

흰의 열전도를 고려한 평판 흰에서의 착상 거동

(Behaviors of Frost Formation on a Plate Fin Considering Fin Heat Conduction)

본 연구에서는 착상 조건 하에서 열교환기 흰의 열전도를 고려하여 흰 표면에서의 착상 거동을 예측하기 위하여 수학적 모델을 제시한다. 이 때, 공기측은 착상 현상에 대한 3차원 유동 변화의 영향을 고려한다. 서리층 두께에 대한 해석 결과는 실험 결과를 최대 10% 오차 내에서 잘 예측한다. 유동에 수직인 방향(z -dir.)의 서리층 두께 성장은 흰의 열전도에 의해 흰 바탕 근처에서 활발하고, 흰 끝으로 갈수록 지수함수적으로 둔화된다. 흰의 열전도를 고려한 경우에 비해 흰의 표면온도가 일정한 조건에서 서리층 두께는 최대 2배, 열전달량은 평균 10% 정도 과대 예측한다. 따라서, 열교환기 흰에서의 착상 거동을 정확하게 예측하기 위해 착상 모델 해석 시 흰의 열전도를 고려해야 한다. 흰의 열전도 고려 유무에 따른 착상 거동의 차이를 보완하기 위해 열전달량에 대한 등가온도를 산출하며, 이를 근거로 무차원 등가 온도 상관식을 도출한다.

김 정 수

(주)LG전자 AC사업본부(jskim0708@lge.com)

Nomenclature

c_p	specific heat, J/kgK
D_w	mass diffusivity, m^2/s
Fo	Fourier number, $\alpha_a t_{op}/L_{fin}^2$
H_{fin}	fin height, m
h_h	heat transfer coefficient, W/m^2K
h_m	mass transfer coefficient, kg/m^2s
h_{sv}	latent heat of sublimation, J/kg
k	thermal conductivity, W/mK
k_{eff}	effective thermal conductivity, W/mK
L_{fin}	fin length, m
\dot{m}_w	mass concentration of vapor
\dot{m}_y	mass flux for frost thickness, kg/m^2s
m_p	mass flux for frost density, kg/m^2s
P	pressure, Pa
q_{tot}	total heat flux, W/m^2
Re_L	Reynolds number, $u_a L_{fin}/\nu$
T	temperature, K
T_{eq}	equivalent temperature, K
t_{fin}	fin thickness, m
t_{op}	operating time, min

u	air velocity, m/s
w	absolute humidity, kg/kg_a
y_f	frost thickness, m

Greek symbols

α_f	absorption coefficient, m^2/s
Δ	increment
ν	dynamic viscosity, m^2/s
ρ	density, kg/m^3

Superscripts

*	dimensionless
---	---------------

Subscripts

a	air
b	fin base
f	frost
fs	frost surface
in	inlet
out	outlet
sat	saturation
t	time



Introduction

저온 조건에서 운전되는 열교환기의 흰(Fin) 표면에 수증기가 접하면 다공성 구조의 서리층이 냉각면에 생성된다. 서리층은 운전 시간이 경과함에 따라 열 저항 및 유동 저항을 증가시켜, 열교환기의 열적 성능을 떨어뜨린다. 그러므로 열교환기의 효율을 향상시키기 위해서 열교환기의 흰 표면에 형성되는 착상 거동과 열 및 물질전달 특성을 파악하는 것은 필수적이다.

열교환기 착상과 관련된 연구는 크게 두 부류로 나눌 수 있으며, 하나는 거시적인(macroscopic) 관점이고, 또 하나는 미시적인(microscopic) 관점이다. 거시적인 관점에서는 열교환기의 성능 평가가 주를 이루며, 이와 관련된 연구는 이미 많은 연구자들에 의해 수행되어 왔다^[1-3]. 그러나, 고효율 열교환기 설계를 위하여 미시적인 관점에서 열교환기 흰에서의 국소적인 착상 현상을 예측하는 것이 무엇보다도 중요하다. 기존의 연구자들^[6-12]은 열교환기의 흰을 단순화한 평판에 대해 일정 표면온도(constant surface temperature)로 한정하여 냉각면에서의 착상 거동을 보고하였다. 이는 불균일한 온도분포(non-uniform temperature distribution)를 갖는 실제 열교환기 흰 표면에서의 착상 거동과는 상당한 차이를 가진다. 이와 관련하여, 소수의 연구자들^[13-16]은 흰의 열전도를 고려한 흰에서의 착상 현상에 관한 연구를 최근 수행하였다. Chen 등^[13]은 Tao 등^[12]이 제시한 국소 체적 평균기법(local volume averaging technique)에 근거하여 열교환기 흰의 열전도를 고려한 흰 표면에서의 착상 현상을 해석하였고, Chen 등^[14]의 실험적 데이터와 비교하였다. Tso 등^[15]은 직선 흰을 환형 흰(angular fin)으로 등가하여 흰에 따라 불균일한 서리층 성장을 갖는 흰-관 열교환기의 성능 예측을 위한 해석 모델을 제시하였다. 그러나, 이들의 연구들^[13, 15]은 서리층 성장에 대한 공기 유동 변화의 영향을 고려하지 않았다. Xia and Jacobi^[16]는 열교환기의 흰과 서리층을 복합 매체(composite medium)로 간주하여 매체 내 온도 분포 예측을 위한 해석적 기법을 제시하였다. 그러나, 이 연구는 매체에서의

열전도를 고려하였을 뿐 착상 모델 해석을 통한 서리층 거동 예측과는 무관하다.

