

착상이란?

What is Frost Formation?

이 관 수

K. S. Lee

한양대학교 기계공학과



- 1952년생
- 착상 및 제상, 열교환기의 성능해석, 전자장비의 냉각 등에 관심을 가지고 있다.

이 태 회

T. H. Lee

한양대학교 대학원
기계공학과 박사과정



- 1968년생
- 착상 및 제상등에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

20세기 후반 생활 수준의 전반적인 향상과 더불어 냉장고, 에어컨 등의 냉동 및 공기 조화 산업은 급격히 발전되어 왔다. 공기 조화 냉동 공학 분야에서 접하는 가장 큰 문제 중의 하나는 증발기 표면 위에 형성되는 서리(frost)이다. 착상이 진행되어 일정 시간이 경과한 후에는 서리층이 차가운 열교환기 표면과 습공기 사이에 단열층을 형성하여 열전달의 감소를 일으키게 되고, 계속되는 서리층 성장으로 인한 공기의 유동 면적의 감소로 열교환기를 통한 공기의 압력강하량이 증가한다. 이러한 압력강하량의 증가는 송풍기의 운전 특성에 영향을 미치고 이에 따라 공기의 유량은 감소한다. 착상으로 인한 열저항의 증가와 공기유량의 감소는 결국 열교환기의 냉동 성능을 감소시키게 되어 제상(defrosting)이라는 작업이 필요하게 되는데, 제상 작업은 냉동 성능 측면

과 에너지 소비 측면에서 비효율적이다. 즉, 제상 작업 동안에 증발기의 불연속 운전으로 인한 온도 상승으로 냉동장치의 연속적인 냉동 효과를 얻을 수 없을 뿐만 아니라, 제상 작업을 위한 부가적 열량 공급과 다시 냉동 사이클 수행시 제상열을 제거하는데 에너지를 소비하게 된다. 그럼에도 불구하고 기존의 열교환기는 착상되지 않은 상태를 기초로 하거나 경험에 의존하여 설계되어 왔다.

따라서 착상 때문에 발생하는 열교환기 성능 감소를 보상하기 위해서 추가되는 냉각 용량을 얼마로 할 것인지, 경제적인 측면에서 제상 시기는 언제로 할 것인지에 대한 연구가 요구된다. 즉 착상 조건 하에서 운전되는 증발기의 최적 설계와 최적 운전을 위해 착상에 대한 자료 및 해석이 필수적이다. 이를 위해서 다음과 같이 여러가지의 연구가 수행되어야 한다.

- 1) 서리층의 성장과 그 구조에 관한 연구

- 2) 서리층의 물성치
- 3) 서리층 성장의 모델링
- 4) 서리층 표면에서의 열 및 물질전달계수
- 5) 착상을 고려한 열교환기의 해석

2. 착상(frost formation)의 개념

착상은 수증기를 포함한 습공기가 이슬점보다 낮고 0℃ 이하의 온도로 유지되는 차가운 냉각면과 접하게 되면 일어난다. 즉, 착상은 습공기 중에 포함된 수증기가 공기로부터 냉각면으로 이동하여 다공성의 서리층을 형성하는 것을 말한다. 착상이 일어날 경우 공기와 냉각면 사이에는 온도 차로 인한 현열전달과 수증기압 차로 인한 물질전달(수증기의 이동)이 동시에 일어나며, 수증기의 상변화에 따른 잠열전달이 수반된다. 착상 조건하에서의 열전달 해석을 수행할 경우에는 착상으로 인한 물질전달과 이로 인한 잠열전달을 함께 고려하여야 한다. 수증기의 현열전달은 매우 작으므로 무시하고, 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{총열전달}(Q_t) &= \text{현열전달}(Q_s) + \text{잠열전달}(Q_l) \\ &= h_h \cdot A \cdot (T_a - T_{s,i}) + \dot{m}_l \cdot L_H \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{착상률}(\dot{m}_l) = h_m \cdot A \cdot (W_a - W_{s,i}) \quad (2)$$

여기서,

h_h : 열전달계수 [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{℃}$]

h_m : 물질전달계수 [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]

L_H : 수증기의 승화잠열 [J/kg]

이 과정을 간단히 도시하면 그림 1과 같다.

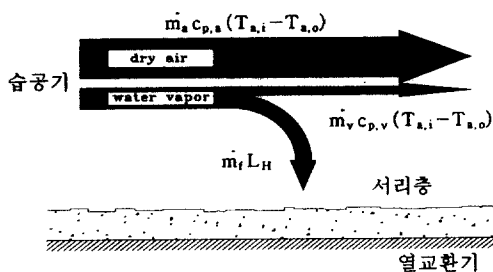


그림 1 착상 과정에서의 열 및 물질전달

3. 서리층의 성장

3.1. 서리층의 성장 과정

착상 현상을 파악하기 위해서는 서리층의 성장과정을 이해하는 것이 중요하다. 서리층의 형성과정을 미시적 관점에서 보면 수증기 분자들이 기체상태에서 고체상태로의 상변화를 지속적으로 하는 과정인데, 여기에는 과포화(supersaturation)라는 필수적인 과정이 존재한다. 과포화의 결과 새로운 상태의 핵(nucleus)이 결정되어 서리층이 생성되기 시작한다. 핵은 온도와 과포화의 정도에 따라서 다른 결정을 갖는 데 핵의 결정구조가 서리층의 형태와 밀도에 큰 영향을 준다. 서리층의 밀도가 서리층의 열전도 계수에 가장 큰 영향을 미치므로 밀도에 큰 영향을 주는 핵의 결정 구조는 열전도 계수에 주된 인자이고 열전달률과 물질전달률의 복합된 영향을 받는다. 낮은 물질전달률의 경우 높은 물질전달률의 경우보다 서리핵의 크기가 작고, 서리핵 생성 직후의 밀도와 성장후의 밀도차가 거의 없기 때문에 전체의 밀도는 높고 거의 일정한 값을 갖는다. 높은 물질전달률의 경우 서리핵은 크고, 일차원적으로 성장하는 서리기둥이 넓고, 빨리 성장하므로 서리핵 생성 직후의 밀도보다 성장후의 밀도는 낮다. 따라서 착상 초기에 전체의 밀도는 시간에 따라 급격히 감소한다. 서리의 성장은 수증기와 표면의 접촉각에도 영향을 받는데, 접촉각이 작은 표면(親水性, hydrophilic)일수록 응축수의 동결(凍結)과 서리층의 성장이 빠르고 단위 경과 시간당 서리층 두께도 접촉각이 큰 표면(疎水性, hydrophobic)에 비하여 크다.

