

열교환기 표면에서의 서리층 성장에 대한 흰 피치와 배열의 영향

양 동근, 이 관수*
 한양대학교 대학원, *한양대학교 기계공학부

Effects of Fin Pitch and Array on the Frost Layer Growth on the Extended Surface of a Heat Exchanger

Dong-Keun Yang, Kwan-Soo Lee*

Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

*School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received April 8, 2003; revision received June 3, 2003)

ABSTRACT: This paper presents the effects of the fin array and pitch on the frost layer growth of a heat exchanger. The numerical results are compared with experimental data of a cold plate to validate the present model, and agree well with experimental data within a maximum error of 8%. The frost behaviors of the staggered fin array are somewhat different from those of in-line array. The frost layer formed on the first fin of the in-line array grows rapidly, compared to second fin, whereas the difference of the frost layer growth between the fins of the staggered array is small. For fin pitch below 10 mm, the frost layer growth of second fin in the staggered array is affected by that of first fin. The thickness of the frost layer and heat transfer of single fin are reduced with decreasing fin pitch regardless of fin array. However, the thermal performance of a heat exchanger is enhanced due to the increase of heat transfer surface area.

Key words: Frost layer growth(서리층 성장), Fin array(흰 배열), Fin pitch(흰 피치), Heat and mass transfer(열 및 물질전달)

기 호 설 명

c_p : 정압비열 [kJ/kgK]	$k_{f,eff}$: 서리층 열전도계수 [W/mK]
D : 확산계수 [m^2/s]	m'' : 물질전달유속 [kg/m^2s]
f_p : 흰 피치 [mm]	m_w : 수증기 질량분율
f_s : 두 흰 사이 간격 [mm]	p : 압력 [Pa]
h_{sv} : 승화잠열 [kJ/kg]	q'' : 열유속 [W/m^2]
k_a : 공기의 열전도계수 [W/mK]	T : 온도 [K]
	t : 시간 [min]
	u : x -방향 속도 [m/s]
	v : y -방향 속도 [m/s]
	w : 절대습도 [kg/kg _a]
	y_f : 서리층 두께 [mm]

† Corresponding author

Tel.: +82-2-2290-0426; fax: +82-2-2295-9021

E-mail address: ksleehy@hanyang.ac.kr

그리스 문자

- a_f : 흡수계수 [s^{-1}]
 μ : 점성계수 [kg/ms]
 ρ : 밀도 [kg/m^3]

하첨자

- a : 공기층
 i, j : 텐서 인덱스
 f : 서리층
 f_s : 서리층 표면
 in : 입구(inlet)
 p : 냉각면
 sat : 포화상태
 w : 수증기
 y : 서리층 두께

1. 서 론

착상조건에서 운전되는 열교환기는 운전시간의 경과에 따라 냉각 표면에 형성되는 서리층으로 인해 공기유량이 감소하고 서리층 표면온도가 상승하여 전열성능이 감소하게 된다. 이처럼 착상현상은 저온용 열교환기의 성능에 가장 지배적인 요소이므로 서리층의 성장과 열 및 물질전달 특성의 예측이 필수적이다.

착상현상에 관련된 기존의 수치적 연구들은 대부분 평판, 원관 등의 기본적인 형상에 대한 연구에 치중되어 왔다. Jones and Parker,⁽¹⁾ Lee et al.⁽²⁾은 평판에 형성되는 서리층 성장 거동 해석을 위해 공기층은 열 및 물질전달에 관한 상관식을 이용하고, 서리층 내부는 확산방정식을 해석하였다. Parish and Sepsy,⁽³⁾ Raju and Sherif⁽⁴⁾는 각각 평판 및 원관 표면에 형성되는 서리층 해석을 위해 공기층은 경계층 방정식을 해석하고

