가지로 대별하고 있다. 그중 실제 열펌프의 증발기에 적용 가능한 조건에서의 연구, 즉, 작은 사각 덕트내의 습공기의 층류유동의 착상에 관한 연구는 거의 찾아 볼 수 없다고 지적하고 있다. 서리의 물성에 관한 연구^{12)~17)}는 주로 서리의 두께, 밀도 및 열전도도 등에 대한 것으로서 많은 이론 및 실험 결과가 비교적 오차가 큰 범위에 있음을 알 수 있는데 이것은 본질적으로 서리의 구조가 시험 조건에 따라 매우 다양하게 발전되기 때문일 것이다. 서리 성장 현상에 대한 연구는 기존의 포화모델에서 최근에는 과포화모델 등도 제시되면서 이론의 깊이가 더해가고 있으나 좀더 검증 가능한 실험이 부족한 실정이다.^{18)~10)}

Senshu 등¹¹⁾은 착상조건에서 열교환기의 성능감소를 실험적으로 고찰하였다. 그들은 실험결과를 착상속도 예측의 자료로 활용하고 있다. 즉, 착상속도는 시스템의 가동시간에 따라 달라지는 과도적 특성을 보인다는 것이다. Yang과 Lee¹²⁾는 열교환기에서의 착상시험을 통한 결과 등을 종합하여 차가운 표면위에서의 서리의 물성에 대한 상관식을 제시하고 있다.

그러나 대부분의 실험은 열교환기 전체로서의 착상(overall test)이거나, 미시적인 경우에도 매우 단순한 조건 즉 일정 표면온도조건 등에 한정되어 있는 실정이다.

이상과 같은 문헌조사에 의하면 국소적인 온도도분포를 갖는 차가운 표면 위를 지나는 층류 덕트유동의 착상데이터가 거의 없는 실정이다. 이러한 조건은 겨울철 난방모드에서 가동되는 열펌프의 실외기의 착상실험 조건이며 본 논문은 이러한 겨울철 열펌프의 표준 착상조건에서의 층류 습공기 유동의 국소적인 열 및 물질 전달 특성의 실험 및 해석 기법을 다루고 있다.

2. 실험장치 및 실험방법

2-1. 실험장치 및 실험조건

Fig. 1은 실험장치의 개략도이다. 습공기는 항온항습

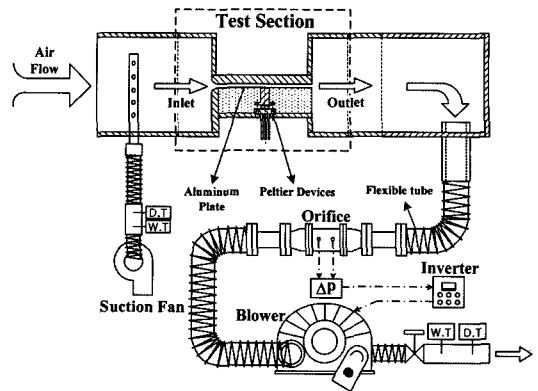


Fig. 1. Schematic of experimental apparatus.

챔버를 이용하여 시험 표준조건으로 설정한 건구 및 습구온도 각 2°C/1°C의 상태로 시험부의 입구로 들어간다. 시험부는 4 mm×100 mm의 사각 덕트로서 아랫면에 알루미늄 평판이 부착되어 있다. 알루미늄평판은 길이 110 mm, 폭 100 mm, 두께 0.4 mm로서 길이방향으로 중앙부근(x=55 mm 지점)에 아홉 개의 열전소자(Peltier device; 각각 4 W의 용량)가 폭방향으로 부착되어 있다. 즉, 열교환기의 튜브와 핀의 부분을 모사하는 방식이다.