서리 결정들이 성장하는 동안에 수증기 분자들은 성장이 일어나고 있는 위치의 결정 표면 위로 가스 상태의 덩어리로 전달된다. 이 전달과정은 체적 확산과 표면 확산이라는 두가지 과정으로 구분된다. 체적 확산 과정은 서리 결정이 생성되고 있는 곳으로 수증기 분자들이 그 구배로 인하여 가스상

태의 덩어리로 전달되는 과정이고, 표면 확산과정은 승화된 수증기 분자들이 결정 격자 내에서 응집되는 과정이다. 물질전달은 체적 확산과 표면 확산의 연속적인 결합으로 이루어진다.

서리층의 성장과정은 주변조건(냉각면 온도, 공기 유속, 공기 온도와 습도 등)에 따라서 많이 달라지는데 거시적 관점에서 볼 때 성장 과정 그 자체는 어떠한 조건에서도 공통적인 특징을 갖고 있다. 서리가 형성되는 과정을 그림 2에 나타내었다. 서리층의 성장과정은 다음과 같이 크게 세가지의 단계로 나눌 수 있다.

- 1) 결정 생성기(Crystal growth period)
- 2) 서리층 성장기(Frost layer growth period)
- 3) 서리층 성숙기(Frost layer fully growth period)

이러한 각 과정을 간단히 기술하면 다음과 같다.

1) 결정 성장기 (그림 2 (a))

공기의 수증기 분압과 표면의 포화 수증기 분압차가 상변화의 추진력으로 작용하여

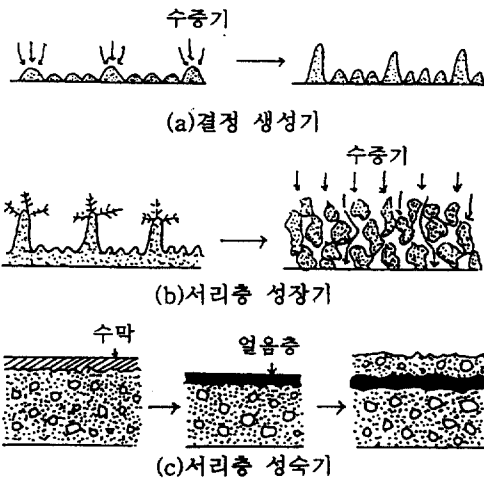


그림 2 서리층의 성장 과정⁽¹⁾

서리의 핵이 형성되고 서로 다른 공간적 형태를 갖는 결정들이 성장하여 처음으로 서리의 얇은 막이 저온 열원면을 덮는다. 그 후 수증기는 농도구배가 큰 쪽으로 쉽게 모이므로 일정한 간격으로 생성된 서리 결정들 위에 집중적으로 수증기가 착상되어 그림 3과 같이 서리층 표면과 수직인 방향으로 서리 기둥을 형성하면서 서리층은 일차원적으로 성장한다. 이 때 물질전달률이 낮을수록 서리 기둥들 사이의 간격은 좁아지고 성장율은 감소한다. 이 기간 동안 서리의 밀도는 핵의 수에 의해서 결정된다.

2) 서리층 성장기 (그림 2 (b))

결정 성장기에 형성된 서리 기둥이 기둥상단부 이외에 가지를 생성하고 결정끼리 상호 간섭하여 서리층의 형태를 변형시키며 서리층 표면이 편평하여질 때까지 망사모양의 균일한 서리층으로 삼차원적으로 성장한다. 서리층 내의 농도 구배로 인한 수증기의 내부확산으로 수증기의 일부분이 서리층의 공극으로 전달되어 승화가 발생하므로 일차원적으로 성장할 때 보다 서서히 성장하고 서리층 내의 밀도는 증가하게 된다. 이 기간 동안 성장율과 밀도는 물질전달률에 의해 결정된다. 물질전달률이 높을수록 즉, 과포화도가 클수록 고밀도의 서리층이 생성되고 성장율도 증가한다.

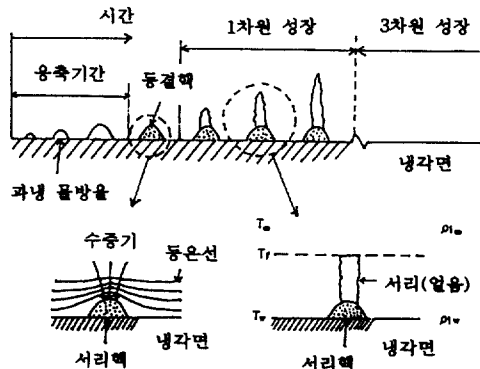


그림 3 초기 상태의 착상 현상⁽²⁾

3) 서리층 성숙기 (그림 2 (C))

서리층의 표면 온도가 0°C에 도달한 후의 과정으로 표면에 서리로서 결정되지 않고 응축에 의한 물방울과 이에 따른 수막 (water film)이 형성된다. 이 물이 다공성 서리층을 침투하면서 과냉각 서리층의 영향을 받아 얼음층(ice layer)으로 변화하게 된다. 이 결빙이 서리의 밀도를 갑자기 증가시키고 이로인하여 열저항이 급격히 감소하게 되므로 다시 얼음층 위에 서리가 착상되기 시작한다. 수막형성, 침투, 결빙, 착상의 과정이 주기적으로 반복되어 서리층의 밀도가 높아지고 단단하여 진다.

서리층 구조는 열전도계수에 큰 영향을 미치고 서리 결정들의 형태가 달라짐에따라 그 결과로서 구조가 달라진다. Hayashi 등 (3)은 착상 초기에 발생하는 결정의 형태를 주 유동과 표면 사이의 수증기 농도차 ΔC 와 냉각면의 온도 T_w 에 초점을 맞추어 그림 4와 같이 정리하였다.

A형은 결정 성장기의 거친 서리가 서리층 성장기의 그물 모양 서리로 변해가는 천이 기간에 결정의 상단부에 깃털 모양의 가지가 생성되는 특징을 갖는다. A-I와 A-II의 구분은 결정 성장기의 처음에 바늘형 결정이 존재하느냐에 따라 결정되는데, A-II는 처음부터 안정된 상태로 결정이 성장하여 그대로 서리 기둥이 형성된다.