서리층 내부는 서리층 물성치에 대한 기존의 실험상관식을 이용하여 계산하였다. 위의 연구들은 열 및 물질전달과 서리층 물성치에 대한 실험상관식을 사용하여 서리층 성장에 따른 유동장의 변화를 고려하지 못하거나 실험상관식의 사용범위에 따라 모델의 적용성에 한계가 있다.⁽¹⁻⁴⁾ Ismail et al.,⁽⁵⁾ Ismail and Salinas⁽⁶⁾은 서리층을 다공성 물질로 각각 평판과 원관에 대해 해석하였으나, 모델의 유도과정에서 불확실한 계수를 가정하여 사용하므로 계수에 대한 해의 의존성이 크다. 이처럼 기존의 연구들은 열교환기의 형상을 아주 단순화한 평판과 원관에 대해 치중되어 있다.⁽¹⁻⁶⁾ 최근에 Chen et al.⁽⁷⁻⁹⁾은 단단 1열 형태로 이상화한 열교환기의 흰 표면에 형성되는 서리층의 성장 거동을 예측할 수 있는 모델을 제시하였다. 그러나 제시된 모델은 서리층을 다공성 물질로 가정하고 열 및 물질전달에 대한 상관식을 사용하였기 때문에 실험결과와 다소 오차가 있다. 또한, 공기의 유동방향에 따라 흰을 1열로 배열하여 실제 열교환기에서처럼 열 수의 영향을 고려하지 않았다.

일반적으로 흰-관 열교환기에서 관의 전열면적은 약 10% 정도에 불과하며, 흰의 전열면적이 약 90% 이상을 차지하므로 열교환기의 전열성능에 미치는 관의 영향은 상대적으로 적다. 그러므로 열 및 유동해석에서 관의 영향을 무시할 경우 열교환기의 전체 형상을 단순화하면 흰의 정렬 및 엇갈린 배열의 반복적인 형태로 나타낼 수 있다.

따라서 본 연구에서는 열교환기의 흰에 형성되는 서리층의 성장해석을 통해 서리층에서의 열 및 물질전달에 대한 흰 피치와 배열의 영향을 예측하고자 한다.

2. 수학적 모델링

본 연구에서는 흰에 형성되는 서리층 성장해석을 통해 흰 피치, 흰 배열 등이 서리층에서의 열

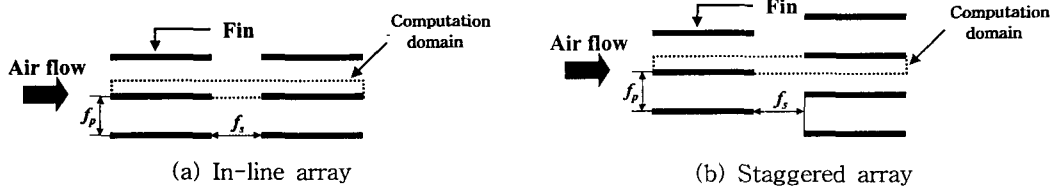


Fig. 1 Schematic diagram for the analysis of frost layer growth on the fins of a heat exchanger.

및 물질전달에 미치는 영향을 파악하고자 한다. 이때 서리층의 성장해석을 위한 계산영역은 Fig. 1과 같고, 서리층의 형성과정은 준정상상태(quasi-steady state)로 가정한다.

2.1 이론해석

서리층으로의 열 및 물질전달량을 계산하기 위해 공기의 열·유동 및 수증기 질량분율을 해석해야 하며, 이때 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho c_p T u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(k_a \frac{\partial T}{\partial x_j}\right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho m_w u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho D \frac{\partial m_w}{\partial x_j}\right) \quad (4)$$

열·유동 및 착상시 일어나는 물리적 현상을 고려하여 경계조건이 결정된다. 이때 입구조건은 운전조건에 따라 결정되며 출구조건은 0구배조건이 주어진다.

입구 :

$$u = u_{in}, \quad v = 0, \quad T = T_{in}, \quad m_w = m_{w,in}$$

출구 :

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial m_w}{\partial n} = 0$$

대칭면 :

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0, \quad v = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial m_w}{\partial n} = 0$$

흰과 서리층 표면에서 수증기는 포화상태에 있으며, 초기의 흰 표면온도는 관의 온도와 동일하다고 가정한다. 또한, 서리층 표면에서는 점착(no-slip)조건이 적용한다.

