1114 대한기계학회논문집 B권, 제27권 제8호, pp. 1114~1121, 2003

난류 유동 하에서 덕트 내의 착상

양 동 근*· 이 관 수†

(2003년 1월 20일 접수, 2003년 6월 2일 심사완료)

Frost Formation in a Straight Duct under Turbulent Flow

Dong-Keun Yang and Kwan-Soo Lee

Key Words: Frost Formation(착상), Heat and Mass Transfer(열 및 물질전달), Turbulent Flow (난류 유동), Standard $k-\varepsilon$ Turbulence Model(표준 $k-\varepsilon$ 난류 모델)

Abstract

A mathematical model considering the air side and the frost layer is presented to predict the frost layer growth. The standard $k-\varepsilon$ model for the air flow and the diffusion and energy equations for the frost layer are employed. The numerical results are compared with experimental data to validate the present model, and agree well with experimental data within a maximum error of 10%. The present model predicts well the frost properties and heat and mass transfer with respect to the frosting time. The variation of total heat transfer strongly depends on the operating condition, and has a similar trend to that of the sensible heat transfer. The frost properties along the flow direction are also investigated.

기호설명

C_1, C_2, C_μ	:	표준 $k-\varepsilon$ 모델 상수
c_p	:	정압비열 [kJ/kgK]
D	:	확산계수 [m^2/s]
D_h	:	수력지름 [m]
G	:	난류생성항
h_{sv}	:	승화 잠열 [kJ/kg]
k	:	난류 운동에너지
k_a	:	공기의 열전도 계수 [W/mK]
$k_{f,eff}$	:	서리층 열전도 계수 [W/mK]
m''	:	물질전달유속[kg/m^2s]
m_w	:	수증기 질량 분율
p	:	압력 [Pa]
Pr	:	Prandtl 수
q''	:	열유속 [W/m^2]
T	:	온도 [℃]
t	:	시간 [min]
u	:	x-방향 속도 [m/s]
v	:	y-방향 속도 [m/s]
y_f	:	서리층 두께 [m]

그리스문자

α	:	열확산계수 [m^2/s]
α_f	:	흡수계수 [s^{-1}]
δ	:	Kroneker delta function
ε	:	난류소산에너지
μ	:	점성계수 [kg/ms]
ρ	:	밀도 [kg/m^3]

* 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과
† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부
E-mail : ksleehy@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2290-0426 FAX : (02)2295-9021

σ : 모델 상수
ω : 절대 습도 [kg/kg′]

하첨자

a : 공기측
i,j : 텐서 인덱스
f : 서리층
fs : 서리층 표면
in : 입구(inlet)
$init$: 초기(initial)
p : 냉각면
sat : 포화상태
y : 서리층 두께

1. 서 론

가정에서 사용되는 냉장고, 식품 냉동 및 저장 분야, 공조기기 등의 다양한 산업용 냉동기에 사용되는 열교환기는 저온 상태에서 작동된다. 이렇게 빙점 온도 이하로 유지되는 열교환기의 냉각면에 형성되는 다공성의 서리층은 열저항 및 유동저항으로 작용하여 전체 시스템의 성능을 저하시키는 중요 요인이다. 따라서 서리층에서의 열 및 물질전달 특성의 예측이 필요하며, 이를 통해 열교환기의 효율적인 설계가 가능하다.

착상에 대한 기존의 실험적 연구는 일정한 실험 조건의 결과로 유도된 서리층 물성치에 대한 연구에 치중되어 왔다.[1~5] Hosoda 등,[1] Yonko와 Sepsy,[2] Lee 등[3]은 실험을 통해 서리층 밀도의 함수로서 열전도계수에 관한 상관식을 제시하였으며, Hayashi 등[4]과 Hosoda 등[1]은 서리층 밀도에 대해, Schneider[5]는 서리층 두께에 관해 각각 실험 상관식을 유도하였다. 최근에 Mao 등[6]은 -10℃ 이하의 공기온도에서 실험을 통해 서리층 두께, 서리층 밀도 등 서리층 물성치와 그 동안 실험을 통해 알기 어렵던 서리층에서 열 및 물질 전달계수 등에 관한 실험상관식을 제시하였다. 그러나 이런 실험 상관식들은 제한된 범위에서 유도된 것이며 실제 실험값과 상당한 오차를 보인다. 또한 실험을 통해서는 다양한 운전조건에서 서리층 성장에 관한 열 및 물질전달 특성을 정확히 파악하기 어렵다.