B형은 A형과 거의 유사하지만 깃털 모양의 가지 대신에 더 발전된 판 모양 가지가 생성됨에 따라 결정의 천이가 발생한다. 서리의 착상 조건이 C형에 가까울수록 결정의 천이에 따라 결정 성장기에서 서리층 성장기의 이행을 구분하기는 어렵다. B-I과 B-II의 구분은 A형일 때와 같고 표면의 온도가 낮을 경우 바늘형 결정이 생성된다.

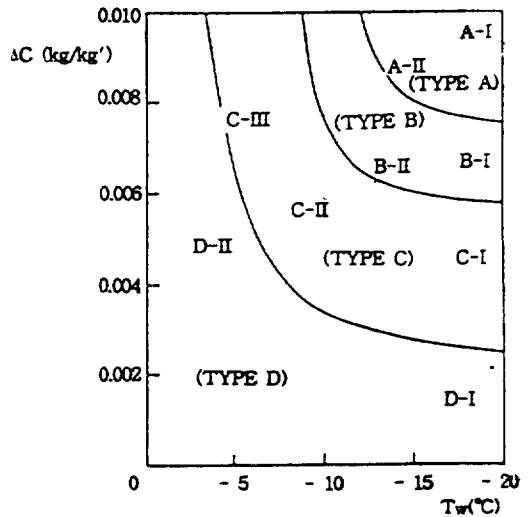
C형은 A형이나 B형에 비해 고밀도의 서리층을 형성하고, 착상이 결정 상단부에만 일어나는 것이 아니고 측면과 하단부에도 발생하므로 수직방향으로의 선형 성장율과 표면 조도는 작다. 따라서 상단부에 뚜렷한

결정 천이는 없고 각각의 결정이 크기를 확장하여 서로 결합되고 간섭하여 서리층 성장기로 이행된다. C-I, C-II 그리고 C-III은 바늘형 결정의 존재에 따라 구분된다.

D형은 C형과 착상 형태는 거의 비슷하지만 C형에 비해 밀도는 훨씬 크다.

착상형태		결정성장기	서리층성장기
A	A-I		
	A-II		
B	B-I		
	B-II		
C	C-I		
	C-II		
	C-III		
D	D-I		
	D-II		

(a) 착상시 형태의 분류



(b) ΔC - T_w 평면에서의 각 영역

그림 4 착상의 형태(3)

거의 균일한 서리층의 누적으로 성장하므로 표면 조도는 작다. D-I와 D-II는 결정 형태에 따라 구분하는데 D-I은 사각 판의 형태로 성장하고, D-II는 가늘고 불규칙한 형태로 성장한다.

위에서 살펴본 바와 같이 A형에서 D형으로 갈수록 서리층은 바늘형, 막대기형 결정들이 평면형 결정들로 변하므로 고밀도의 구조를 갖게 된다. 착상 형태는 공기의 온도에는 그다지 관계가 없지만, 냉각면에 형성된 서리 기둥의 수에는 많은 영향을 받는다. 공기 유속은 착상 형태에는 영향을 미치지 않지만, 서리 기둥 분포 밀도에는 큰 영향을 준다. 높은 공기 유속에서는 전달율이 크고 서리기둥의 수가 많으므로 서리층은 고밀도의 구조를 갖고, 서리층 성장 속도도 빠르다. 서리층 구조는 착상형태가 D형인 조건과 공기유속이 클수록 조밀한 상태를 형성한다.

3.2. 서리층 성장의 원리

습공기와 냉각면 사이의 수증기압 차이로 인하여 냉각면으로 전달된 수증기는 상변화를 일으키면서 냉각면 위에 서리층을 형성한다. 습공기로부터 냉각면으로 전달되는 수증기의 질량 유속은 습공기와 서리층 표면의 절대습도의 차이, 그리고, 물질전달계수의 곱으로 나타나며 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{m}_f = h_m \cdot (w_a - w_{fs}) \quad (3)$$

여기서,

\dot{m}_f : 수증기의 질량 유속 [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]

w_a : 공기의 절대습도 [kg_w/kg_a]

w_{fs} : 서리층 표면의 절대습도 [kg_w/kg_a]

이 때, 물질전달계수 h_m 는 공기의 유속과 열교환기의 형상 및 위치의 함수이다. 그리고, 서리층 표면의 습도 w_{fs} 는 서리층 표면 온도에서의 포화습도이다. 이 식에서 알 수 있듯이 착상은 공기와 서리층 표면 사이의 습도 차이에 의해 일어나므로, 서리층의 성장에

따라 서리층의 표면 온도가 증가하면 물질전달의 추진력이 감소되어 수증기의 질량 유속 또한 작아진다. 즉, 서리층은 그 표면 온도가 낮은 착상 초기에 빠르게 성장하고, 그 이후에는 서리층의 표면 온도가 계속 증가하여 성장 속도는 둔화된다. 전형적인 서리층 성장의 예로써, 시간에 따른 착상량의 증가를 그림 5에 도시하였다.

서리층의 성장 속도는 열교환기의 위치에 따라 다르게 나타나는데, 이것은 열교환기의 위치에 따라 공기 중에 포함된 수증기의 양이 변화하고, 위치에 따라 물질전달계수도 함께 변화하기 때문이다. 수직 평행 평판 열교환기의 경우 위치에 따른 착상량의 변화는 그림 6과 같이 나타난다. 이 그림으로부터 알 수 있듯이 서리는 열교환기의 출구에 비해 선단에 많은 양이 생기며, 그 차이는 시간과 함께 증가한다. 서리층은 공기로부터 전달된 수증기에 의하여 두께와 밀도가 증가되면서 성장한다. 그림 7과 8에 도시한 것과 같이 서리층의 두께 및 밀도 또한 착상량과 마찬가지로 초기에 급격히 증가하며, 시간이 경과함에 따라 그 변화율이 작아지며, 열교환기의 공기 입구에 발생한 서리층이 두껍고 밀도 또한 큰 값을 갖는다. 이러한 사실로부터 착상 조건하에서 운전되는 핀-관 열교환기를 설계할 때에는 공기의 입구에서의 핀간격을 출구 쪽보다 넓게 할 필요가 있다는 것을 알 수 있다.

