

차가운 표면위에서의 습공기 유동의 습도 및 속도가 착상분포 특성에 미치는 영향

권정태 · 류근호 · 임효재[†] · 한지원 · 권영철*

호서대학교 기계공학과, *선문대학교 기계공학부
(2005년 3월 14일 접수, 2005년 6월 24일 채택)

Effects of Humidity and Velocity on Frost Distribution Characteristics of Humid Air Flow on Cold Surfaces

Jeong-Tae Kwon, Keun-Ho Rew, Hyo-Jae Lim[†], Ji-Won Han and Young Chul Kwon*

Department of Mechanical Engineering, Hoseo University

*Division of Mechanical Engineering, Sunmoon University

(Received 14 March 2005, Accepted 24 June 2005)

요 약

습공기 유동의 착상조건하에서의 열 및 물질 전달 특성을 이해하기 위해서, 미니 열풍동을 제작하고 열 풍동의 시험부인 사각덕트 아래면에 알루미늄 평판을 설치하고 평판의 중심부에 전기냉각모듈(Peltier device)을 부착하였다. 현미경(해상도 0.05 mm)을 이용하여 습공기 유동 방향으로 알루미늄 평판위의 7개점의 서리 두께를 측정하였으며, 전자저울(해상도 1 mg)을 이용하여 각 운전시간대까지의 발생된 서리의 총괄 질량을 측정하였다. 여러 가지의 실험조건에서 서리두께와 서리질량 그리고 알루미늄 평판상의 온도 분포 등을 구하고, 이로부터 습공기 유동의 습도 및 속도가 서리의 성장 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

주요어 : 서리두께 분포, 서리 질량, 습공기 유동, 열전달

Abstract — In order to understand the heat and mass transfer characteristics of humid airflow in frosting conditions, a flat plate of aluminum with cooling modules located in the central part of the plate was used. A microscope system (resolution of 0.05 mm) was used for the measurement of local thickness of frost at seven points along the plate in the flow direction. For the total mass of frost at each test operation, an electronic balance (resolution of 1 mg) was used. The local frost thickness distributions for various test conditions were presented along with the frost mass data measured at the given operating times. The effect of humidity and velocity of humid air on frosting were analyzed.

Key words : Frost thickness distribution, Frost mass, Humid airflow, Heat transfer

1. 서 론

습공기가 빙점이하의 차가운 표면에 접하게 되면 서리가 발생하게 된다. 이러한 착상현상은 냉장고의 증발기 표면이나, 열펌프의 겨울철 난방 운전시 실외기(증발

기)의 표면에서 자주 관찰된다. 착상이 일어나면 서리두께가 열저항으로 작용할 뿐 아니라 공기 유동의 유로를 좁히는 역할을 하게 되어 이종으로 열교환기의 성능을 저하시키게 된다. 이러한 착상과 관련한 연구에 대하여 O'Neal and Tree는 착상에 관한 기존연구를 정리하면서 실제 열펌프의 증발기에 적용 가능한 조건에서의 연구, 즉, 작은 사각 덕트내의 습공기의 층류유동의 착상에 관한 연구의 중요성을 강조하였다^[1]. Hayashi 등은 서리형성과정을 실험관찰하면서 서리성장 양상이 착상시간에

[†]To whom correspondence should be addressed.
Department of Mechanical Engineering, Hoseo University
Tel: 041-540-5802
E-mail: hjlim@office.hoseo.ac.kr

따라서 결정성장기(the crystal growth period), 서리층성장기(the frost layer growth period), 서리층 완전성장기(the frost layer full growth period)의 세 가지 성장기를 가지며 이때 각 성장기를 특징짓는 서리구조를 가진다고 보고하고 있다^[2]. Sami and Duong은 서리의 열전도도 상관식을 이용한 서리성장모델을 제안했는데, 결정성장기에서는 Brian 등의 열전도도 식을, 서리층 완전성장기에서는 Yonko and Sepsy의 모델을 사용했다^{[3][4]}. Lee 등은 서리성장모델을 제안하면서 그들 실험 데이터를 이용하여 개발한 서리의 유효 열전도도 상관식을 이용하였다^[6]. 여타의 연구들을 살펴보더라도 서리성장모델이나 착상조건 하에서의 열 및 물질전달 모델을 제시하는 경우, 모델계산에 필요한 주요한 서리의 물성의 실험 상관식이 많이 사용되고 있으나 O'Neal and Tree가 지적한 바와 같이 소위 열펌프의 거울철 난방표준조건 근방에서 실험한 데이터로서의 서리의 물성치가 매우 미미한 실정이다^{[7][8]}. 즉, 0°C 근방의 습공기가 열교환기의 핀과 핀 사이와 같은 미세유로를 통과하면서 국소적인 냉각을 받는 상황에서의 실험 데이터가 필요한 것이다. 그러므로, 본 연구의 목적 중 하나는 이러한 조건에서 서리의 두께 분포 및 서리의 질량을 운전시간대에 따라 관찰하고 측정하고 그 결과를 이용하여 착상이 동반되는 상황에서의 열 및 물질전달 특성을 이해하고자 하는 것이다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 실험장치 및 실험조건