서리층 성장 거동 해석에 관한 수치적 연구들은 서리층 내· 외부의 해석 방법에 따라 다음과 같이 구분된다.[7~16] 먼저 공기측은 열 및 물질전달에 관한 상관식을 이용하고, 서리층 내부는 확산방정식을 해석하여 서리층의 성장거동을 예측하는 방법[7~9]이 있다. 다음으로 공기측은 경계층 방정식을 해석하고 서리층 내부는 서리층 물성치에 대한 기존의 실험 상관식을 이용하여 계산하는 방법[10~12]이 있다. 이런 연구들은 한정된 조건에서 유도된 실험 관계식을 이용하였기 때문에 해의 정확성이 떨어지며, 대부분 특정한 서리층 물성치만을 제시하였다. 최근에는 서리층을 다공성 물질로 해석하는 연구들이 있으나, 모델의 유도 과정에서 불확실한 계수를 가정하여 사용하므로 계수에 대한 해의 의존성이 크다.[13~16]

따라서 본 연구에서는 공기측의 유동은 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 열· 유동 및 수증기 질량 분율을 해석하고, 서리층 내부는 수증기 확산 방정식과 에너지 방정식을 해석한다. 이때 수치적 모델은 본 연구에서 수행한 실험값을 이용하여 비교· 검증하고, 서리층 성장 거동시 열 및 물질전달 특성을 예측한다.

2. 이론해석

본 연구에서는 수평 사각 덕트의 냉각 표면에 형성되는 서리층의 성장 거동 해석을 통해 서리층에서의 열 및 물질 전달 특성을 예측하는 모델을 제시하고자 한다. 이 때 해석 영역은 Fig. 1과 같이 구성되며 공기측과 서리층 내부를 열 및 물질전달 평형을 고려하여 각각 해석한다. 이 때 서리층의 형성과정은 준정상상태(quasi-steady state)로 가정한다.

2.1 서리층 외부 해석

본 연구에서 해석하고자 하는 수평 사각 덕트에서의 유동은 입구속도와 수력지름을 고려할 때 완전 발달된 난류 유동으로 판단된다. 따라서, 관내의 열· 유동 및 수증기 질량 분율의 해석을 위해 표준 $k-\varepsilon$ 난류 모델이 사용되며, 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0 \tag{1}$$

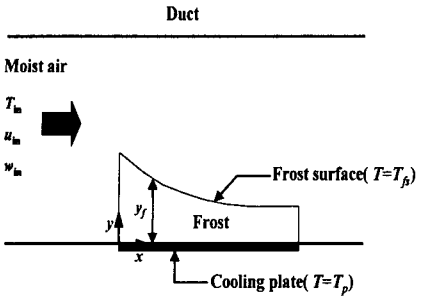

Fig. 1 Physical model for the analysis of frost layer growth

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu+\mu_t)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\rho k\delta_{ij}\right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho T u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\frac{\mu}{\Pr}+\frac{\mu_t}{\sigma_t}\right)\frac{\partial T}{\partial x_j}\right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho m_w u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\rho D+\frac{\mu_t}{\sigma_c}\right)\frac{\partial m_w}{\partial x_j}\right] \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G-\rho\varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_1\frac{\varepsilon}{k}G - C_2\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

여기서 $\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon}$, $G=\mu_t\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j}$,

$C_1=1.44$, $C_2=1.92$, $C_\mu=0.09$, $\sigma_t=0.9$,

$\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$, $\sigma_c=0.9$이다.

이 때 지배방정식의 해석을 위해 적용되는 경계조건은 난류유동 및 착상시 일어나는 물리적 현상을 고려할 때 다음과 같다. 입구 조건은 운전조건에 따라 결정되며 출구 조건은 0구배 조건이 주어진다.