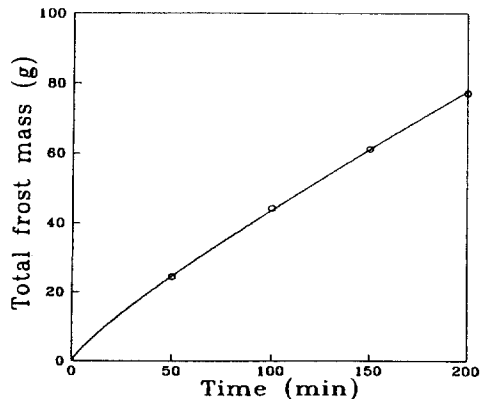


그림 5 시간에 따른 착상량의 변화(4)

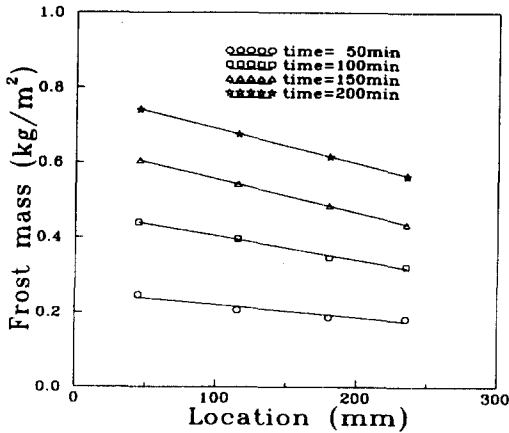


그림 6 위치에 따른 착상량의 변화(4)

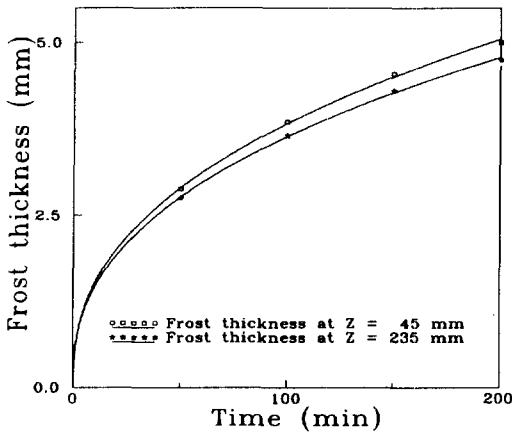


그림 7 시간에 따른 서리층 두께의 변화(4)

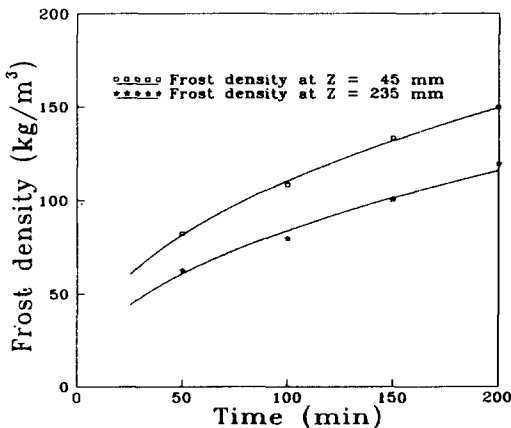


그림 8 시간에 따른 서리층 밀도의 변화(4)

3.3. 실험적 연구의 결과

착상량, 서리층의 두께 및 밀도 등 서리층의 성장에 미치는 공기의 온도, 습도, 속도 그리고, 냉각면의 온도 등의 운전 조건의 영향에 대한 기존의 연구 결과는 연구자들마다 상이한 결론을 도출하였으며(5~12), 이를 요약하면 표 1과 같다. 그리고, 몇몇의 연구자들은 서리층의 성장과 관련된 실험 관계식을 도출하였는데, 이 관수 등(5)은 서리층의 두께와 밀도를 다음의 식과 같이 공기의 온도, 습도, 속도, 그리고 냉각면의 온도 등의 운전 조건과 시간의 함수로 나타내었다.

$$X_{\text{frost}} = 1.441 \left(\frac{T_a - 12.3}{T_a - 13.2} \right) \left(\frac{W_a - 3.71 \cdot 10^{-3}}{W_a - 3.19 \cdot 10^{-3}} \right) \left(\frac{T_p + 9.1}{T_p + 8.0} \right) \left(\frac{Re}{Re_0} \right)^{0.304} t^{f_1(W_a, Re)} \quad (4)$$

$$\rho_{\text{frost}} = 10.3 \left(\frac{T_a - 14.4}{T_a - 13.3} \right) \left(\frac{W_a - 6.41 \cdot 10^{-3}}{W_a - 6.06 \cdot 10^{-3}} \right) \left(\frac{T_p + 38.8}{T_p + 45.4} \right) \left(\frac{Re}{Re_0} \right)^{0.24} t^{f_2(W_a, Re)} \quad (5)$$

여기서,

$$f_1(w_a, Re) =$$

$$0.18 \cdot (3.17 - w_a/w_0) \cdot (Re/Re_0)^{-0.078} \quad (6)$$

$$f_2(w_a, Re) =$$

$$0.21 \cdot (3.14 - w_a/w_0) \cdot (Re/Re_0 - 0.26)^{0.02} \quad (7)$$

이 때, $Re_0 = 9545$, $w_0 = 4.636 \cdot 10^{-3}$ 이다.