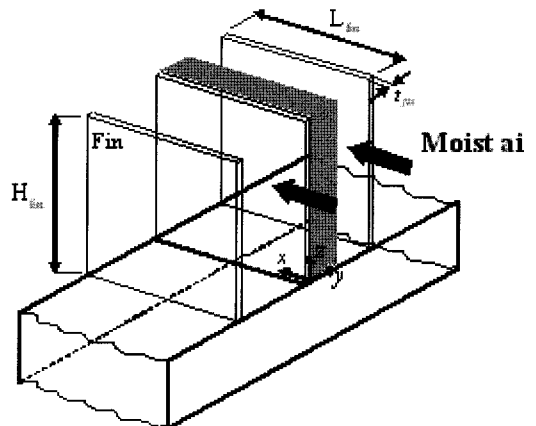
따라서 본 연구에서는 착상 조건하에서 흰의 열전도를 고려하여 흰에서의 착상 현상을 예측하기 위한 수학적 모델을 제시한다. 이 때, 공기측은 착상 현상에 대한 3차원 유동 변화의 영향을 고려하며, 해석 모델의 검증을 위해 착상 실험을 수행한다. 이러한 연구를 통해 불균일한 온도분포를 갖는 흰에서의 착상 현상을 파악하고, 흰의 열전도 고려 유무에 따른 착상 거동을 비교한다.

Theoretical study

Physical model

그림 1은 열교환기의 형상을 나타내며, 흰은 유동 방향에 수직하게 놓여있다. 열교환기 흰의 형상과 유동 특성을 고려할 때, 열교환기 흰에서의 착상 현상은 부분만을 해석하여도 전 영역의 모사가 가능하다. 따라서 본 연구에서는 그림 1에 검게 칠한 부분을 해석 영역으로 설정하며, 이에 적용된 가정은 다음과 같다.

- (1) 공기 유동은 3차원, 비압축성, 층류이다.
- (2) 서리 형성 과정은 준정상상태(quasi-steady state)이다.
- (3) 흰의 열전도계수는 일정하다.
- (4) 흰의 표면온도는 x, z 의 2차원 함수이다.



[그림 1] Configuration of a heat exchanger

Mathematical model

착상 해석 모델은 공기측(airside), 서리층(frost layer) 및 원 모델(fin model)로 나누어지며, 이들은 서로 연관되어 있다.

(a) Airside

원에서의 착상 현상에 대한 3차원 유동장 변화의 영향을 고려하기 위하여 공기의 열·유동 및 수증기의 질량분을 방정식을 해석하였다. 이와 관련된 일반형 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\sigma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_{\phi} \quad (1)$$

여기서 σ_{ϕ} 와 S_{ϕ} 는 표 1에서 보듯이 다양한 종속변수(ϕ)에 대응하는 양이며, 각각 확산계수와 생성항을 의미한다.

그림 2는 식 (1)을 해석하기 위한 경계 조건을 도시한 것이다.

- Inlet and outlet boundaries : 입구 조건은 해석하고자 하는 운전 조건이며, 출구 조건은 유동 방향으로 0구배 조건(zero gradient condition)이 주어진다.

Inlet : $u=u_{in}, v=0, w=0, T=T_{in}, mw=m_{w,in}$ (2)

Outlet : $\frac{\partial u}{\partial x}=0, \frac{\partial v}{\partial x}=0, \frac{\partial w}{\partial x}=0, \frac{\partial T}{\partial x}=0, \frac{\partial mw}{\partial x}=0$ (3)

<표 1> ϕ, σ_{ϕ} and S_{ϕ} for Eq.(1)

Equation	ϕ	σ_{ϕ}	S_{ϕ}
Continuity	1	-	0
u-momentum	u	μ	$-\frac{\partial P}{\partial x}$
v-momentum	v	μ	$-\frac{\partial P}{\partial y}$
w-momentum	w	μ	$-\frac{\partial P}{\partial z}$
Energy	T	k_a / c_p	0
Mass concentration	mw	ρD_w	0

- Symmetry boundaries : 열교환기 원의 배열 및 유동 특성을 고려할 때, 다음의 평면에서는 대칭 조건이 주어진다.

Front plane, $y=0$:

$$\frac{\partial u}{\partial y}=0, \frac{\partial v}{\partial y}=0, \frac{\partial w}{\partial y}=0, \frac{\partial T}{\partial y}=0, \frac{\partial m_w}{\partial y}=0 \quad (4)$$

Rear plane, $y=W$:

$$\frac{\partial u}{\partial y}=0, \frac{\partial v}{\partial y}=0, \frac{\partial w}{\partial y}=0, \frac{\partial T}{\partial y}=0, \frac{\partial m_w}{\partial y}=0 \quad (5)$$

- Wall and interface boundaries : 벽면, 냉각면 및 공기-서리층 경계면에서는 점착 조건(no slip condition)이 적용된다. 벽면은 외부와 단열되어 있다. $y=0$ 와 $z=0$ 에서 유동 방향에 따른 원의 바탕온도(T_b)는 일정하게 유지되며, 냉각면 및 경계면에서의 수증기는 포화상태에 있다고 간주한다.