입구 :

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

$$k=0.005u^2,\ \varepsilon=\frac{C_\mu k^{1.5}}{0.5D_h}$$

출구:

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

$$\frac{\partial k}{\partial x}=0,\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial x}=0$$

모든 벽에서는 점착(no-slip) 조건이 적용되며, 냉각면과 서리층 표면에서 수증기는 포화상태에 있다고 가정한다.

벽 :

$$u=0,\ v=0,\ \frac{\partial T}{\partial y}=0,\ \frac{\partial m_w}{\partial y}=0,\ \frac{\partial k}{\partial y}=0$$

냉각면 :

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

서리층 표면 :

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

$$\frac{\partial k}{\partial y}=0$$

2.2 서리층 내부 해석

서리층 내부에서 열 및 물질 전달 특성을 파악하기 위해 에너지 방정식과 수증기 확산 방정식을 해석한다. 서리층 표면으로부터 냉각면으로의 열전달은 순수한 열전도이며 서리층의 내부 밀도는 냉각면에 수직 방향으로 일정하다는 가정으로부터 서리층 내부에서의 에너지방정식은 다음과 같다.

$$\rho c_p u\frac{\partial T}{\partial x}+\rho c_p v\frac{\partial T}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(k_{f,eff}\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_{f,eff}\frac{\partial T}{\partial y}\right) \quad (7)$$

서리층 내부에서 임의의 검사체적에 흡수되는 수증기는 수증기 밀도에 비례한다고 가정하면 서리

층 내부의 수증기 확산방정식은 다음과 같다.[9]

$$D\frac{d^2\rho_w}{dy^2} = \alpha_f \rho_w \tag{8}$$

여기서 서리층 유효 열전도계수는 Lee 등[3]이 제안한 다음 식을 이용한다.

$$k_{f,eff} = 0.132 + 3.13\times10^{-4}\rho_f + 1.6\times10^{-7}\rho_f^2 \tag{9}$$

서리층 표면에서 열평형조건은 다음과 같다.

$$k_{f,eff}\frac{\partial T}{\partial y}\Big|_{y_f} = k_a\frac{\partial T}{\partial y}\Big|_{y_f} + h_{sv}\left(\rho D+\frac{\mu_t}{\sigma_c}\right)\frac{\partial m_w}{\partial y}\Big|_{y_f} \tag{10}$$

2.3 서리층 성장 계산

공기측에서 서리층 표면으로 전달된 수증기는 서리층으로 확산되며, 서리층 두께와 밀도를 증가시키는 총물질유속(m_f'')은 다음과 같다.

$$m_f'' = \left(\rho D+\frac{\mu_t}{\sigma_c}\right)\frac{\partial m_w}{\partial y}\Big|_{y_f} = m_y'' + m_\rho'' \tag{11}$$

이 때 서리층 내부로 흡수되어 서리층 밀도를 증가시키는 질량유속(m_ρ'')은 다음과 같이 표현된다.

$$m_\rho'' = \int_{y=0}^{y=y_f}\alpha_f\rho_\omega dy \tag{12}$$

임의의 시간에서 서리층 밀도와 두께는 다음과 같이 계산된다.

$$\rho_f^{t+\Delta t} = \rho_f^t + \frac{m_\rho''}{y_f}\Delta t$$
$$y_f^{t+\Delta t} = y_f^t + \frac{m_y''}{\rho_f}\Delta t \tag{13}$$

2.4 수치해석

본 연구에서는 지배방정식을 이산화하기 위해 유한체적법을 사용하였고 SIMPLER 알고리즘을 이용하여 수치해석을 수행하였다.[17] 211× 45, 211 × 55, 211× 65의 격자계와 5, 10, 20초의 시간 간격에서 수치해석을 수행한 결과, 각 격자계와 시간 간격에서 서리층 물성치가 2%이내에서 변화하였다. 따라서 덕트 표면과 냉각면의 입구와 출구 방향으로 밀집된 211× 55의 격자계와 10초의 시간 간격으로 수치해석을 수행하였다. 공기측 해석은 매 반복 계산시에 속도, 온도, 습도의 상대오차가 10^{-5} 이하이면 수렴된 것으로 판정하였다. 공기측과 서리층 내부 해석을 통해 서리층 표면에서 열평형조건이 만족할 때까지 서리 표면 온도를 반복 계산한다. 반복 계산시 서리층 표면 온도의 상대오차가 10^{-4} 이하이면 임의의 시간에서 서리 밀도와 두께를 계산한다.