표 1 착상의 영향에 대한 기존의 연구 결과

연구자	인자의 영향			
	공기의 유속	냉각면의 온도	공기의 온도	공기의 습도
이 관수 ⁽⁵⁾	↑	↓	↑	↑
Wagner ⁽⁶⁾	↑	·	·	↑
Sanders ⁽⁷⁾	↗	·	↓	↑
Gatchilov ⁽⁸⁾	↑	·	·	↑
Tantakitti ⁽⁹⁾	·	·	↑	↑
Kondepudi ⁽¹⁰⁾	↑	·	·	↑
Senshu ⁽¹¹⁾	↓	↓	·	·
Rite ⁽¹²⁾	↑	↓	↑	↑

↑ : 인자가 증가될 경우 착상률 증가

↓ : 인자가 증가될 경우 착상률 감소

↗ : 인자가 증가될 경우 착상률 증가후 다시 감소

3.4. 서리층의 성장의 모델링

식(3)를 이용하여 공기와 서리층 표면 사이의 물질전달량을 구할 때 물질전달계수 h_m 는 열 및 물질전달의 유사성을 적용하여 열전달계수로부터 구한다. 앞에서 언급한 바와 같이 서리층은 공기로부터 전달된 수증기에 의하여 두께와 밀도가 증가되면서 성장한다. 즉, 공기로부터 전달된 수증기의 일부는 서리층의 두께를 증가시키고, 일부는 서리층의 밀도를 증가시킨다. 수증기 유속 중 얼마만큼의 양이 밀도를 증가시키고, 두께를 증가시키는가에 대한 이론은 대표적으로 두 가지가 있는데, 그 하나는 White 등⁽¹³⁾이 가정한 half theory이며, 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{m}''_x = \dot{m}''_\rho = 0.5 \cdot \dot{m}''_{frost} \quad (8)$$

여기서,

\dot{m}''_x : 서리층의 두께를 증가시키는 수증기 유속 [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]

\dot{m}''_ρ : 서리층의 밀도를 증가시키는 수증기 유속 [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]

나머지 하나는 Jones와 Parker⁽¹⁴⁾, 그리고, Brian 등⁽¹⁵⁾이 제안한 수증기 확산 모델로써, 수증기를 이상 기체라 가정하여 다음과 같이 \dot{m}''_ρ 와 \dot{m}''_x 의 값을 각각 구하였다.

$$\dot{m}''_\rho = D_s \frac{\left(\frac{1 - \rho_{frost}}{\rho_{ice}} \right)}{R \cdot T_{fs} \cdot \tau_{frost}} \left(\frac{dT}{dX} \right)_{fs} \cdot \left(\frac{i_{sg}}{v_{sg}} - P_v \right)_{fs} \quad (9)$$

$$\dot{m}''_x = \dot{m}''_{frost} - \dot{m}''_\rho \quad (10)$$

여기서,

R : 기체 상수

τ_{frost} : 서리층의 tortuosity factor (일반적으로 1에 가까운 수치)

식(3)과 식(8) 또는, 식(3), 식(9), 그리고 식(10)에서 구한 각각 수증기 유속을 이용하여 서리층의 두께와 밀도의 변화율을 다음의 식과 같이 구한다.

$$\frac{dX_{frost}}{dt} = \frac{\dot{m}''_x}{\rho_{frost}} \quad (11)$$

$$\frac{d\rho_{frost}}{dt} = \frac{\dot{m}''_\rho}{X_{frost}} \quad (12)$$

현재, 착상과 관련된 문제를 이론적으로 해석하는데 있어서 많은 연구자들이 수증기 확산 모델을 이용하고 있다. 그러나, 이 모델 또한 서리층의 두께를 실제의 값과 다른 값으로 예측하는 경향이 있다.

4. 착상 조건 하에서의 열교환기의 성능

4.1. 착상이 미치는 악영향

착상 현상이 열교환기에 악영향을 미치는 것은 열전도계수가 매우 낮은 서리층(서리층의 열전도계수는 대략 $0.05 \sim 0.5 \text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$ 이다.)이 공기와 열교환기의 표면 사이에 단열층을 형성할 뿐만 아니라, 공기의 유로를 차단하여 공기의 유량을 감소시키기 때문이다.

착상 초기에는 증발기 표면에 서리의 부착으로 인하여 표면이 거칠어져 열전달이 증가하지만, 서리층이 성장함에 따라서 공기의 유로 면적을 감소시키고, 공기로부터 증발기 표면을 차단시켜 공기와 냉매 사이의 열전달을 감소시킨다. 또한 표면에 부착된 서리층은 열전달에 있어서 부가적인 열저항을 형성하여 열전달을 감소시킨다. 만약 지속적인 조정이 없다면 증발기 표면으로부터 제거되는 열은 공기 조건의 변화와 더불어 시간의 함수로 지속적으로 감소하게 될 것이다. 서리층 두께가 증가함에 따라서 증발기의 공기 유동 저항이 증가하게 되고 사용되는 송풍기의 특성에 의존하고 있는 공기 유량이 감소하게 된다. 결국, 공기 조건의 비균일성을 증가시키는 결과가 되어 증발기를 지나는 공기의 압력 강하를 크게 하여 송풍기의 성능에 영향을 미치게 된다. 이와 관련된 연구는 여러 연구자에 의해 수행되었다. 그 중에서 General Electric 社의 Weathertron이라는 분리형 열펌프를 사용하여 여러 상대습도에 대하여 시간에 따른 송풍기 소요 동력의 증가와 성적계수의 감

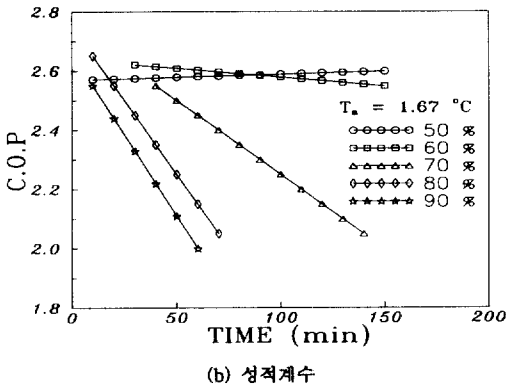
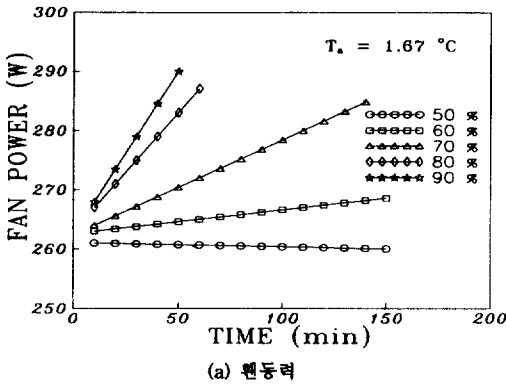