알루미늄 평판의 길이방향으로 16개의 K-type 열전대를 부착하여 유동방향에 따른 평판의 온도분포를 측정하도록 하였으며, 냉각모듈의 온도를 측정하기 위하여 K-type 열전대를 별도로 한개 설치하였고, 습공기의 입구와 출구에서는 건구온도와 습구온도를 측정하도록 하였다. 공기측의 압력강하 분포를 조사하기 위하여 길이방향으로 6개의 차압을 측정하도록 구성하였다. Table 1과 Table 2는 측정위치와 시험조건을 나타낸다.

차압측정은 미세차압계(differential pressure manometer: 0.002 mmAq/5 mmAq)와 로터리 밸브를 이용하였다. Fig. 2는 시험부의 상세도와 서리두께의 형상과 위치를 명기한 개략도이다. 서리두께의 측정은 망원 현미경을 이용하였으며 해상도는 1/20 mm이다. 냉각모듈의 조건은 일정 열유속 조건이 되도록 하였다. 즉 냉각소자의 전력을 일정하게 고정하였다.

Table 1. Measuring positions.

T_w	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [mm]	1	8	15	22	29	36	43	46.5	55	60	67	74	81	88	95	102	109
P	1	2	3	4	5	6	7										
x [mm]	-38	5	12.5	25	45	65	142										
δ_f	1	2	3	4	5	6	7										
x [mm]	1	10	30	55	80	100	110										

Table 2. Test conditions.

Test No.	T _{air, in} (°C) DB/WB	V _{air, in} (m/s)	T _{root} (°C)	Peltier power	Time (min)	Measuring value
1	2/1		-9			
2	1/0.5	1.5		0.78 V 22.5 A	30, 60, 120, 180	T P δ _f m
3	2/1.5		-8.5			
4	2/1	1.0	-9.2			
5		2.5	-8.2			

2-2. 실험결과 해석 모델

[가정]

(1) 물리모델은 준 정상상태를 가정하였다. 즉, 서리가 초기성장상태를 지나서 준 정상상태로 볼수 있는 상황에서 수식을 전개하였다.

(2) x-방향으로 1차원 유동을 가정하였으며 유동방향(x방향)으로의 서리 두께의 분포는 고려하되, 폭방향(spanwise)으로의 서리는 균일하다고 가정하였다.

[물리모델 및 수식화]

Fig. 3은 본 실험데이터 해석을 위한 물리 모델이다. 데이터 해석 알고리즘은 다음과 같다.

a) 측정된 알루미늄 평판의 길이방향 표면온도분포를 이용하여 T_w를 x의 함수로 구하고 이를 미분하여 x-방향의 열유속 q_{w,x}를 구한다.

$$q_{w,x} = -k_w \frac{dT_w}{dx} \tag{1}$$

b) 공기층에서 평판쪽으로의 y-방향의 열유속 q_{w,y}를 구한다.

$$q_{w,y} = -tk_w \frac{d^2T_w}{dx^2} \tag{2}$$

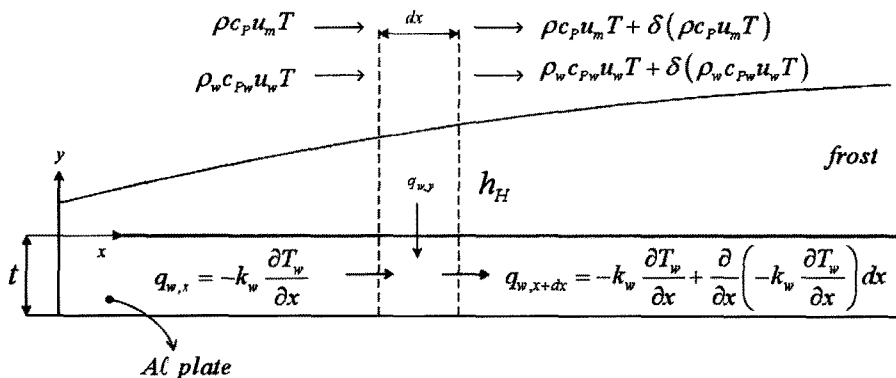


Fig. 3. Physical model for the analysis.