흰 표면 :

$$T = T_p, \quad m_w = m_{w,sat}(T_p), \quad \frac{\partial m_w}{\partial n} = 0$$

서리층 표면 :

$$u = 0, \quad v = 0, \quad T = T_{fs}, \quad m_w = m_{w,sat}(T_{fs})$$

서리층은 유효 열전도계수($k_{f,eff}$)⁽¹⁰⁾를 가진 물질로 가정되며, 서리층 내부해석을 위해 사용되는 에너지방정식과 수증기 확산방정식은 각각 다음과 같다.^(2,11)

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho c_p T u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(k_{f,eff} \frac{\partial T}{\partial x_j}\right) \quad (5)$$

$$D \frac{d^2 \rho_w}{dy^2} = \alpha_f \rho_w \quad (6)$$

여기서 서리층 유효 열전도계수는 Lee et al.⁽¹⁰⁾이 제안한 다음 식을 이용한다.

$$k_{f,eff} = 0.132 + 3.13 \times 10^{-4} \rho_f + 1.6 \times 10^{-7} \rho_f^2 \quad (7)$$

서리층 표면은 열평형조건을 만족해야 한다. 즉,

$$k_{f,eff} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y_f} = k_a \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y_f} + \rho h_{sv} D \frac{\partial m_w}{\partial y} \Big|_{y_f} \quad (8)$$

공기층에서 서리층 표면으로 전달된 수증기는 서리층 내부로 확산되며, 서리층 두께와 밀도를 각각 증가시킨다. 서리층으로 전달된 물질유속은 각각 다음과 같이 계산된다.

$$m_f'' = \rho D \frac{\partial m_w}{\partial y} \Big|_{y_f} = m_y'' + m_p'' \quad (9)$$

$$m_p'' = \int_{y=0}^{y=y_f} \alpha_f \rho_w dy \quad (10)$$

임의의 계산시간에서 서리층 밀도와 두께는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \rho_f^{t+\Delta t} &= \rho_f^t + \frac{m_p''}{y_f} \Delta t \\ y_f^{t+\Delta t} &= y_f^t + \frac{m_y''}{\rho_f} \Delta t \end{aligned} \quad (11)$$

2.2 수치해석

본 연구에서는 지배방정식을 이산화하기 위해

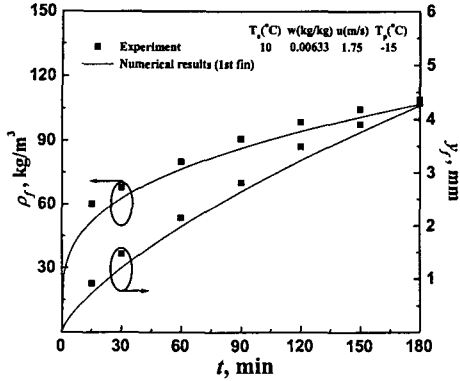


Fig. 2 Comparison of numerical results for in-line array with experimental data on the average density and thickness of the frost layer.

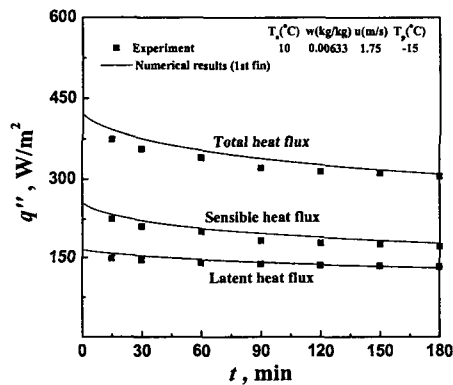
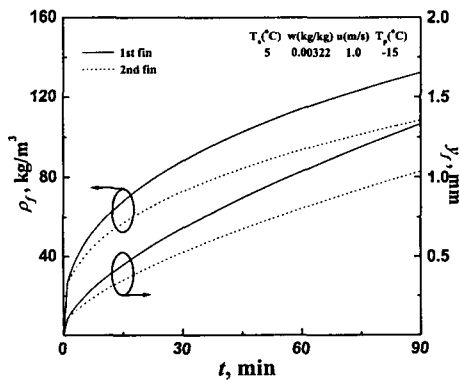
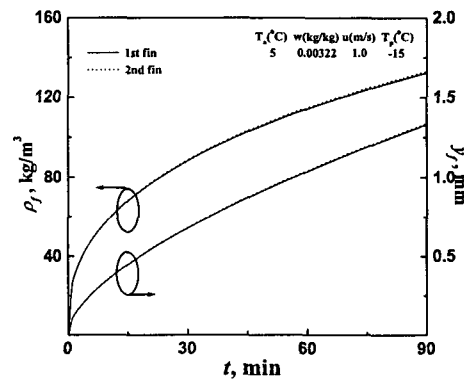