그림 9 착상이 열펌프의 성능에 미치는 영향⁽⁴⁶⁾

소를 실험한 Miller⁽¹⁶⁾의 결과를 정리하면 그림 9와 같다. 일정한 공기유량을 공급하기 위한 송풍기의 소요동력은 그림 9(a)에서

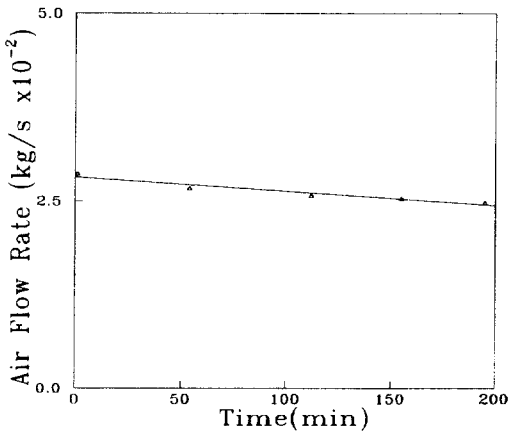


그림 10 착상에 따른 공기 유량의 감소⁽⁴⁾

나타난 바와 같이 상대 습도가 높을수록 시간에 따라 급격히 증가한다는 것을 알 수 있고, 성적계수는 그림 9(b)에서 나타나는 것과 같이 시간에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 특히 성적계수는 상대 습도가 50%일 때 약간씩 증가하고 상대 습도가 높을수록 초기에 높은 성적계수값을 보이다가 시간이 흐름에 따라 급격히 감소하는 것은 착상초기 열교환 면적의 증가와 서리 조도의 영향으로 난류유동을 발생시킴에 따라 열전달률이 증가하는 것이 원인으로 해석되었다.

Stoecker⁽¹⁷⁾, Barrow⁽¹⁸⁾, Gate 등⁽¹⁹⁾ 그리고 Niederer⁽²⁰⁾와 같은 몇몇의 연구자들은 공기의 유량 감소가 착상이 열교환기에 미치는 악영향의 지표라고 주장하였다. 이들의 주장은 부분적으로 타당하며, 실제의 냉동 시스템의 경우 공기를 순환시키는 팬(fan)의 입력 주파수가 일정하므로 착상이 진행됨에 따른 공기 유량의 감소는 심각한 것으로 알려져 있으며, 그 예로 그림 10을 들 수 있다. 그러나, 서리층의 열저항 또한 무시할 수 없다는 것이 밝혀져 있다. 대류열저항과 전도열저항의 비는 어떠한 조건에서 열교환기가 운전되는가에 달린 문제로써, 공기와 냉각면 사이의 열저항을 공기와 서리층 표면 사이의 대류열저항과 서리층의 전도열저항으로 나누어 도시하면 그림 11과 같다.

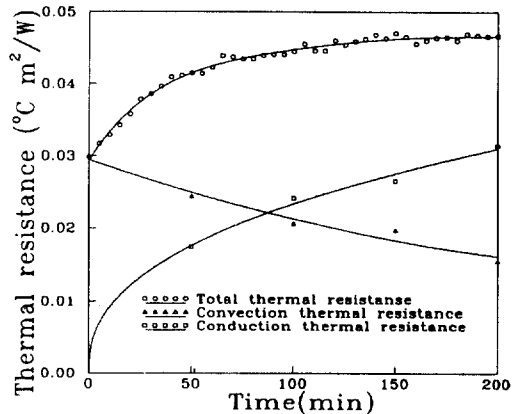


그림 11 열저항의 시간에 따른 변화⁽⁴⁾

4.2. 착상 조건 하에서의 열교환기 성능의 시간에 따른 변화

착상을 고려한 핀-관 열교환기에 대한 기존의 연구 결과를 정리하면 다음과 같다. Stoecker⁽¹⁷⁾, Hosoda 등⁽²¹⁾ 그리고, Gatchilov 등⁽⁸⁾은 열전달은 착상 초기에 증가하다 착상이 진행됨에 따라 다시 감소하는 것으로 보고한 반면, Rite 등⁽¹²⁾은 착상이 진행됨에 따라 열전달이 꾸준히 증가한다는 결론을 내렸으며, Aoki 등⁽²²⁾은 열전달은 착상 초기에 감소를 보인 후 계속 증가한다는 결론을 얻었다. 또한, 이 관수 등⁽²³⁾은 열전달이 착상 초기에 순간적으로 증가한 후, 아주 천천히 감소한 후, 빠르게 증가하여 최고치에 도달한 후 다시 감소한다고 보고하였다.

그림 12에 나타낸 것처럼 착상이 진행됨에 따라 공기측의 압력강하량이 증가하는데, 많은 연구자들은 착상이 진행됨에 따른 공기 측의 압력강하량의 증가의 원인이 서리층의 거친 표면에 의한 마찰 효과와 공기 유로의 차단에 있으나, 이 두 가지 효과를 분리하여 수식화하기가 곤란하기 때문에 서리층에 의한 유로 차단에 그 원인이 있다고 가정하여 실험 관계식을 도출하고 있다. 즉,

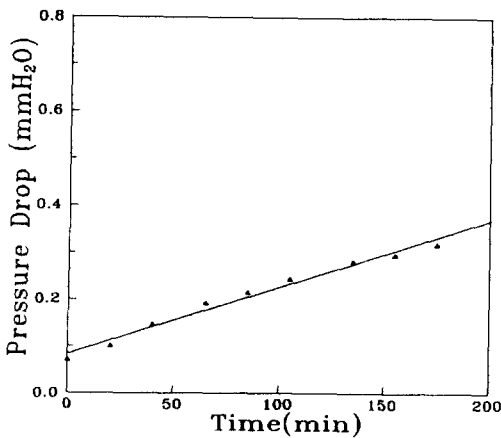


그림 12 착상에 따른 공기측 압력강하량의 증가⁽⁴⁾

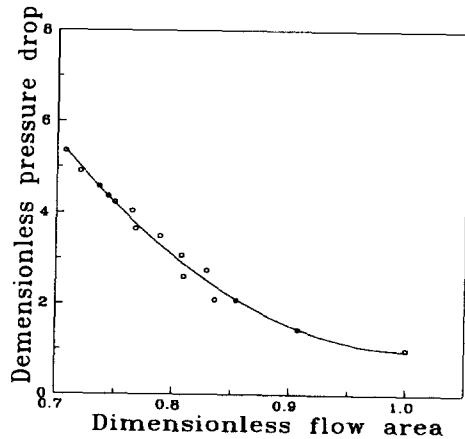


그림 13 공기 유로 감소에 따른 압력강하의 증가⁽⁵⁾

연구자들은 그림 13과 같이 압력강하량과 공기의 유로의 변화와의 관계를 조사하였다.