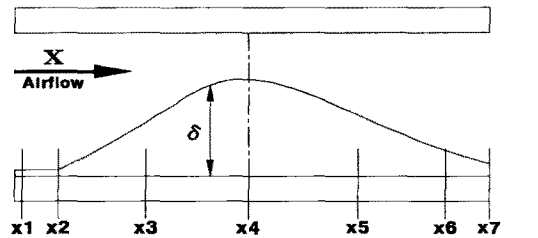
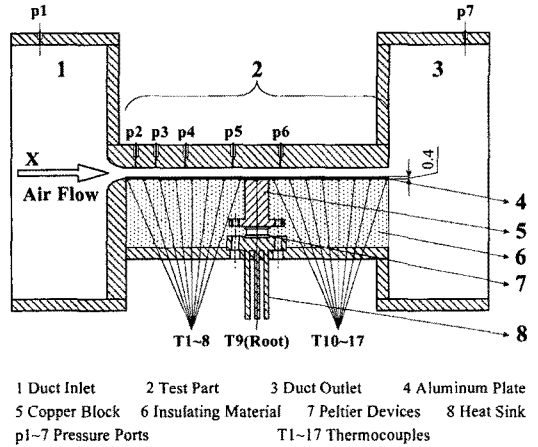


Fig. 2. Schematics of the test section and a typical frost thickness profile.

c) 측정된 서리두께의 데이터로부터 서리두께의 fitting 식 δ_f를 x의 함수로 구하고, 이를 이용하여 다음과 같이 착상질량유속(frosting mass flux)을 구한다.

$$G_w = G_{w,avg} \frac{dV}{V} = \frac{L_z \delta_f dx}{L_z \int_0^{L_x} \delta_f dx} \tag{3}$$

여기서 G_w는 Fig. 3의 물리모델에서 ρ_wu_w에 해당한다.

또한, V 는 서리의 체적을 의미한다. 서리의 밀도는 일정하고 폭방향(z -방향)의 서리두께 분포도 일정하다고 가정한다. 또한 이식에서 $G_{w,avg}$ 는 평균착상 질량유속으로서 실험에서 측정된 착상중량 W_f 를 평판의 표면적과 착상경과시간 $\Delta t = \tau_2 - \tau_1$ 으로 나눈 값으로서 다음과 같다.

$$G_{w,avg} = \frac{W_f|_{t+\Delta t} - W_f|_t}{A \cdot \Delta t} \quad (4)$$

d) 공기층의 대류열전달계수 h_H 는 층류발달유동(laminar developing flow)에 대한 Kays의 상관식을 사용하였다.

$$Nu = \frac{h_H d_h}{k} = 4.36 + \frac{0.036((x/d_h)/Pe)^{-1}}{1 + 0.0011((x/d_h)/Pe)^{-1}} \quad (5)$$

이식에서 d_h 는 수력직경이고 Pe 는 Peclet 수로서 $Pe = Re \cdot Pr$ 이다.

본 상관식은 원관에서 개발된 식으로서, 본 실험대상인 사각면이면서 한면에서만 열교환이 되는 경우에 적용하기 위하여 수력직경은 열수력직경을 사용하였다.

e) 유한차분형식의 공기층 열균형식(heat balance)은 다음과 같다.

$$\frac{\dot{m}_a c_{pa} + \dot{m}_w c_{pw}}{L_z} \frac{T_{b2} - T_{b1}}{\Delta x} = (h_H - G_w c_{pw})(T_b - T_i) \quad (6)$$

여기에서 T_b 는 서리표면온도이고 T_i 는 공기의 온도(air bulk temperature)로서 $T_b = (T_{b1} + T_{b2})/2$ 이다.

f) 서리층의 열균형식은 다음과 같다.

$$q_{w,y} = q_{sens} + q_{lat} \quad (7)$$

또는,

$$q_{w,y} = h_H(T_b - T_i) + L_{SG} G_w \quad (8)$$

여기서 q_{sens} 는 현열 열유속(sensible heat flux)이고 q_{lat} 는 잠열 열유속(latent heat flux)이다. 또한 L_{SG} 는 승화잠열(latent heat of sublimation)이다.