Fig. 3 Comparison of numerical results for in-line array with experimental data on the heat flux.



(a) In-line array



(b) Staggered array

Fig. 4 The average density and thickness of the frost layer with fin array.

유한체적법을 사용하였고 SIMPLER 알고리즘을 이용하여 수치해석을 수행하였다.⁽¹²⁾ 수치해석 결과의 격자와 시간간격의 의존성은 격자의 수와 시간간격을 변화시키면서 조사하였다. 이때 각 격자계와 시간간격에서 서리층 물성치가 2% 이내로 변화하였다. 따라서 흰 표면으로 밀집된 121×31의 격자계와 10초의 시간간격으로 수치해석을 수행하였다. 공기측 해석은 매 반복 계산시에 속도, 온도, 습도의 상대오차가 10⁻⁵ 이하이면 수렴된 것으로 판정하였다. 공기측 해석을 통해 서리층 표면에서 열평형조건이 만족할 때까지 서리 표면 온도를 반복 계산하며, 임의의 시간에서 서리 밀도와 두께를 각각 계산한다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 제시한 수치모델을 검증하기 위해 수평 평판에서의 평균 서리층 두께, 밀도, 열유속에 대한 실험결과⁽¹³⁾와 수평 평판과 흰의 길이 및 피치를 동일하게 확장한 정렬 배열의 첫번째 환에 형성된 서리층에 대한 해석결과를 Fig. 2와 3에 비교하여 제시하였다. 현 수치모델은 평균 서리층 두께와 밀도, 열유속을 실험결과와 비교하여 최대 8%의 오차 이내에서 일치하고 있다.

Table 1 Geometric parameters of fin

Parameter	Value
Fin length	25 mm
Fin pitch	20 mm
Spacing between fin	6 mm

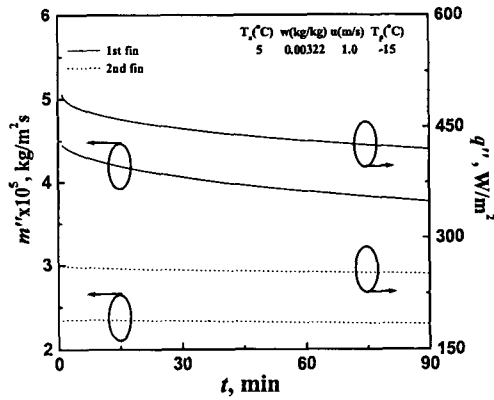
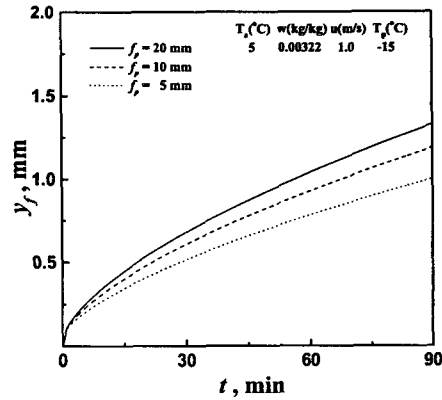


Fig. 5 Temporal variations of the average heat and mass fluxes for In-line array.