앞에서 언급한 바와 같이 착상이 열전달에 미치는 영향에 대하여 연구자들마다 상이한 결론을 도출하였으나, 일반적으로 초기를 지나면 서리층에 의한 공기 유로의 차단과 단열 효과 때문에 냉동 시스템의 열전달 성능을 저하시킨다는 것이 알려져 있다.

4.3. 운전조건의 영향

착상 조건하에서 운전되는 열교환기의 성능은 착상이 진행됨에 따라 계속적으로 변화하는데, 이것은 열교환기의 표면에 부착된 서리층의 성장과 그것의 열적 특성이 계속 변화하기 때문이다. 서리층의 성장과 그 서리층의 열적 특성은 서리층이 형성되는 조건에 따라 달라진다. 공기의 온도가 높을수록 두께가 얇고, 밀도가 높은 서리층이 형성되어 착상에 따른 열교환기의 성능 감소가 적게 나타나며, 냉매의 온도가 낮거나 공기의 습도가 높은 조건에서는 반대의 결과를 가져오는 것으로 밝혀졌다. 또한, 열교환기가 공기의 유속이 큰 조건에서 운전될 경우에는 낮은 유속에서 운전될 경우보다 서리층의 두께 및 밀도가 모두 높게 나타나기 때

문에 그 결과는 냉동 시스템의 팬 특성 등에 따라 다른 결과를 가져올 것이다⁽²⁴⁾.

5. 착상 조건 하에서의 열교환기의 성능 해석

5.1. 서리층의 열전도계수

서리층의 열전도계수에 관한 연구 결과 또한 연구자들마다 차이를 보이고 있으나 연구자들이 서리층의 열전도계수를 서리층의 밀도의 함수로 간주하여 결과를 도출하였다^(5,21,25). 각 연구자들이 서리층의 열전도계수와 밀도의 관계식을 도출하였으나, 그 수치는 약간의 차이를 보이고 있다. 예를 들면, Sanders 등의 실험 결과를 O'Neal⁽²⁵⁾이 정리하여 도출한 수식과 이 관수 등⁽⁴⁾의 결과는 서리층의 밀도가 100kg/m^3 이상일 경우 비슷한 수치를 나타낸다.

$$k_{\text{frost}} = 0.132 + 3.13 \cdot 10^{-4} \cdot \rho_{\text{frost}} + 1.60 \cdot 10^{-7} \cdot \rho_{\text{frost}}^2 \quad (13)$$

5.2. 잠열과 현열

착상 조건하에서의 열전달 과정을 논의할 때 가장 먼저 생각해야 할 것은 착상으로 인한 잠열전달이 총열전달(잠열+현열)에서 차지하는 비율이 어느 정도 인가하는 문제로써, 몇몇의 연구자들은 잠열은 현열에 비해 매우 작으므로 무시할 만하다고 하였다. 그러나, 착상을 수반하는 열전달 과정에서 열전달과 물질전달의 상사성이 성립한다는 것, 즉 착상 과정에서의 Lewis 수가 1에 가까운 수치를 보인다는 것이 많은 연구자들에 의해 밝혀진 바 있으므로, 잠열전달을 무시할 것인가 하는 문제는 운전 조건에 따라 달라진다. 다시 말하면, 현열전달의 추진력에 비하여 잠열전달의 추진력이 작은 경우에는 잠열을 무시할 수 있지만, 그렇지 않은 경우에는 무시할 수 없다.

5.3. 해석 이론

착상 조건하에서의 핀-관 열교환기의 성능을 해석하는 데에는 여러가지의 방법이

있으나, 특히 서리층의 단열 효과와 서리층의 두께가 갖는 서리층의 유로차단효과를 고려하는 것이 일반적 열교환기의 해석 방법과 다르다. 그리고 착상 현상이 수반되는 열전달 과정은 공기와 냉매의 온도차에 의한 현열전달 뿐만 아니라 착상에 의한 잠열전달이 동시에 수반되기 때문에 LMTD 등의 무착상 조건에서의 열교환기 해석 방법을 그대로 적용하는 데에는 많은 근사화 과정이 필요하다. 따라서, 근래에 들어서는 착상 현상이 수반되는 열전달 현상을 보다 정확하게 해석하기 위해서 LMTD와 유사한 개념의 LMED(Logarithmic Mean Enthalpy Difference)를 이용한 해석 방법이 널리 쓰이고 있다. 이러한 접근이 가져다주는 이점은 해석적인 근을 얻을 수 있고 LMTD 사용시 힘든 근사화 과정을 피할 수 있다는 점이다.

Kondepudi와 O'Neal⁽²⁶⁾ 그리고 이관수 등⁽²⁷⁾은 착상이 핀-관 열교환기의 성능에 미치는 영향을 기본적인 열 및 물질전달 원칙 하에서 해석하였다. 그들은 열교환기의 성능을 평가하는 실험 및 해석적 접근에서 기존의 LMTD 대신 LMED 방법을 사용하여 총합 에너지전달계수를 정의하였는데, 착상이 현열 뿐만 아니라 잠열전달 과정을 포함하므로 현열의 영향만을 표현하는 LMTD의 사용은 엄밀하게 정확치 않다고 하였다. 그들은 총합 에너지전달량을 다음의 식과 같이 정의하였다.

$$q_T = E_o \cdot A_{t,o,dry} \cdot \frac{\Delta i_{lm}}{C_{p,a}} \quad (14)$$

여기서,

q_T : 총합 에너지전달

$A_{t,o,dry}$: 착상되지 않은 관의 표면적

$$\Delta i_{lm} = \frac{(i_{a,i} - i_{r,o}) - (i_{a,o} - i_{r,i})}{\ln \left[\frac{(i_{a,i} - i_{r,o})}{(i_{a,o} - i_{r,i})} \right]}$$

그리고 공기측 열전달계수 h_a , 전체 표면적 A_T , 표면 효율 η_s 를 사용하여 총합 에너지전달계수를 정의함으로써 총합 에너지전달계

수에 대한 해석적 접근을 시도하였다.

$$E_o = \left[\frac{A_{F,dry}}{\eta_s h_o A_T} + \frac{A_{F,dry}}{A_r h_r} \right]^{-1} \quad (15)$$

여기서,

$$h_o = \left(\frac{1}{h_a} + \frac{X_{frost}}{k_{frost}} \right)^{-1} \quad (16)$$

일반적으로 착상 조건하에서 열교환기를 통해 발생하는 압력 강하는 서리층 성장으로 인한 유동 면적의 감소와 서리 표면 조도로 인한 마찰 손실 때문이다. 그러나 열교환기의 위치마다 각기 다른 서리 표면 조도를 정확히 측정할 수 없기 때문에 이 두 가지 효과를 분리해 내기란 불가능하다. 현재까지도 서리 표면 조도가 압력 손실에 미치는 영향에 관한 이론은 정립되어 있지 않은 실정이다.