g) 주어진 입구조건 T_{b1} 과 측정된 착상유속 G_w 에 대하여 우선 해석영역을 유동방향으로 16개의 해석영역(section)으로 나눈 후, 첫 번째 section에서 서리표면온도를 T_i 의 값을 변화시켜가면서 (6)식과 (7)식을 동시에 만족하는 T_i 와 T_{b2} 를 구한다. 두 값이 구해지면 다음 section에서 동일한 방법으로 구해서 최종 section까지 구한다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 착상조건에서 알루미늄평판 표면의 유동방향으로의 온도분포를 나타낸다. 시험부입구의 습공기의 온

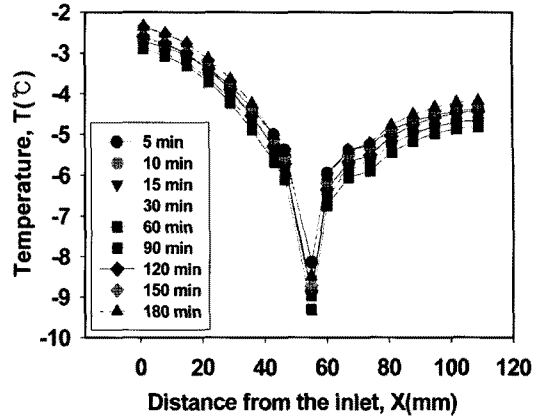


Fig. 4. Temperature distributions in x-direction.

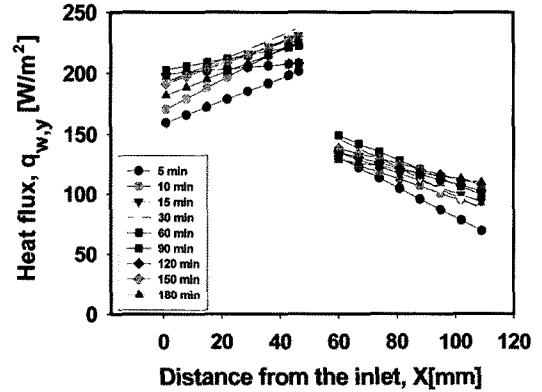


Fig. 5. Heat flux distributions.

도는 진구/습구온도가 $2^\circ\text{C}/1^\circ\text{C}$ 이고, 입구의 공기속도는 1.5 m/s 이다. 평판의 길이방향의 중심에 해당하는 지점에서의 냉각모듈의 온도는 -9°C 근방에서 유지되도록 제어되었다. 평판의 상류에서의 온도는 하류쪽에 비해 온도가 높게 측정되었으며 이것은 상류쪽의 열 및 물질전달이 보다 활발함을 보여준다.

Fig. 5는 y -방향 열유속의 분포를 나타낸다. 우선 상류부와 하류부에서의 열적 특성이 매우 다름을 알 수 있다. 또한 상류부에서의 열유속 값은 평균적으로 하류부의 2배가량이 됨을 보여준다.

Fig. 6은 서리의 분포를 각 운전시간대에서 촬영한 사진으로서 정면에서 찍은 것과 위에서 찍은 모습을 나란히 보여주고 있다. Fig. 7과 Table 3은 각 운전시간대에서의 서리의 두께와 중량의 측정값을 나타낸다. 냉각소자가 위치하고 있는 중앙부근의 서리의 두께가 가장 높고, 상류부는 하류부에 비하여 두께가 두껍게 측정되었

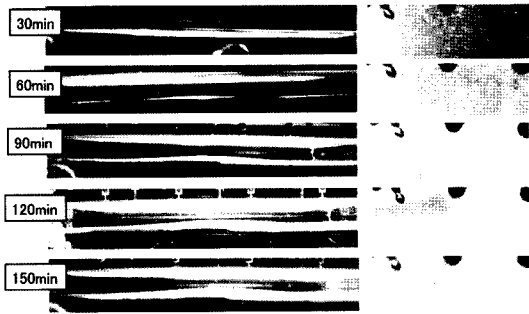


Fig. 6. Photograph of frost distribution (frontal and top views).