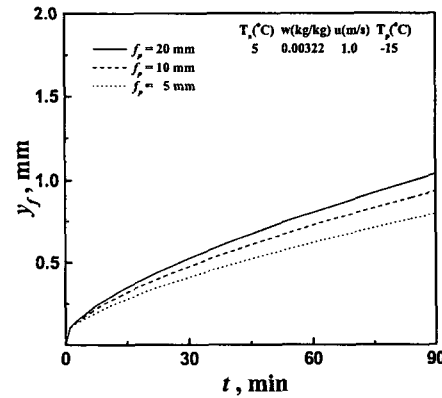
핀의 배열에 따른 착상 거동 특성을 파악하기 위해 핀의 정렬 및 엇갈린 배열에 대해 수치해석을 수행하였으며, 핀의 크기는 Table 1에 나타내었다. Fig. 4는 핀의 정렬 및 엇갈린 배열에서 핀 별로 평균 서리층 두께와 밀도를 도시한 것이다. 정렬 배열에서 첫번째 핀의 서리층 두께와 밀도의 성장은 두번째 핀에 비해 훨씬 빠르다. 이는 상대적으로 고온, 고습의 입구 공기가 첫번째 핀의 냉각면과 접하여 서리층 성장이 촉진되는 것에 비해 두번째 핀에서는 첫번째 핀에서의 열 및 물질전달에 의해 공기의 온·습도가 감소하여 서리층 성장이 둔화되기 때문이다. 이와 달리 엇갈린 배열에서는 첫번째 핀에서의 서리층 형성 과정의 무관한 공기가 두번째 핀과 접하므로 각 핀에 거의 같은 두께와 밀도를 갖는 서리층이 형성된다.

Fig. 5는 운전시간의 경과에 따른 열 및 물질유속의 변화를 도시하였다. 핀 배열에 관계없이 첫번째 핀에서는 서리층이 성장함에 따라 서리층 표면온도의 상승으로 인해 열 및 물질유속이 모두 감소하고 있다. 그러나 정렬 배열의 두번째 핀에서는 상대적으로 열 및 물질유속의 변화가 거의 없다. 이는 두번째 핀의 서리층 성장이 첫번째 핀에 비해 느려 서리층 표면온도의 상승폭이 적고, 서리층이 성장함에 따라 첫번째 핀에서 물질전달이 줄어들어 운전 초기에 비해 두번째 핀에 상대적으로 고온, 고습의 공기가 유입되어 운전시간에 따른 열 및 물질유속의 변화가 거의 없기 때문이다.

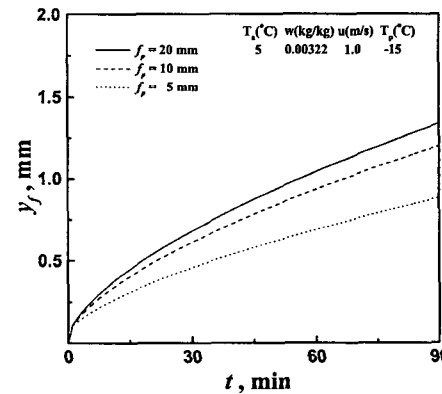
Fig. 6은 핀 피치의 변화에 따른 서리층의 성장



(a) In-line array (at first fin)



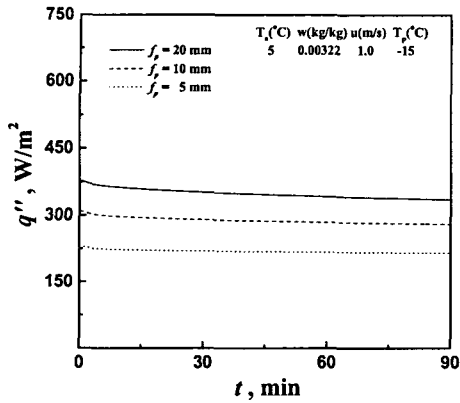
(b) In-line array (at second fin)