Bottom plane, $z=0$:

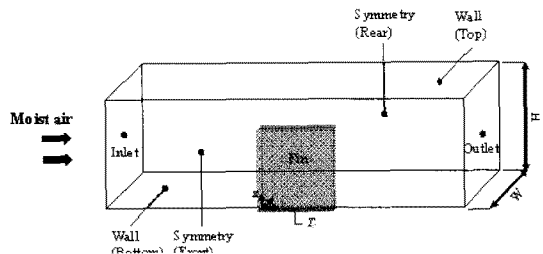
$$u=0, v=0, w=0, \frac{\partial T}{\partial z}=0, \frac{\partial m_w}{\partial z}=0 \quad (6)$$

Top plane, $z=H$:

$$u=0, v=0, w=0, \frac{\partial T}{\partial z}=0, \frac{\partial m_w}{\partial z}=0 \quad (7)$$

Cold plate (fin) :

$$u=0, v=0, w=0, T_{fin}(x, y=0, z=0)=T_b, m_w=m_{w, sat}(T_{fin}) \quad (8)$$



[그림 2] Boundary conditions



Air-frost interface, $y = y_f$:

$$u=0, v=0, w=0, T=T_{fs}, m_w=m_{w, sat}(T_{fs}) \quad (9)$$

(b) Frost layer

서리층 내 지배방정식은 서리 성장 예측을 위한 열 및 물질전달 방정식으로 구성된다. 수증기 확산 방정식과 열전달 방정식은 다음과 같다^[8].

$$D_w \frac{\partial^2 \rho_w}{\partial y^2} = \alpha_f \rho_w \quad (10)$$

$$k_{eff} \frac{\partial^2 T_f}{\partial y^2} = -\alpha_f \rho_w h_{sv} \quad (11)$$

여기서 D_w 는 수증기의 확산계수를, α_f 는 흡수계수를 의미하며, 서리층 유효 열전도계수(k_{eff})는 Lee 등^[8]이 제안한 서리층 밀도만의 함수이다.

열전달(q_{tot})은 공기층에서 서리층으로 현열(q_{sen})과 잠열(q_{lat}) 전달의 합이다.

$$q_{tot} = q_{set} + q_{lat} = h_h(T_a - T_{fs}) + h(w_a - w_{fs})h_{sv} \quad (12)$$

습공기로부터 서리층 표면으로 흡수되는 수증기는 서리층 내부로 확산되며, 서리층 두께와 서리층 밀도를 증가시킨다.

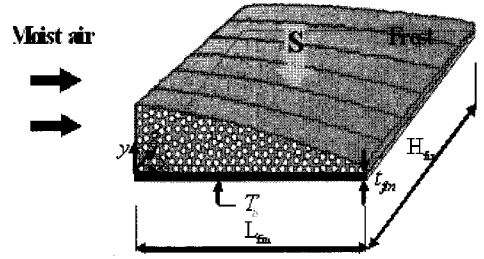
$$\dot{m}_f = \rho_a D_w \left. \frac{\partial m_w}{\partial y} \right|_{y_f} = \dot{m}_y + \dot{m}_p \quad (13)$$

임의의 시간에서 서리층 두께와 밀도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$y_f|_{t+\Delta t} = y_f|_t + \frac{\dot{m}_y}{\rho_f} \Delta t, \quad \rho_f|_{t+\Delta t} = \rho_f|_t + \frac{\dot{m}_p}{y_f} \Delta t \quad (14)$$

(c) Fin model

그림 3는 2차원 흰 표면에서의 열전도 모델 개략도를 나타내며, 흰 표면에서의 열전도 메커니즘은 서리층 모델과 서로 연관되어 있다. 즉, 흰의 열전도 방정식을 해석하기 위해 흰에서의 착상 현상



[그림 3] Schematic diagram of fin heat conduction model

을 고려하여야 한다.

$$k_{fin} \left(\frac{\partial^2 T_{fin}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{fin}}{\partial z^2} \right) + S = 0, \quad S = \frac{2}{t_{fin}} k_{eff} \left. \frac{\partial T_f}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (15)$$

여기서 S는 서리층으로부터 흰으로 전달되는 열량이며, 계수 2는 흰 양면에서의 서리 성장을 의미한다. 식 (15)를 해석하기 위한 경계 조건은 다음과 같다.

$$T_{fin}(x, y = 0, z = 0) = T_b \quad (16)$$

$$\frac{\partial T_{fin}}{\partial z}(x, y = 0, z = H_{fin}) = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial T_{fin}}{\partial x}(x = 0, y = 0, z) = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial T_{fin}}{\partial x}(x = L_{fin}, y = 0, z) = 0 \quad (19)$$

Numerical analysis

본 연구는 CFD를 이용하여 수치해석을 수행하였으며, 해의 정확도를 위하여 불균일(non-uniform), 엇갈린(staggered) 격자계를 적용하였다. 또한, 서리 생성으로 인한 이동 계면(moving boundary) 문제를 해결하기 위하여 시간 간격(Δt)과 격자수를 일정하게 유지하는 반면, 서리 생성 방향의 격자 간격을 매 시간 단계마다 조절하는 가변격자법(variable-grid methods)를 이용하였다^[7].