3. 실 험

본 연구에서 사용된 실험 장치는 습공기의 온·습도를 조절하는 항온 항습실, 냉각면 온도를 유지시키는 냉각부, 착상 현상을 관찰하고 측정하는 시험부(길이 30 cm, 너비 15 cm, 높이 15 cm), 그리고 착상에 의해 온·습도가 변화된 습공기를 항온 항습실로 유입시키는 순환부로 구성되어 있으며, 각 부분은 독립적으로 제어할 수 있다.[9]

항온항습실내에서 습공기의 온·습도는 건·습구 조절용 히터와 냉각기를 제어하여 조절된다. 냉각부는 냉매를 냉각시키는 냉동기와 냉매를 순환시키는 펌프로 구성되어 있으며, 냉매는 에틸렌글리콜과 증류수를 6:4로 혼합한 에틸렌글리콜 수용액을 사용하였다. 시험부의 입·출구 공기 온도는 5개의 T형 열전대를 사용하여 측정하였고, 습도는 시험부 입·출구에 장착된 세라믹 습도센서를 이용하여 각각 측정하였다. 인버터가 부착된 송풍기를 사용하여 공기의 유량을 조절하고 그 유량은 노즐형 유량계로 측정하였다. 시험부 입·출구에 허니컴과 무동력 팬을 설치하여 공기의 순환을 균일하게 하였다.

실험에 앞서 시험부 내의 냉각면을 깨끗이 닦고, 서리 질량 측정용 알루미늄 테잎을 부착한다. 실험조건에 도달하기 전에 착상이 되는 것을 방지하기 위해 냉각면을 비닐랩으로 완전히 감싸고, 시험부의 모든 부분에 단열재를 부착한다. 냉동기, 냉매 순환용 펌프, 항온항습실을 가동하여 실험조건을 설정한다. 모든 실험조건이 정상상태에 도달하면 냉각면의 비닐랩을 제거하고, 착상실험

을 시작한다. 실험시간 15, 30, 60, 90, 120, 150, 180분에서 서리층 두께는 디지털마이크로미터를 사용하여 측정하고, 정밀 전자 저울을 사용하여 무게를 측정한다. 서리층 두께와 무게로부터 서리 밀도를 계산한다.

Table 1에는 측정 장치들의 바이어스 오차와 정밀도 오차로부터 계산한 실험 결과의 불확실도를 제시하였다.[18]

4. 결과 및 고찰

본 연구에서 사용한 수치모델을 검증하기 위해 실험과 동일한 형상에 대해 수치해석을 수행하였으며, 평균 서리층 두께와 밀도를 실험결과 및 층류 유동의 해석 결과와 비교하여 Fig. 2에 제시하였다. 현 수치 모델은 서리층 두께와 밀도를 실험결과와 비교하여, 전체적으로 최대 10%의 오차이내에서 잘 예측하고 있다. 층류 유동의 해석

Table 1 Uncertainties of parameters

Parameter	Uncertainty
Frost surface temperature	4.61%
Frost thickness	5.28%
Frost density	6.59%
Heat flux	3.85%

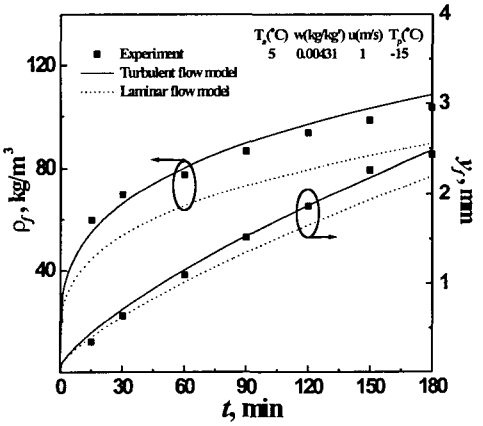

Fig. 2 Comparison of the results of turbulent flow model with the those of laminar model on the average density and thickness of the frost layer