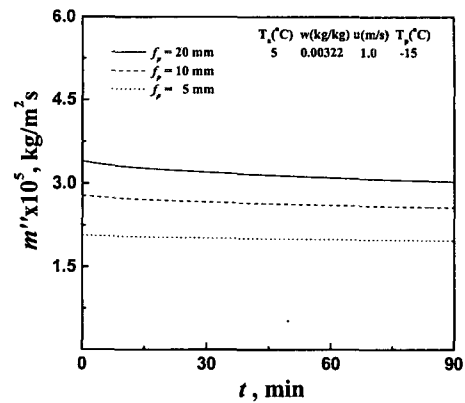
(c) Staggered array (at second fin)

Fig. 6 Effect of fin pitch on the average density and thickness of the frost layer.

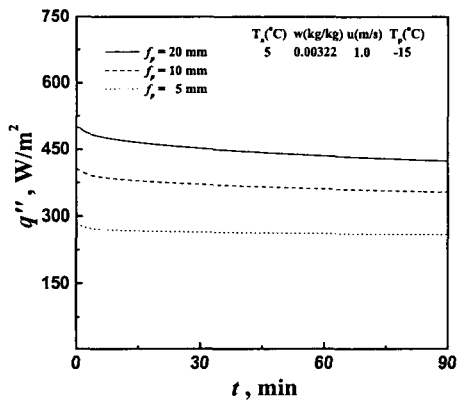
을 핀 별로 도시한 것이다. 핀의 배열 방식에 상관없이 핀 피치가 감소할수록 서리층 두께의 성



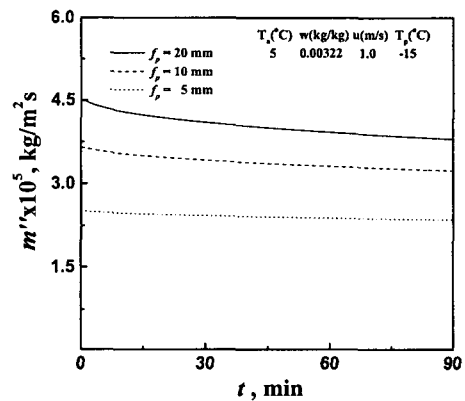
(a) In-line array



(a) In-line array



(b) Staggered array



(b) Staggered array

Fig. 7 Effect of fin pitch on the average heat flux.

Fig. 8 Effect of fin pitch on the average mass flux.

장이 모두 둔화된다. 정렬 배열의 경우는 흰 피치 변화에 따른 흰 별 착상 거동 특성의 변화가 거의 없으나, 엇갈린 배열에서는 흰 피치가 10 mm 이하일 경우, 흰 피치의 변화에 따른 서리층 성장의 둔화가 상대적으로 크다. 이는 흰 피치가 감소할 경우 첫번째 흰에서 서리층의 성장에 따른 열·유동의 변화가 두번째 흰의 서리층 형성에 영향을 미치기 때문이다.

흰 피치의 변화에 따라 각 배열의 전후 두 개의 흰에서 평균 열유속을 Fig. 7에 제시하였다. 흰 피치에 무관하게 엇갈린 배열의 전열능이 정렬 배열에 비해 더 우수하다. 또한, 흰 피치가 감소할수록 단위 흰에서의 평균 열유속은 감소한다. 그러나 흰 피치가 감소할수록 설치할 수 있는 흰의 개수가 증가하여 전열면적은 늘어나므로 전체

열교환기에서 열전달은 증가한다.

Fig. 8은 흰 피치의 변화에 따라 각 배열의 전후 두 개의 흰에서 평균 물질유속을 도시한 것이다. Fig. 4에서 설명한 바와 같이 엇갈린 배열에서 착상량이 상대적으로 더 많으며, 흰 피치가 감소할수록 단위 흰에서의 착상량은 감소한다. 그러나 열유속과 마찬가지로 물질유속도 흰 피치의 감소에 따른 전체 열교환기의 전열면적 증가를 고려하면 실질 물질전달은 증가한다.