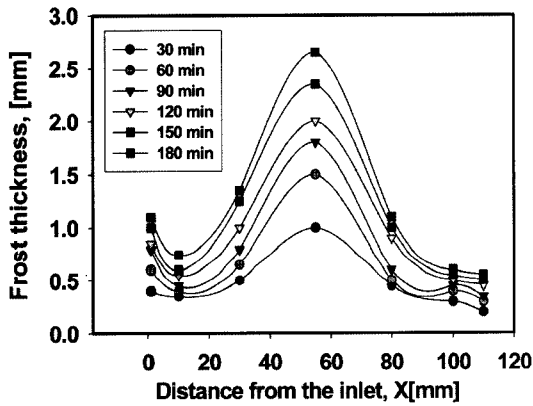


Fig. 7. Frost thickness distribution.

Table 3. Frost thickness and weight data at the specified positions.

Time [min]	Position x [mm]							Weight [g]
	1	10	30	55	80	100	109	
30	0.40	0.35	0.50	1.00	0.45	0.30	0.20	0.42
60	0.60	0.40	0.65	1.50	0.50	0.40	0.30	0.66
120	0.85	0.55	1.00	2.00	0.90	0.50	0.45	1.223
180	1.10	0.75	1.35	2.65	1.10	0.60	0.55	1.707

다. 또한 평판의 가장 앞쪽이 물질전달효과가 현저하게 나타나고 있는 소위 “leading edge effect”를 볼 수 있었다.

Fig. 8은 시험시간 30 min에서 측정된 알루미늄평판의 온도분포와 데이터해석 알고리즘을 적용하여 구한 공기의 온도 및 서리표면온도의 국소분포이다. Fig. 8에서 서리표면의 온도분포는 매우 흥미로운 결과를 보여준다. 상류입구에서 중심부로 가면서 서리표면의 온도는 점점 감소하다가 냉각모듈을 지나면서 급격한 상승을 보인 후 다시 조금씩 하강하는 S자 형태의 특성곡선을 나타내고

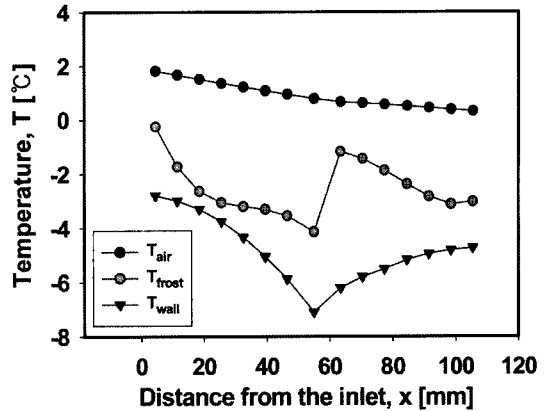


Fig. 8. Local temperature distribution.

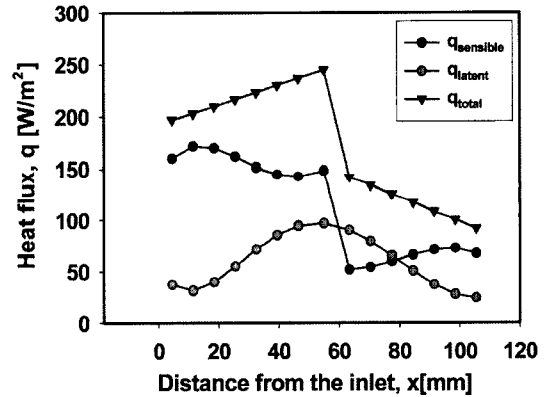


Fig. 9. Local heat flux distribution.