Experiment

본 연구에서는 열교환기 흰의 열전도를 고려한 흰에서의 해석 모델을 검증하기 위하여 착상 실험을 수행하였으며, 운전 조건은 $7 \leq T_a \leq 10^\circ\text{C}$, $1.0 \leq u_a \leq 1.5 \text{ m/s}$, $0.00371 \leq w_a \leq 0.00569 \text{ kg/kg}_a$ 및 $-20 \leq T_b \leq -25^\circ\text{C}$ 이다.

실험 장치는 크게 항온항습기, 시험부, 냉각부 및 순환부로 구성된다⁹⁾. 흰의 표면온도 및 서리층 두께는 $x = 30 \text{ mm}$ 위치에서 흰의 바탕으로부터 17.5, 35 및 52.5 mm 만큼 떨어진 위치(유동 수직 방향)와 $z = 35 \text{ mm}$ 위치에서 흰의 선단으로부터 15, 30 및 45 mm의 위치(유동 방향)에서 측정하였다. 흰의 표면온도는 흰에 T-type 열전대를 부착하여 측정하였고, 서리층 두께는 마이크로미터 게이지를 이용하여 측정하였다¹⁸⁾. 흰의 바탕으로, 흰의 표면온도 및 서리층 두께의 불확실도는 각각 0.34°C , 0.31°C 및 0.04 mm 이다¹⁹⁾.

Results and discussion

그림 4 a)는 $x = 30 \text{ mm}$ 위치에서 유동 수직 방향 (z -dir.)의 흰의 온도분포에 대한 실험 및 해석 결과를 비교한 것이다. 흰의 온도분포는 흰의 열전

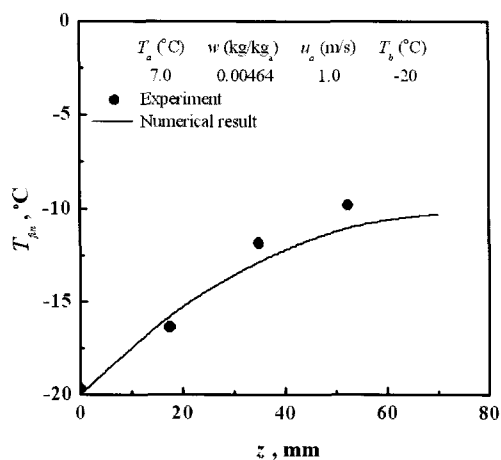
도에 의해 로그함수적으로 증가하며, 흰의 온도분포에 대한 수치해석 결과는 실험 결과를 잘 예측하고 있다. 그림 4 b)은 $x = 30 \text{ mm}$ 위치에서 유동에 수직인 방향의 서리층 두께에 대한 실험 및 해석 결과를 비교한 것이다. 서리층 두께에 대한 수치해석 결과는 실험 결과를 최대 10%의 오차 내에서 일치한다.

Frost behavior

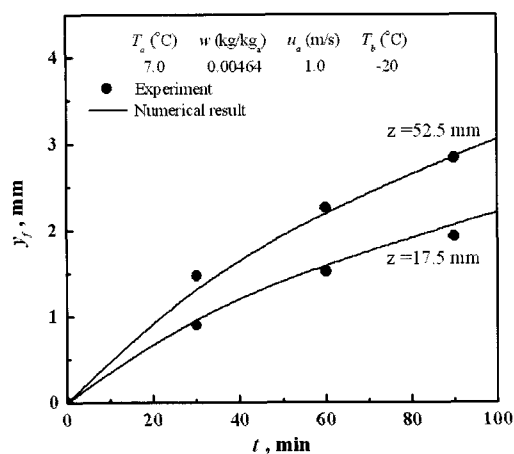
본 연구에서 사용된 형상 인자 및 운전 조건은 표 2와 같고, 열교환기 흰의 온도분포는 서리층 성장

<표 1> ϕ , σ_ϕ and S_ϕ for Eq.(1)

Parameter	Value
Fin length, L_{fin} [mm]	60
Fin height, H_{fin} [mm]	70
Fin thickness, t_{fin} [mm]	1
Fin thermal conductivity, k_{fin} [W/mK]	220
Inlet air temperature [$^\circ\text{C}$]	7.0
Fin base temperature [$^\circ\text{C}$]	-20
Air humidity ratio [kg/kg _a]	0.00495
Air velocity [m/s]	2.0
Operating time [min]	90



a) fin temperature distribution



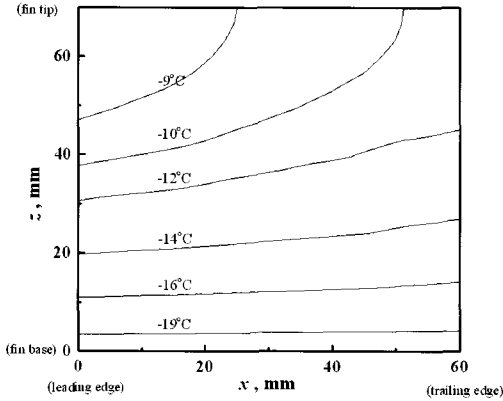
b) frost thickness

[그림 4] Comparison of numerical results and experimental data at $x=30 \text{ mm}$ and $t=90 \text{ min}$.