Fig. 1은 실험장치의 개략도이다. 습공기는 항온항습 챔버를 이용하여 시험표준조건으로 설정한 건구 및 습구온도 각 2°C/1°C(상대습도 84%)의 상태로 시험부의 입구로 들어간다. 시험부는 4 mm×100 mm의 사각덕트로서 아래면에 알루미늄평판이 부착되어 있다. 알루미늄평판은 길이 110 mm, 폭 100 mm, 두께 0.4 mm로서 길이 방향으로 중앙부근(x=55 mm 지점)에 아홉 개의 열전소자(Peltier device; 각각 4 W의 용량)가 폭 방향으로 부착되어 있다. 즉, 열교환기의 튜브와 핀의 부분을 모사

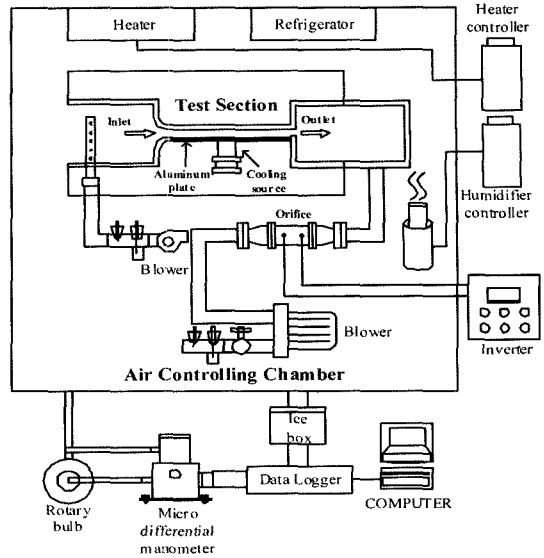


Fig. 1. Schematic of experimental apparatus.

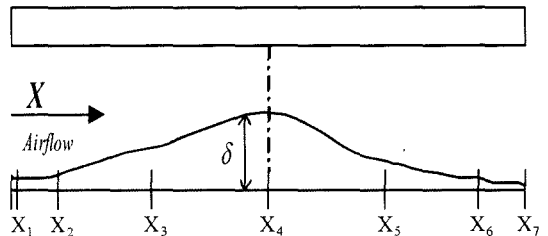


Fig. 2. Schematic of typical frost thickness profile.

하는 방식이다. 알루미늄평판의 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. Fig. 2는 서리두께의 형상과 위치를 명기한 개략도이며, Table 1과 Table 2는 측정위치와 시험조건을 나타낸다.

Table 1. Measuring positions of wall temperature, air pressure and frost thickness.

T _{wall}	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)			-3.8		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 (VA)	Time (min)	Measuring value
1	2/1			-9			
2	2/0.5		1.5	-9		30,	T,
3	2/1.5			-8.5	0.78 V	60,	P,
4			1.0	-9.2	22.5 A	120,	δ _f ,
5	2/1		2.5	-8.2		180	m

여기서, T_{root}는 알루미늄 평판의 중앙하단부에 장착한 냉각모듈의 온도이고 δ_f는 서리의 두께이며 m은 서리의 질량이다. 서리두께의 측정은 망원 현미경을 이용하였으며 해상도는 0.05 mm이다. 냉각모듈의 조건은 각 실험마다 일정 열유속 조건이 되도록 하였다. 즉 냉각 소자의 전력을 일정하게 고정하였다. 서리질량의 측정은 전자저울(해상도 1 mg)을 이용하여 각 시간대 별로 측정하였다. 즉, 시험부는 전체장치로부터 탈착이 가능한 구조로 되어 있어서 각 시간대에서 온도측정, 서리두께 측정을 한 직후 시험부를 분리하여 전자저울에 올려놓고 측정하고, 서리를 제거한 후 다시 측정하여 그 차이값을 서리질량으로 하였다.