결과는 난류 유동의 해석 결과 및 실험결과에 비해 서리층 물성치를 과소 예측하고 있다. 따라서 공기측 유동장을 고려할 때, 해석결과의 정확성을 높이기 위해 난류 유동을 해석하는 것이 타당함을 알 수 있다. 다양한 운전조건에서의 서리층 성장 특성의 비교를 위해 평균 서리층 물성치와 열전달율을 실험결과와 비교하여 Fig. 3, 4, 5, 6에 각각 나타내었다. 기존의 수치모델이 서리층 두께만을 잘 예측하는데 비해 현 수치 모델은 모든 서리층 물성치를 비교적 잘 예측하고 있다. Fig. 3을 보면 서리층 두께는 실험결과와 비교하여, 최대 10%의 오차이내에서 잘 예측하고 있다.

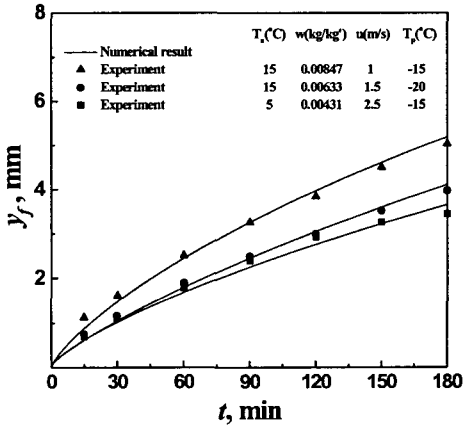

Fig. 3 Comparison of the numerical results with the experimental data on the average frost thickness

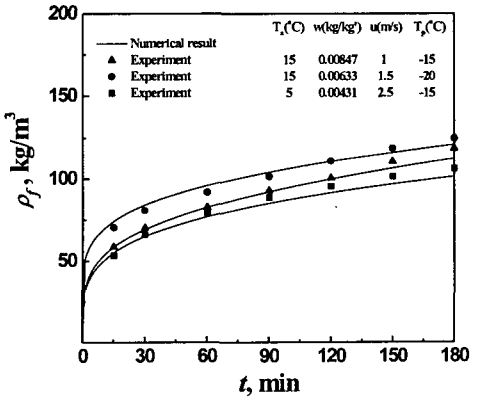

Fig. 4 Comparison of the numerical results with the experimental data on the average frost density

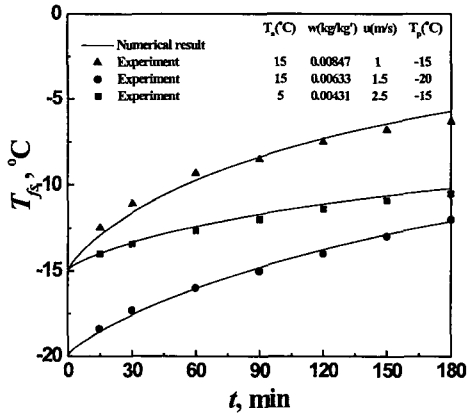

Fig. 5 Comparison of the numerical results with the experimental data on the average frost surface temperature

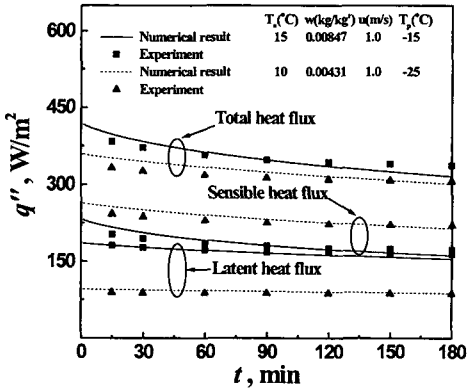

Fig. 6 Temporal variation of the heat flux with the operating conditions

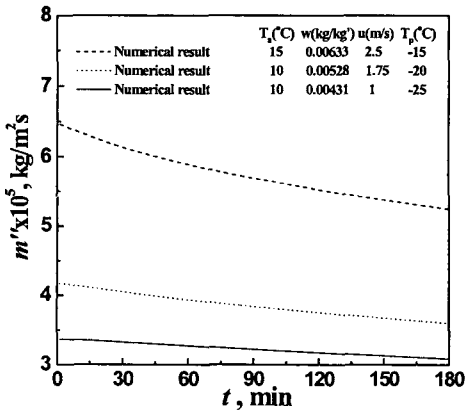

Fig. 7 Temporal variation of the mass flux with the operating conditions

냉각면 온도가 감소하거나 공기 절대습도가 증가하면 서리층 성장이 촉진되는 것을 알 수 있다. 이는 서리층 표면과 습공기 사이의 온· 습도차의 증가로 인해 서리층 성장이 촉진되기 때문이다.