및 열 및 물질전달 특성과 밀접하게 연관되어 있다. 그림 5은 2차원 흰 표면에서의 등온선을 나타낸 것이며, 흰의 불균일한 온도분포를 보여준다.

그림 6 a)은 주어진 조건에 대한 흰 표면에서의 서리층 두께 성장을 도시한 것이다. 유동에 수직인 방향(z-dir.)의 서리층 두께 성장은 흰 바탕 근처에서 활발하고, 흰 끝(z = 70 mm)으로 갈수록 지수



[그림 5] Temperature contours on two-dimensional fin surface at $t = 90$ min.

함수적으로 둔화되며, 이는 흰의 온도분포와 동일한 경향성을 보인다. 유동 방향(x-dir.)의 서리층 성장은 소위 선단 효과(leading edge effect)의 영향으로 흰 선단에서 활발하며 흰 후단으로 갈수록 다소 감소하지만, 그 감소 폭은 유동에 수직인 방향의 감소폭에 비해 작다.

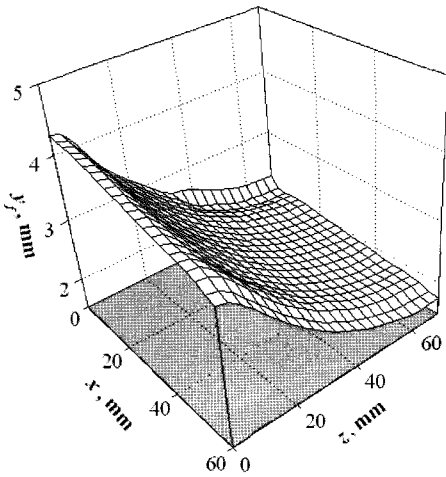
그림 6 b)은 주어진 조건에 대한 흰 표면에서의 열유속을 나타낸 것이다. 흰에서의 열전달은 흰 끝(z = 70 mm)과 흰 후단(x = 60 mm)으로 갈수록 감소한다. 특히, 유동 방향(x-dir.)의 열전달 감소폭은 유동에 수직인 방향(z-dir.)의 열전달 감소폭에 비해 크다. 이는 유동이 진행됨에 따라 습공기의 온·습도가 낮아져 습공기와 서리층에서의 총열전달(현열 및 잠열 전달)을 감소시키기 때문이다.

The effects of fin heat conduction

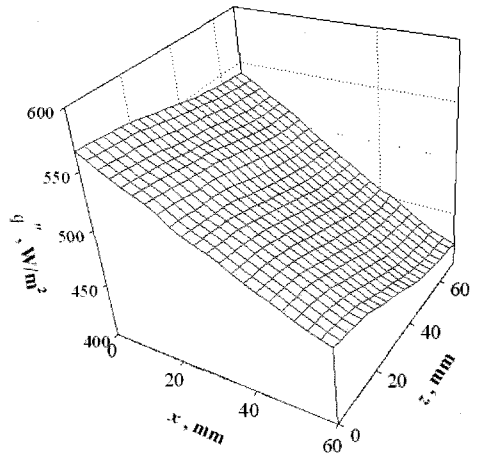
유동 방향 흰의 온도구배가 작으므로 본 연구에서는 유동 방향 $x = 30$ mm 위치에서 유동에 수직인 방향(z-dir.)에 대한 착상 거동을 파악한다. 이 때, 흰의 열전도를 고려한 경우와 흰의 표면온도가 일정한 조건을 비교한다. 그림 7은 $x = 30$ mm 위치에서 흰의 열전도 고려 유무에 따른 유동에 수직인

T_a (°C)	w (kg/kg)	u_a (m/s)	T_b (°C)
7.0	0.00495	2.0	-20

T_a (°C)	w (kg/kg)	u_a (m/s)	T_b (°C)
7.0	0.00495	2.0	-20

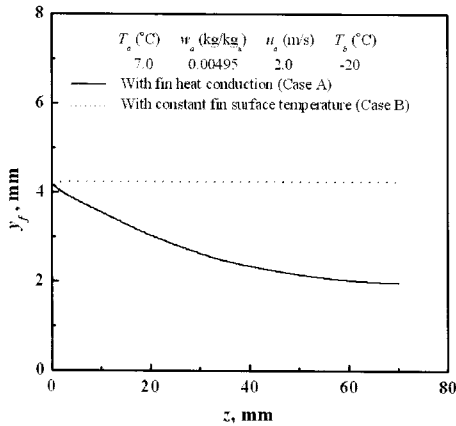


a) frost thickness

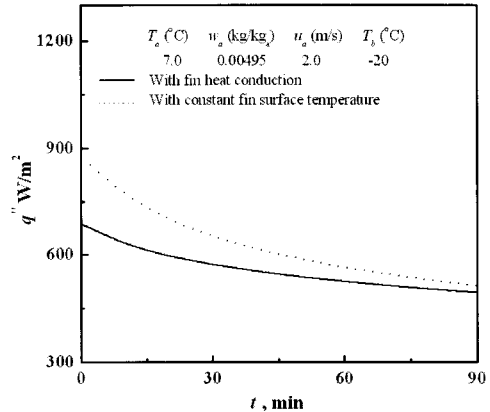


b) heat flux

[그림 6] Mapped surface for frost thickness and heat flux on a 2D fin at $t = 90$ min.