있다. 이러한 온도곡선의 특성은 다른 시험시간대 즉 60 min, 120 min 및 180 min 모두에서 동일하게 나타났다. 이것은 평판표면온도의 온도가 중심부에서 기울기가 역전되는 점과 서리의 두께분포, 즉 중심부에서 산봉우리와 같은 형상을 가짐으로써 중심부를 막 넘어서면서 공기유동의 조건이 매우 많이 달라지는 점에 기인한다고 사료된다.

또한 Fig. 9는 같은 조건에서의 현열 열유속, 잠열 열유속 및 총열유속의 국소분포를 보여준다. 총열유속은 현열 열유속과 잠열 열유속의 합으로 표현된다. 잠열 열유속의 분포는 서리두께의 형상과 매우 유사함을 알 수 있다.

현열 열 유속의 분포형상은 평판의 중앙부에서 심한 변화를 보여준다. 전체적으로 상류부에서는 현열 열 유속이 잠열 열 유속의 2~3배 정도로 큰 값을 보이는 반면 하류부에서는 그 값이 대략 비슷하게 산출되었다.

Fig. 10에는 현열 열 유속, 잠열 열 유속 및 총열유

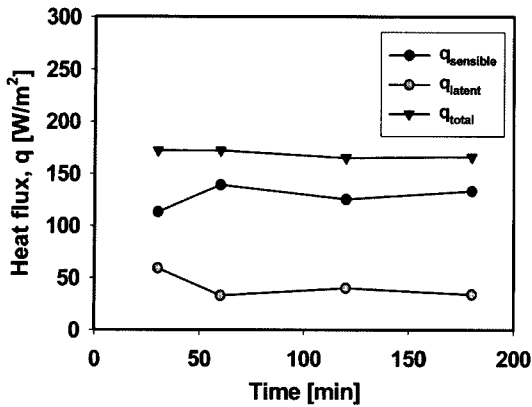


Fig. 10. Average values of sensible, latent and total heat fluxes at standard frosting conditions.

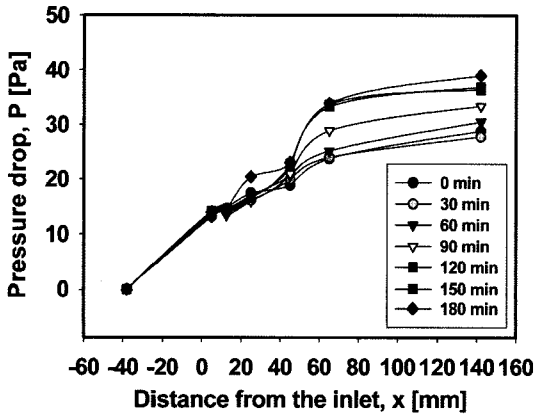


Fig. 11. Pressure drop characteristics of humid air in frosting conditions.

속의 시간에 따른 변화, 즉 과도특성을 나타내었다. 잠열 열 유속은 초기에 큰 값을 보이다가 시간에 따라 조금씩 작아지고 있음을 알 수 있다. 반면에 현열 열 유속은 반대의 경향을 보이고 있다. 이것은 알루미늄평판의 중앙부에서의 냉각모듈의 열 유속이 일정하게 유지하는 조건에서의 실험이기 때문에 총괄 열 유속은 거의 일정한 반면 잠열과 현열 열 유속의 비가 실험조건에 따라 변함을 알 수 있었다.

Fig. 11은 착상조건에서의 공기의 압력강하특성을 나타낸다. 압력강하량은 착상이 없는 초기상태에서 착상이 최대인 180 min에 이르면서 20~30%의 증가를 보였다.

4. 결 론

착상이 일어나는 조건에서 작은 사각 덕트내의 습공

기의 층류유동에서 열 및 물질전달특성 실험을 수행하고 결과를 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 평균적으로 평판 상류에서의 공기측에서 평판쪽으로의 열유속은 하류에서의 두 배정도의 값으로 나타났다.