Fig. 4는 평균 서리층 밀도를 실험결과와 비교한 것이며, 최대 10% 범위 안에서 예측하고 있다. 공기의 절대습도가 높거나 냉각면 온도가 감소할 경우 착상초기의 급격한 서리층 성장으로 인해 상대적으로 서리층의 밀도가 감소하는 것을 볼 수 있다. Fig. 5는 운전시간이 경과함에 따라 서리층 표면온도를 실험결과와 비교하여 도시한 것이다. 서리층이 성장함에 따라 서리층 표면온도가 착상초기에는 급격히 상승하지만 이후 그 상승폭이 둔화됨을 볼 수 있다. 이는 착상 초기에 서리층의 급격한 성장에 따라 열저항이 증가하지만 이후에 서리층 밀도가 증가하면서 서리층의 열전도계수가 상승하여 서리층의 표면온도의 상승을 둔화시키기 때문이다.

Fig. 6은 수치해석을 통해 서리층 성장시 운전시간이 경과함에 따라 열유속의 변화를 실험결과와 비교하여 도시한 것이다. 운전조건에 따라 현열전달과 잠열전달의 구성비는 크게 다르지만 전체적인 열유속의 변화 경향은 운전조건에 관계없이 현열전달에 연관되어 있다. 이는 현열전달은 서리층 표면온도의 상승에 따라 계속해서 감소하지만, 잠열전달은 저온의 서리층 표면에서 온도변화에 따른 포화습도의 변화가 작아서 상대적으로 거의 일정하기 때문이다. 또한, 착상 초기에 서리층 성장이 빠른 조건에서는 급격한 열저항의 증가로 인해 열유속이 더 빠르게 감소한다.

Fig. 7은 서리층 성장에 따른 물질전달의 변화를 운전조건에 따라 비교하여 제시한 것이다. 운전시간이 경과함에 따라 전체적으로 물질전달이 감소함을 알 수 있다. 특히, 냉각면 온도가 낮을 경우에는 물질전달의 변화가 상대적으로 작음을 알수 있다. 이는 서리층이 성장함에 따라 낮은 온도의 냉각표면에서 포화습도 변화가 작기 때문이며, 물질전달은 공기의 절대습도와 서리층 표면온도에서의 포화습도와의 차에 의존하여 변화함을 알 수 있다.

Fig. 8은 운전시간 180분에서의 유동 방향에 따른 서리층 두께와 서리층 밀도를 나타내었다. 냉

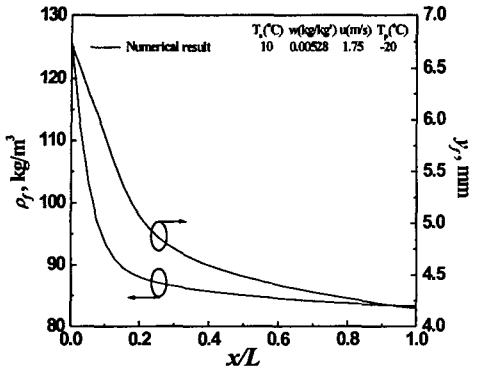

Fig. 8 Variation of frost properties according to the distance from the inlet at 180 min