[그림 7] Comparison of frost thickness with and without fin heat conduction at $x=30$ mm and $t=90$ min.

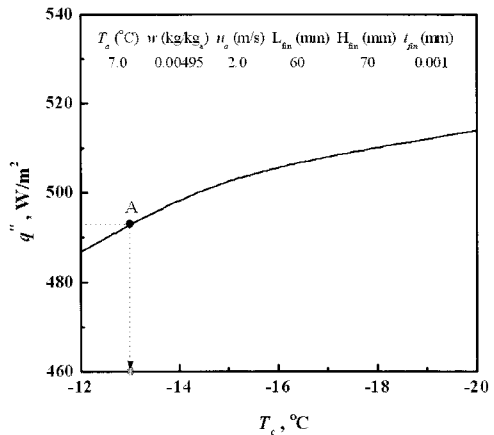


[그림 8] Comparisons of transient heat flux with and without fin heat conduction at $x=30$ mm and $z=35$ mm.

방향으로의 서리층 두께를 비교한 것이다. 흰의 열전도를 고려한 경우, 흰 끝으로 갈수록 서리층 두께 성장은 흰의 열전도에 의해 지수함수적으로 감소한다. 이에 반해, 흰의 표면온도가 일정한 경우 서리층 두께는 $x = 30$ mm 위치에서 유입되는 습공기의 상대량이 유사하여 거의 일정하다. 이로 인해, 흰의 열전도를 고려한 경우에 비해 흰의 표면온도가 일정한 조건에서의 서리층 두께는 최대 약 2배 과대 예측하였다. 그림 8은 특정 위치에서 흰의 열전도 고려 유무에 따른 열유속을 나타낸 것이다. 흰의 열전도를 고려한 열전달은 흰의 불균일한 온도분포와 이에 따른 서리층 성장으로 인해 흰의 표면온도가 일정한 경우에 비해 평균 10% 정도 과소 예측한다. 이러한 착상 거동은 부정확한 착상 결과를 야기하며 착상 해석 모델의 신뢰도를 떨어뜨린다. 따라서, 서리층 두께의 정확한 예측을 위해 착상 거동 해석 시 흰의 열전도를 고려해야 한다.

Dimensionless correlation of equivalent temperature

흰의 열전도 고려 유무에 따른 착상 거동은 현저한 차이를 가지며, 이를 보완하기 위하여 등가온도를 산출한다. 여기서 흰의 열전도를 고려한 경우의 열전달량이 흰의 표면온도가 일정한 조건에서의



[그림 9] Heat flux with variations of constant fin temperature for predicting equivalent temperature at $t=90$ min.

열전달량과 일치할 때, 그 일정 표면온도를 등가온도로 정의한다. 열교환기의 착상 거동을 광범위한 조건에서 예측하기 위해 본 연구에서는 다양한 운전 조건 및 흰 형상에 대해 등가온도 상관식을 유도한다. 이를 위해 실험계회법에 의해 설정된 27가지의 후보점에 대하여 수치해석을 수행한다.

Equivalent temperature, T_{eq}

그림 9는 주어진 조건에서 등가온도를 파악하기



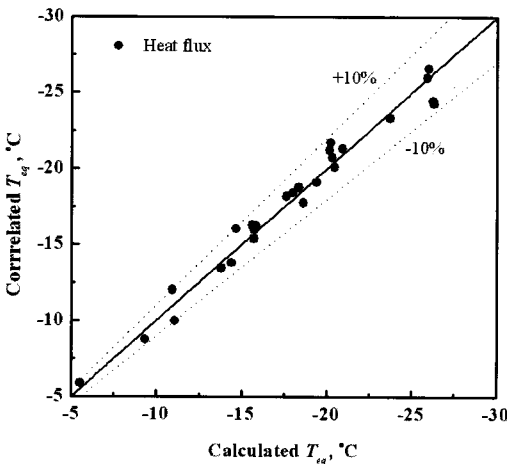
위해 흰의 일정 표면온도의 변화에 따른 열유속을 나타낸다. 열전달은 흰의 일정 표면온도가 낮아짐에 따라 로그함수적으로 증가한다. 주어진 조건에서 흰의 열전도를 고려한 경우, 흰의 바탕온도가 -20℃일 때의 열전달량은 493 W/m²이며(점 A), 이는 흰의 일정 표면온도가 -13℃일 때의 열전달량과 일치한다. 즉, 주어진 조건에서 등가온도는 -13℃이다.