2-2. 실험결과 처리 방법

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

a) 측정된 알루미늄 평판의 길이방향 표면온도분포를 이용하여 fitting 식 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 평판쪽에서의 y-방향의 열유속 q_{w,y}를 구한다.

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

c) 측정된 서리두께의 데이터로부터 서리두께의 fitting

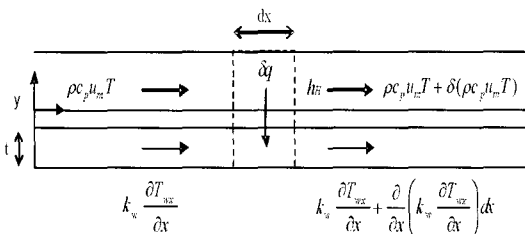


Fig. 3. Physical model for the analysis.

식 δ를 x의 함수로 구하고, 이를 이용하여 다음과 같이 착상유속(frosting mass flux)을 구한다.

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

여기서 서리의 밀도는 일정하고 폭방향(z-방향)의 서리 두께 분포도 일정하다고 가정한다. 또한 이식에서 G_{w,avg}는 평균착상유속으로서 실험에서 측정된 착상중량 W_f를 평판의 표면적과 착상경과시간 Δt로 나눈 값으로서 다음과 같다.

$$G_{w,avg} = \frac{W_{fT+\Delta t} - W_{fT}}{A \times \Delta t} \tag{4}$$

d) 공기층의 대류열전달계수 h_{if}는 층류발달유동(laminar developing flow)에 대한 Kays의 상관식을 사용하였다.

$$Nu = \frac{h_{if} d_h}{k} = 4.36 + \frac{0.036[(x/d_h)/Pe]^{-1}}{1 + 0.0011[0.0011(x/d_h)/Pe]^{-1}} \tag{5}$$

이식에서 d_{if}는 수력직경이고 Pe는 Peclet 수로서 Pe=Re·Pr이다.

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

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

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

f) 서리층의 열균형식은 다음과 같다.

$$q_{w,y} = q_{sens} + q_{lat} \tag{7a}$$

$$q_{w,y} = h_{if}(T_b - T_i) + L_{SG} G_w \tag{7b}$$

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_w에 대하여 우선 해석영역을 유동방향으로 16개의 해석영역

(section)으로 나눈 후, 첫 번째 section에서 서리표면온도를 T_s 의 값을 변화시켜가면서 (6)식과 (7)식을 동시에 만족하는 T_a 와 T_{b2} 를 구한다. 두 값이 구해지면 다음 section에서 동일한 방법으로 구해서 최종 section까지 구한다.

실험을 수행하는 동안 행해졌던 측정의 정확도는 다음과 같다: 벽면온도; $\pm 0.05^\circ\text{C}$, 서리두께; $\pm 0.05\text{ mm}$, 서리질량; 측정값의 1% 미만. 서리의 두께와 질량 측정실험의 재현성은 표준조건에서의 한 실험케이스에 대한 반복실험을 30회 이상 수행하여 확인하였다. 또한, 이러한 측정데이터의 정확도로부터 불확실성해석(uncertainty analysis)^[13]을 수행한 결과 벽면에서의 열유속 $q_{w,y}$ 는 95%의 신뢰구간에서 13~19%의 불확실성(uncertainty)을 갖는 것으로 해석되었다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 서리의 분포 특성

Fig. 4에서 Fig. 8은 각 실험조건에서 측정한 서리의 분포도 이다.