각면의 입구 부분에서는 경계층의 선단효과에 의해 공기와 서리층 표면 사이의 온· 습도차가 크므로 열 및 물질전달이 증가하여 서리층 성장이 촉진됨을 알 수 있다. 따라서 출구 부분으로 갈수록 착상으로 인한 열 및 물질전달이 감소하고, 이에 따라 서리층 두께와 밀도가 감소함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 서리층의 성장 예측을 위해 서리층 내· 외부를 고려한 수치적 모델을 제시하고 실험결과와 비교하여 검증하였다. 이때 공기측 해석은 표준 $k-\varepsilon$ 모델을 사용하여 난류 유동을 해석하였으며 실험결과와 비교하여 전체적으로 최대 10%의 오차이내에서 잘 예측하고 있다. 기존의 수치적 모델들이 일부 서리층 물성치만을 예측하는데 비해 본 연구에서 제시한 모델은 서리층 물성치를 포함하여 열 및 물질전달까지 잘 예측하고 있다. 착상시 일어나는 열 및 물질전달의 해석결과, 열전달은 운전조건에 관계없이 전체적으로 현열전달과 일치된 경향을 갖고 있으나, 잠열전달과 현열전달의 구성비는 운전조건에 따라 크게 다르다. 이는 서리층 표면온도의 상승에 따라 잠열전달은 거의 일정하지만 현열전달이 계속 감소하기 때문이다. 서리층 성장에 따라 물질전달도 열전달과 대체로 유사한 경향을 갖으며 감소한다. 유동방향에 따른 서리층 물성치의 변화에서 열 및 물질전달이 활발한 입구에서는 서리층 성장이 촉진되어 서리층 두께와 밀도가 증가하였다.

후 기

이 연구는 한국과학재단 지정 한양대학교 최적설계신기술연구센터(iDOT)의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

(1) Hosoda, T. and Uzuhashi, H., 1967, "Effects of Frost on the Heat Transfer Coefficient," *Hitachi Review*, Vol. 16, No. 6, pp. 254~259.

(2) Yonko, J. D. and Sepsy, C. F., 1967, "An Investigation of the Thermal Conductivity of Frost while Forming on a Flat Horizontal Plate," *ASHRAE Trans.*, Vol. 73, No. 2, pp. 1.1~1.11.

(3) 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.

(4) Hayashi, Y., Aoki, A., Adachi, S., and Hori, K., 1977, "Study of Frost Properties Correlating with Frost Formation Types," *J. Heat Transfer*, Vol. 99, pp. 239~245.

(5) Schneider, H. W., 1978, "Equation of the Growth Rate of Frost Forming on Cooled Surfaces," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 21, pp. 1019~1024.

(6) Mao, Y., Besant, R. W., and Chen, H., 1999, "Frost Characteristics and Heat Transfer on a Flat Plate under Freezer Operating Conditions: Part I, Experimentation and Correlations," *ASHRAE Trans.*, Vol. 105, Part. 1, No. 4295, pp. 231~251.

(7) Jones, B. W. and Parker, J. D., 1975, "Frost Formation with Varying Environmental Parameters," *J. Heat Transfer*, Vol. 97, pp. 255~259.

(8) Sami, S. M., and Duong, T., 1989, "Mass and Heat Transfer During Frost Growth," *ASHRAE Trans.*, Vol. 95, Part. 1, No. 3218, pp. 158~165.

(9) 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.

(10) Parish, H. C., and Sepsy, C. F., 1972, "A Numerical Analysis of Frost Formation under Forced Convection," *ASHRAE Trans.*, No. 2331, pp. 236~251.

(11) Sherif, S. A., Raju, S. P., Padki, M. M., and Chan, A. B., 1990, "A Semi-Empirical Transient Method for Modeling Frost Formation on a Flat Plate," *ASME, Heat Transfer Division*, Vol. 139, pp. 15~23.

(12) Yun, R., Kim, Y., and Min, M. K., 2002, "Modeling of Frost Growth and Frost Properties with Airflow over a Flat Plate," *Int. J. Refrigeration*, Vol. 25, No. 3, pp. 362~371.

(13) Le Gall, R., Grillot, J. M., and Jallut, C., 1997, "Modelling of Frost Growth and Densification," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, No. 13, pp. 3177~3187.

(14) 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.

(15) Chen, H., Besant, R. W., and Tao, Y. X., 1999, "Frost Characteristics and Heat Transfer on a Flat Plate under Freezer Operating Conditions: Part II," Numerical Modeling and Comparison with Data, *ASHRAE Trans.*, Vol. 105, Part. 1, No. 4296, pp. 252~259.

(16) Luer, A. and Beer, H., 2000, "Frost Deposition in a Parallel Plate Channel under Laminar Flow Conditions," *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 39, pp. 85~95.

(17) Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Washington, DC, Hemisphere/ McGraw-Hill.

(18) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.