Dimensionless correlation of equivalent temperature

본 연구에서는 열전달에 대한 등가온도 상관식을 유도하기 위하여 위와 같은 방법으로 27가지의 후보점에 대하여 등가온도를 먼저 파악하였다. 무차원 등가온도 상관식은 차원해석(dimensional analysis)을 통해 착상 인자, 형상 인자 및 유체의 물성치로 구성된 무차원 변수들의 함수이다. 차원 해석을 위한 변수는 크게 착상 인자, 형상 인자 및 유체의 물성치를 차원해석을 위한 전체 변수로 설정한다.

$$F(T_a, u_a, w_a, T_b, t_{op}, T_c, L_{fin}, H_{fin}, t_{fm}, \rho_a, \mu_a, \alpha_a) = 0 \quad (20)$$

등가온도는 무차원 온도, 절대습도, Re_L수, Fo_L수 및 무차원 형상 인자의 함수로 나타난다.



[그림 10] Comparison of the calculated and correlated data of the equivalent temperature

$$T_c^* = \frac{T_c}{T_b} = G(T_a^*, w, Re_L, Fo_L, G_{fin}^*, t_{fm}^*) \quad (21)$$

$$T_a^* = \frac{T_a}{T_b}, Re_L = \frac{u_a L_{fin}}{\nu}, Fo_L = \frac{\alpha_a t_{op}}{L_{fin}^2}, G_{fin}^* = \frac{H_{fin}}{L_{fin}}, t_{fm}^* = \frac{t_{fm}}{L_{fin}} \quad (22)$$

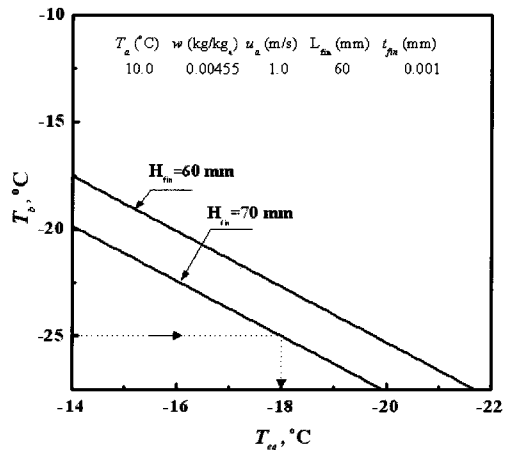
최소자승법(least square method)을 이용하여 얻은 열전달량에 대한 무차원 등가온도 상관식은 다음과 같다.

$$T_c^* = \frac{T_c}{T_b} = 0.83752(T_a^*)^{0.14466}(w)^{0.0074}(Re_L)^{0.01584}(Fo_L)^{-0.00990}(G_{fin}^*)^{0.04457}(t_{fm}^*)^{-0.02015} \quad (23)$$

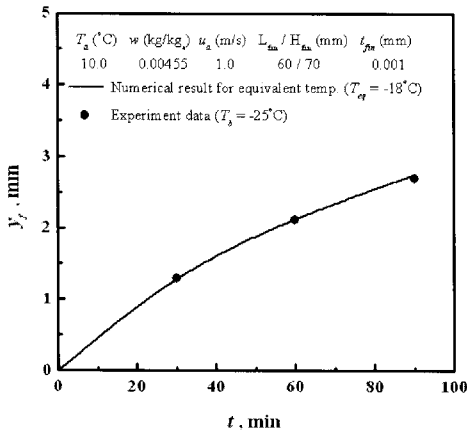
이 때, T_{eq} 은 흰의 등가온도를 의미한다. 적용범위는 $277.15 \leq T_a \leq 28.015$ K, $0.00301 \leq w_a \leq 0.00608$ kg/kg_a, $1.0 \leq u_a \leq 2.0$ m/s, $0 \leq t_{op} \leq 90$ min / $243.15 \leq T_b \leq 253.15$ K, $40 \leq L_{fin} \leq 80$ mm, $50 \leq H_{fin} \leq 90$ mm, $0.6 \leq t_{fm} \leq 1.4$ mm 이다.

그림 10은 열전달에 대한 등가온도의 해석 결과와 상관식의 결과를 비교한 것이다. 무차원 등가온도 상관식은 최대 10%의 오차 내에서 해석 결과를 잘 예측한다.

그림 11는 무차원 등가온도 상관식으로부터 얻은 정량적인 등가온도를 도시한 것이다. 흰의 높이



[그림 11] Quantitative equivalent temperatures obtained from the correlation at t=90 mm.



[그림 12] Comparison of average frost thickness between the numerical for equivalent temperature and experiment at t=90 mm.

에 상관없이 원의 바탕온도가 낮아짐에 따라 등가온도는 거의 선형적으로 감소한다. 즉, 원의 높이가 70 mm이고, 원의 바탕온도가 -25°C인 경우, 등가온도는 원의 일정 표면온도가 -18°C일 때 성립한다. 따라서, 열전달에 대한 등가온도 상관식을 이용하여 다양한 조건에 대한 등가온도를 정량적으로 파악함으로써 열교환기에 대한 복잡한 착상 메커니즘을 단순화하여 해석할 수 있다. 그림 12는 평균 서리층 두께에 대하여 등가온도로부터 얻은 해석 결과와 불균일한 온도분포를 갖는 원에서의 실험 데이터를 비교한 것이다. 상관식으로부터 얻어진 등가온도($T_{eq} = -18^\circ\text{C}$)에 대한 평균 서리층 두께는 원 바탕 온도가 $T_b = 25^\circ\text{C}$ 일 때의 실험 결과를 아주 잘 예측한다. 이는 본 연구에서 제시한 열전달에 대한 등가온도 상관식으로부터 얻어진 원의 등온 조건을 이용하여 불균일한 온도분포를 갖는 열교환기 원에서의 착상 거동을 예측할 수 있음을 보여준다.