표준조건 즉 입구공기의 건구온도/습구온도가 $2^\circ\text{C}/1^\circ\text{C}$ (상대습도 84%)인 경우의 서리의 분포는 Fig. 4와 같다. 덕트의 높이가 4 mm이고 폭은 100 mm이다. 알루미늄 평판의 길이는 110 mm로서 중앙지점 즉 $x=50\sim 60\text{ mm}$ 지점의 야랫면에 냉각모듈이 장착되어 있다. Fig. 4에 보이는 대로 중앙부근의 서리의 높이는 운전시간 180 min에서 최고 2.65 mm까지 성장하였다. 또한 입구($x=1\text{ mm}$)에서의 서리높이는 바로 뒤에 비하여 높게 관찰 및 측정되어 소위 “edge effect”를 확인할 수 있었다. Fig. 5와 Fig. 6을 통해 입구공기의 습도가 높을 수록 서리의 성장두께가 커짐을 알 수 있었으며, 특히 고습도의 경우(Fig. 6)에는 평판중앙부에서는 서리의 두께가 3 mm

를 초과할 정도로 높게 측정되어서 공기유로의 축소현상을 확인해 볼 수 있었다. 이와는 대조적으로 공기의 속도의 영향은 Fig. 7과 Fig. 8에 나타난 바와 같이 그리 크지 않음을 알 수 있었다.

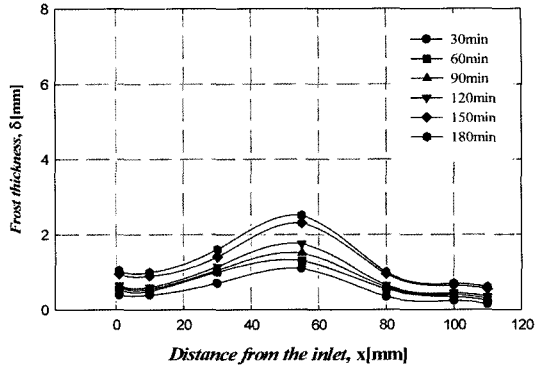


Fig. 5. Frost thickness distributions: low humidity condition ($T_{air,in}=2^\circ\text{C}/0.5^\circ\text{C}$ (DB/WB), $V_{air,in}=1.5\text{ m/s}$).

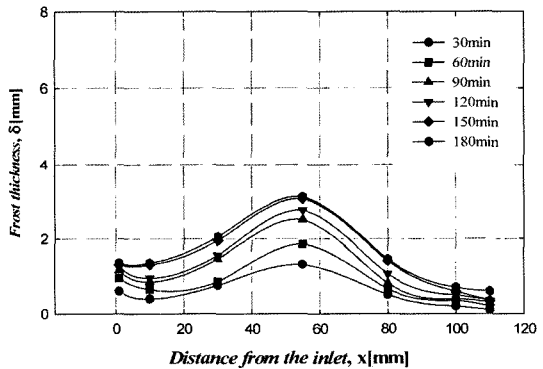


Fig. 6. Frost thickness distributions: high humidity condition ($T_{air,in}=2^\circ\text{C}/1.5^\circ\text{C}$ (DB/WB), $V_{air,in}=1.5\text{ m/s}$).

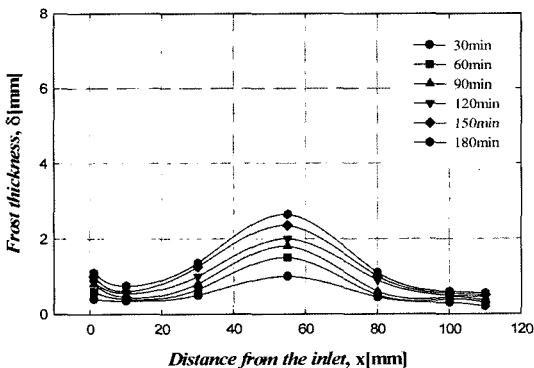


Fig. 4. Frost thickness distributions: standard condition ($T_{air,in}=2^\circ\text{C}/1^\circ\text{C}$ (DB/WB), $V_{air,in}=1.5\text{ m/s}$).

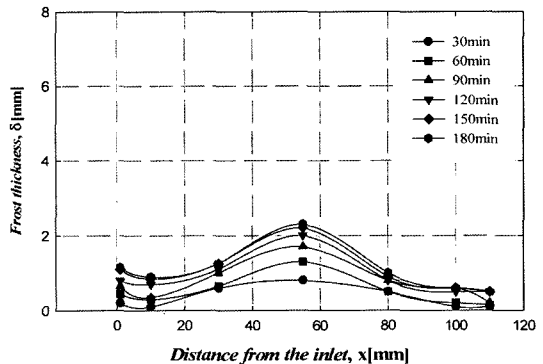


Fig. 7. Frost thickness distributions: low air velocity condition ($T_{air,in}=2^\circ\text{C}/1^\circ\text{C}$ (DB/WB), $V_{air,in}=1.0\text{ m/s}$).