4. 결 론

본 연구에서는 흰에서 서리층 성장해석을 통해 흰 피치와 배열이 서리층에서의 열 및 물질전달 특성에 미치는 영향을 제시하였다. 수평 평판에

서의 실험결과와 흰의 길이 및 피치를 수평 평판과 동일하게 확장한 정렬 배열의 첫번째 흰에 대한 해석결과를 비교하여 제시한 수치모델을 검증하였다. 흰 수치모델의 결과는 실험결과와 비교하여 서리층 물성치를 최대 8%의 오차 이내에서 예측하고 있다. 흰의 배열에 따른 수치해석 결과, 정렬 배열에서는 첫번째 흰에 형성되는 서리층의 성장이 두번째 흰에 비해 빠르며, 이와 달리 엇갈린 배열에서는 첫번째 흰에서의 서리층이 두번째 흰에서의 서리층 형성과 무관하므로 두 흰에 거의 같은 두께와 밀도를 갖는 서리층이 형성된다. 흰의 배열에 관계없이 흰 피치가 감소할수록 단위 흰에서의 서리층 성장은 모두 둔화되며, 엇갈린 배열에서는 흰 피치가 10 mm 이하일 경우, 흰 피치의 변화에 따른 서리층 성장의 둔화가 상대적으로 크다. 흰 피치의 변화에 따른 열 및 물질전달의 해석결과, 흰 피치가 줄어들수록 단위 흰에서의 평균 열 및 물질유속은 감소한다. 그러나 흰 피치의 감소로 인한 전체 열교환기의 전열면적 증가를 고려하면 실질적인 열전달과 착상량은 증가한다.

후 기

이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2001-041-E00106).

참고문헌

1. Jones, B. W. and Parker, J. D., 1975, Frost formation with varying environmental parameters, *J. Heat Transfer*, Vol. 97, pp. 255-259.
2. Lee, K. S., Kim, W. S. and Lee, T. H., 1997, A one-dimensional model for frost formation on a cold flat surface, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, No. 18, pp. 4359-4365.
3. Parish, H. C. and Sepsy, C. F., 1972, A numerical analysis of frost formation under forced convection, *ASHRAE Trans.*, No. 2331, pp. 236-251.
4. Raju, S. P. and Sherif, S. A., 1993, Frost formation and heat transfer on circular cylinders in cross-flow, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 16, No. 6, pp. 390-401.
5. Ismail, K. A. R., Salinas, C. S. and Goncalves, M. M., 1997, Frost growth around a cylinder in a wet air stream, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 20, No. 2, pp. 106-119.
6. Ismail, K. A. R. and Salinas, C. S., 1999, Modeling of frost formation over parallel cold plates, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 22, No. 5, pp. 425-441.
7. Chen, H., Thomas, L. and Besant, R. W., 2003, Fan supplied heat exchanger fin performance under frosting conditions, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 26, No. 1, pp. 140-149.
8. Chen, H., Thomas, L. and Besant, R. W., 2000, Modeling frost characteristics on heat exchanger fins: Part I, Numerical model, *ASHRAE Trans.*, Vol. 106, No. 2, No. 4407, pp. 358-367.
9. Chen, H., Thomas, L. and Besant, R. W., 2000, Modeling frost characteristics on heat exchanger fins: Part II, Model validation and limitations, *ASHRAE Trans.*, Vol. 106, No. 2, No. 4408, pp. 368-376.
10. Lee, K. S., Lee, T. H. and Kim, W. S., 1994, Heat and mass transfer of parallel plate heat exchanger under frosting condition, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 6, No. 2, pp. 155-165.
11. Jhee, S., Lee, K. S. and Yeo, M. S., 2002, Prediction of frost layer growth on a cold plate, *Trans. of KSME (B)*, Vol. 26, No. 9, pp. 1325-1331.
12. Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere/McGraw-Hill, Washington, D.C.
13. Kim, S. G., Yang, D. K. and Lee, K. S., 2003, Properties of the frost layer formed on a cold flat surface, *Trans. of KSME (B)*, Vol. 27, No. 3, pp. 374-380.