Conclusions

본 연구에서는 착상 조건하에서 열교환기 원의 열전도를 고려하여 원 표면에서의 착상 거동과 열 및 물질전달 특성을 파악하고자 수학적 모델을 제

시하였다. 이 때, 공기측은 착상 현상에 대한 3차원 유동 변화의 영향을 고려하였으며, 공기측, 서리층 및 원 모델은 서로 연관되어 있다. 해석 모델의 검증을 위해 착상 실험을 수행하였으며, 서리층 두께에 대한 해석 결과는 실험 결과를 최대 10% 오차 내에서 잘 예측하였다. 유동에 수직인 방향(z-dir.)의 서리층 두께 성장은 원의 열전도에 의해 원 바탕 근처에서 활발하고, 원 끝으로 갈수록 지수함수적으로 둔화되었다. 원의 열전도를 고려한 경우에 비해 원의 표면온도가 일정한 조건에서 서리층 두께는 최대 2 배, 열전달량은 평균 10% 정도 과대 예측하였다. 따라서, 열교환기 원에서의 착상 거동을 정확하게 예측하기 위해 착상 모델 해석 시 원의 열전도를 고려해야 한다. 또한, 원의 열전도 고려 유무에 따른 착상 거동의 차이를 보완하기 위해 열전달량에 대한 등가온도를 산출하며, 이를 다양한 조건에서 열교환기 설계에 적용하기 위하여 무차원 등가온도 상관식을 도출하였다.

References

1. S. N. Kondepudi, D. L. O' Neal, Performance of finned-tube heat exchangers under frosting conditions. I. Simulation model, Int. J. Refrigeration 16(3) (1993) 175-180.
2. D. K. Yang, K. S. Lee, S. Song, Modeling for predicting frosting behavior of a fin-tube heat exchanger, Int. J. Heat and Mass Transfer 49(7-8) (2006) 1472-1479.
3. J. Martinez-Frias, S. M. Aceves, Modeling of a heat pump with evaporator air dehumidification for reduced frost formation, Transactions of the ASME (1998) 305-312.
4. S. Jhee, K. S. Lee, W. S. Kim, Effect of surface treatments on the frosting/defrosting behavior of a fin-tube heat exchanger, Int. J. Refrigeration 25(8) (2002) 1047-1053.
5. K. Kaygusuz, Performance of an air to air heat pump under frosting and defrosting conditions, Applied Energy 48 (1994) 225-241.



6. S. M. Sami, T. Duong, Mass and heat transfer during frost growth, *ASHRAE Transactions* 95 (1989) 158-165.
7. K. A. R. Ismail, C. S. Salinas, Modeling of frost formation over parallel cold plates, *Int. J. Refrigeration* 22(5) (1999) 425-441.
8. K. S. Lee, W. S. Kim, T. H. Lee, A one dimensional model for frost formation on a cold flat surface, *Int. J. Heat and Mass Transfer* 40(18) (1997) 4359-4365.
9. K. S. Lee, J. Sung, D. K. Yang, Prediction of the frost formation on a cold flat surface, *Int. J. Heat and Mass Transfer* 46 (2003) 3789-3796.
10. H. C. Parish, C. F. Sepsy, A numerical analysis of frost formation under forced convection, *ASHRAE Trans.* (1972) 236-251.
11. R. Yun, Y. C. Kim, M. K. Min, Modeling of frost growth and frost properties with airflow over a flat plate, *Int. J. Refrigeration* 25 (2002) 362-371.
12. Y. X. Tao, R. W. Besant, K. S. Rezkallah, A mathematical model for predicting the densification and growth of frost on a flat plate, *Int. J. Heat and Mass Transfer* 36 (1993) 353-363.
13. H. Chen, L. Thomas, R. W. Besant, Modeling frost characteristics on heat exchanger fins: Part I, Numerical model, *ASHRAE Trans.* (2000) 357-367.
14. H. Chen, L. Thomas, R. W. Besant, Modeling frost characteristics on heat exchanger fins: Part II, Model validation and limitations, *ASHRAE Trans.* (2000) 368-376.
15. C. P. Tso, Y. C. Cheng, A. C. K. Lai, An improved model for predicting performance of finned tube heat exchanger under frosting condition, with frost thickness variation along fin, *Applied Thermal Engineering* 26 (2006) 111-120.
16. Y. Xia, A. M. Jacobi, An exact solution to steady heat conduction in a two dimensional slab on a one dimensional fin: application to frosted heat exchangers," *Int. J. Heat and Mass Transfer* 47 (14-16) (2004) 3317-3326.
17. M. N. Özisik, "Heat conduction" 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc.
18. J. S. Kim, D. K. Yang, K. S. Lee, Dimensionless correlations of frost properties on a cold cylinder surface, *Int. J. Heat and Mass Transfer* 51 (15-16) (2008) 3946-3952.
19. S. J. Kline, F. A. McClintock, Describing uncertainties in single-sample experiments, *Mechanical Engineering*, 75 (1953) 3-8.