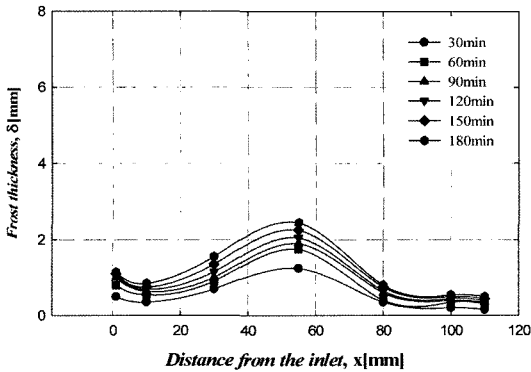


Fig. 8. Frost thickness distributions: high air velocity condition ($T_{air,in}=2^{\circ}C/1^{\circ}C$ (DB/WB), $V_{air,in}=2.5$ m/s).

3-2. 공기 습도가 열유속에 미치는 영향

측정된 서리의 두께와 질량의 데이터 그리고 표면 온도데이터를 이용하여 2.2절에 설명한 데이터 처리기법을 이용하여 각 운전시간대에서의 현열 열유속, 잠열 열유속 및 총괄 열유속을 구하였다.

Fig. 9는 공기습도가 열유속에 미치는 영향을 표현하고 있다.

저습도조건(건구/습구온도; $2^{\circ}C/0.5^{\circ}C$)에서는 운전시간 30 min대에는 측정할 만큼의 착상이 되지 않았으며 60 min에서의 잠열 열유속이 120 min, 180 min으로 가면서 감소되는 경향을 보인다. 또한 잠열 열유속에 비해 현열 열유속의 크기가 대략 5.9배로서 현열 열전달이 지배적인 특성을 보였다. 반면에 고습도 조건(건구/습구온도; $2^{\circ}C/1.5^{\circ}C$)에서는 운전시간 30 min에서의 잠열 열유속이 매우 크게 산출되었으며 그 이후에는 거의 일정한 경향을 보였다. 이 경우 현열 대 잠열 열유속의 비는 1.9로서 표준조건에서의 현열 대 잠열 열유속 비(3.1)를 볼 때 잠열 열유속은 습도에 매우 민감하게 반응함을 알 수 있었다.

3-3. 공기속도가 열유속에 미치는 영향

Fig. 10은 입구공기의 속도가 열유속에 미치는 영향을 나타낸다.

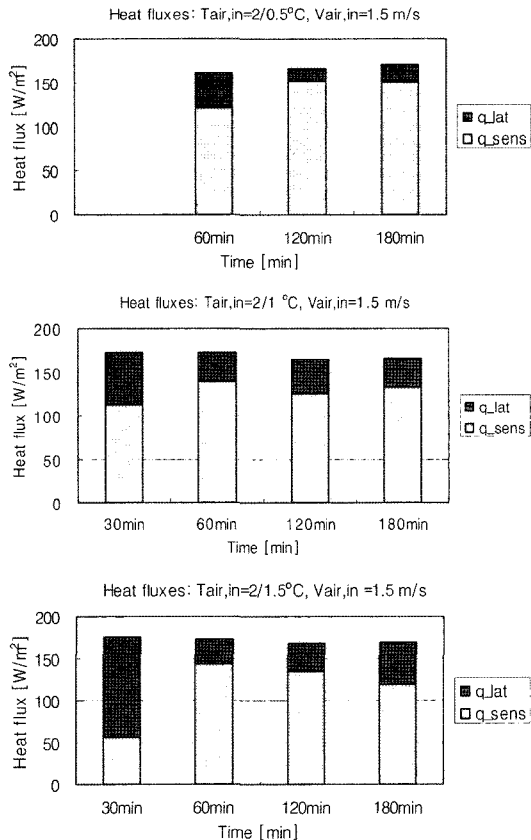


Fig. 9. Effect of humidity on heat flux.