(2) 잠열 열유속 분포는 서리두께의 분포와 매우 유사한 형태를 보였다.

(3) 현열 열유속의 값은 냉각소자가 존재하는 중앙부분을 지나면서 큰 폭의 변화를 보였다.

(4) 서리두께의 분포는 산봉우리의 모양을 나타내었고, 평판의 전단부에서는 소위 edge effect가 나타났다.

(5) 냉각소자의 전력량을 고정된 본 실험조건은 일정 열유속 조건으로 볼 수 있는데 현열 열유속과 잠열 열유속의 값은 매우 다른 경향을 보였다.

(6) 착상이 시작되기 전의 압력강하량에 비하여 착상 시간 180 min에서의 압력강하량은 대략 20~30% 증가하였다.

후 기

본 연구는 2005년도 호서대학교 학술연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

기호설명

- A : 표면적 [m^2]
- c_p : 정압비열 [kJ/kgK]
- d_h : 수력직경 [m]
- G_w : 착상 질량유속 [kg/m^2s]
- h : 비엔탈피 [kJ/kg]
- h_H : 열전달계수 [W/m^2K]
- k : 열전도계수 [W/mK]
- L : 길이 [m]
- L_{sg} : 승화잠열 [J/kg]
- m : 질량유량 [kg/s]
- P : 압력 [Pa]
- q : 열유속 [W/m^2]
- t : 두께 [m, mm]
- T : 온도 [K]
- T_i : 서리표면 온도 [K]
- T_b : 공기 벌크 온도 [K]
- u_m : 공기의 평균속도 [m/s]
- u_w : 공기의 평균속도 [m/s]
- W_F : 착상중량 [kg]

그리스 문자

- δ_f : 서리두께 [mm]

ρ : 밀도[kg/m³]

τ : 시간[s]

하첨자

a, air: 공기

avg : 평균

b : 벌크

F : 서리

i : 경계

in : 입구

lat : 잠열

root : 알루미늄 판의 중심점 온도

sens : 현열

w : 벽(알루미늄 표면) 또는 수증기(water vapor)

참고문헌

- O'Neal, D.L.; Tree, D.R. A review of frost formation in simple geometries, ASHRAE Trans., 1985, 91, 267.
- Sami, S.M.; Duong, T. Mass and heat transfer during froth growth, ASHRAE Trans., 1989, 95, 158.
- Schneider, H.W. Equation of the growth rate of frost forming on cooled surface, Int. J. Heat Mass Transfer, 1978, 21, 1019.
- Dietenberger, M.A. Generalized correlation of the water frost thermal conductivity, Int. J. Heat Mass Transfer, 1983, 26, 607.
- Sahin, A.Z. Effective thermal conductivity of frosting during the crystal growth period, Int. J. Heat Mass Transfer, 2000, 43, 539.
- Yun, R.; Kim, Y.; Min, M. Modeling of frost growth and frost properties with airflow over a flat plate, Int. J. Refrigeration, 2002, 25, 362.
- Lee, Y.B.; Ro, S.R. An experimental study of frost formation on a horizontal cylinder under cross flow, Int. J. Refrigeration, 2001, 24, 468.
- Na, B.; Webb, R.L. New model for frost growth rate, Int. J. Heat Mass Transfer, 2004, 47, 925.
- Jones, B.W.; Parker, J.D. Frost formation with varying environmental parameters, J. Heat Transfer, 1975, 97, 255.
- Sanders, C.T. The Influence of Frost Formation and Defrosting on the Performance of Air Coolers, Ph.D. thesis, Delft Technical University, 1974.
- Senshu, T.; Yasuda, H.; Oguni, K.; Nishibane, K. Heat pump performance under frosting conditions: part I-heat and mass transfer on cross-finned tube heat exchangers under frosting conditions, ASHRAE Trans., 1990, 96, 324.
- Yang, D.K.; Lee, K.S. Dimensionless correlations of frost properties on a cold plate, Int. J. Refrigeration, 2004, 27, 89.