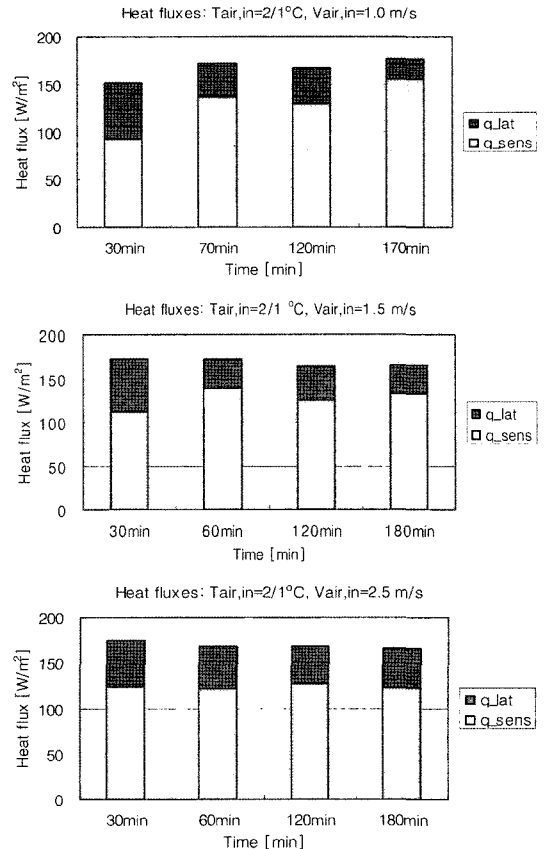


Fig. 10. Effect of air velocity on heat flux.

그림에서 볼 수 있는 바와 같이 속도가 클수록 시간에 따른 열유속의 값들이 변화가 적어짐을 알 수 있으나, 그 차이는 그리 크지 않았다.

4. 결 론

착상이 일어나는 조건에서 작은 사각덕트내의 습공기의 층류유동에서 서리두께분포와 열유속 값이 공기의 습도 및 속도에 따라 어떻게 달라지는지 고찰해 보았으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 서리두께의 분포는 산봉우리 모양으로서 냉각소자가 부착된 중심부에서 피크치를 보였으며 평판의 선단에 edge effect를 볼 수 있었다.

(2) 공기의 습도는 열유속의 분포 즉 잠열 열유속 및 현열 열유속의 비에 매우 큰 영향을 미친 반면에 공기 속도의 영향은 본 실험의 범위 내에서는 비교적 미미하였다.

(3) 잠열 열유속은 대체로 운전시간 초기에, 즉 착상이 일어나는 초기부에 지배적인 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연수지원(과제번호: M01-2003-000-10318-0)의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- O'Neal, D.L.; Tree, D.R. "A review of frost formation in simple geometries", ASHRAE Trans., 1985, 91, 267-281.
- Hayashi, Y.; Aoki, A.; Adachi, S.; Hori, K. "Study of frost properties correlating with frost formation types", J. Heat Transfer, 1977, 99, 239-245.
- Sami, S.M.; Duong, T. "Mass and heat transfer during froth growth", ASHRAE Trans., 1989, 95, 158-165.
- Brian, P.L.T.; Reid, R.C.; Brazinsky, I. "Cryogenic frost properties", Cryogenic Technology, 1969, 5, 205-212.
- Yonko, J.D.; Sepsy, C.F. "An investigation of the thermal conductivity of frost while forming on a flat horizontal plate", ASHRAE Trans., 1967, 73 II.1-II-10.
- Lee, K.S.; Kim, W.S.; Lee, T.H. "A one-dimensional model for frost formation on a cold flat surface", Int. J. Heat Mass Transfer, 1997, 40, 4359-4365.
- Schneider, H.W. "Equation of the growth rate of frost forming on cooled surface", Int. J. Heat Mass Transfer, 1978, 21, 1019-1024.
- Dieterberger, M.A. "Generalized correlation of the water frost thermal conductivity", Int. J. Heat Mass Transfer, 1983, 26, 607-619.
- Sahin, A.Z. "Effective thermal conductivity of frosting during the crystal growth period", Int. J. Heat Mass Transfer, 2000, 43, 539-553.
- Yun, R.; Kim, Y.; Min, M. "Modeling of frost growth and frost properties with airflow over a flat plate", Int. J. Refrigeration, 25, 362-371.
- Lee, Y.B.; Ro, S.R. "An experimental study of frost formation on a horizontal cylinder under cross flow", Int. J. Refrigeration, 2001, 24, 468-474.
- Yang, D.K.; Lee, K.S. "Dimensionless correlations of frost properties on a cold plate", Int. J. Refrigeration, 2004, 27, 89-96.
- Coleman, H.W.; Steele, W.G. Jr. Experimentation and uncertainty analysis for engineers, John Wiley and Sons, 1989.