6. 맺음말

착상 조건하에서 운전되는 열교환기의 최적 설계와 최적 운전조건의 설정을 위해서는 착상에 대한 방대한 자료가 필요하다. 그러나, 실제의 냉동시스템에 적용할 만한 관련 자료가 부족할 뿐만아니라, 연구자들에 따라 상이한 결론을 주장하고 있는 실정이다. 그리고, 본문에서 언급한 바와 같이 서리층의 성장 이론 또한 실제의 현상을 정확하게 기술하는 데에는 부족한 점이 있다. 따라서, 광범위한 운전 및 설계 조건에서의 착상 관련 자료의 확보와 착상이 열교환기의 성능 변화에 미치는 영향에 대한 이론적 정립을 위한 실험적 연구, 그리고 보다 정확하게 서리층의 성장을 예측할 수 있는 이론적 모델의 개발은 매우 가치 있는 연구의 주제가 될 것이다.

참 고 문 헌

1. Hayashi, Y., Aoki, K., and Yuhana, H., 1977, "Study of Frost Formation Based on a Theoretical Model of the Frost Layer", Heat Transfer, Jap. Res., Vol. 6, No. 3, pp. 79~94.
2. Tokura, I., Saito, H., and Kishinami, K., 1983, "Study on Properties and Growth Rate of Frost Layers on Cold Surfaces", ASME, J. Heat Transfer, Vol. 105, pp. 895~901.
3. Hayashi, Y., Aoki, K., Adachi, S., and Hori, K., 1977, "Study of Frost Properties Correlating with Frost Formation Types", ASME, J. Heat Transfer, Vol. 99, No. 2, pp. 239~245.
4. 이관수, 이태희, 김우승, 1994, "착상조건하에서 평행 평판 열교환기의 열 및 물질전달", 공기조화·냉동공학회 논문집, Vol. 6, No. 2, pp. 155~165.
5. 이관수, 이태희, 김우승, 1994, "저온 수직평판에서 착상에 대한 운전조건의 영향", 대한기계학회논문집, Vol. 18, No. 12, pp. 3305~3311.
6. Wagner, W. B., 1963, "Frost Formation on an Extended Surface Heat Exchanger in Crossflow of Humid Air", M.S. Thesis, Columbus : Ohio State University.
7. Sanders, C. T., 1975, "Frost Formation : The Influence of Frost Formation and Defrosting on the Performance of Air Coolers", Ph.D. Thesis, Copenhagen : Technische Hogeschool.
8. Gatchilov, T.S. and Ivanova, V.S., 1979, "Characteristics of Extended Surface Air Coolers during Operation under Frosting Conditions", Int. J. Refrig., Vol. 2, No. 4, pp. 233~236.
9. Tantakitti, C. and Howell, R.H., 1986, "Air-to-air Heat Pumps Operating under Frosting Conditions

- on the Outdoor Coil", ASHRAE Transactions, Vol. 92, Pt. 1, pp. 827~842.
10. Kondepudi, S.N. and O'Neal, D.L., 1989, "The Effect of frost growth on the Performance of Louvered Finned Tube Heat Exchangers under Frosting Conditions", Int. J. Refring., Vol.12, May, pp. 151~185.
 11. Senshu, T., Yasuda, H., Oguni, K., and Ishibani, K., 1990, "Heat Pump Performance under Frosting Conditions : Part I -Heat and Mass Transfer on Cross-Finned Tube Heat Exchangers under Frosting Conditions", ASHRAE Transactions, Vol. 96, Part 1.
 12. Rite, R. W., and Crawford, R. R., 1991, "The Effect of Frost Accumulation on the Performance of Domestic Refrigerator-freezer Finned-tube Evaporator Coils", ASHRAE Transactions, Vol. 97, Pt. 2, pp. 428~437.
 13. J. E. White and C. J. Cremers, 1974, "Prediction of Growth Parameters of Frost Deposits in Forced Convection," AIAA/ASME Thermophysics and Heat Transfer Conference, No. 74-HT-53, Boston, Massachusetts, July 15-17, 1974.
 14. Jones, B.W. and Parker, J.D., 1975, "Frost Formation with Varying Environmental Parameters", ASME, J. Heat Transfer, Vol.97, pp. 255~259.
 15. Brian, P. L. T., Reid R.C. and Brazinsky I., 1969, "Cryogenic Frost Properties", Cryogenic Technology, Vol. 5, pp. 205~212.
 16. Miller, W. A., 1980, "The Influence of Ambient Temperature and Relative Humidity on the Heating Mode Performance of a High-Efficiency Air to Air Heat Pumps", M.S. Thesis, University of Tennessee.
 17. Stoecker, W. F., 1957, "How Frost Formation on Coils Affects Refrigeration Systems", Refrigeration Engineering, Vol. 65, No. 2, pp. 42~46.
 18. Barrow, H., 1985, "A Note on the Frosting of Heat Pump Evaporator Surfaces", Journal of Heat Recovery Systems, Vol. 5, No. 3, pp. 195~201.
 19. Gates, R. R. and Sepsy, C. F. and Huffman, G. D., 1967, "Heat Transfer and Pressure Loss in Extended Surface Heat Exchangers Operating Under Frosting Conditions-Part 1 : Literature Survey, Test Apparatus and Preliminary Results" ASHRAE Transactions, Vol. 73, Pt. 2, pp. I.2.1-I.2.13.
 20. Niederer, D. H., 1976, "Frosting and Defrosting Effects on Coil Heat Transfer", ASHRAE Transactions, Vol. 82, Pt. 1, pp. 467~473.
 21. Hosoda, T. and Uzuhashi, H., 1967, "Effects of Frost on the Heat Transfer Coefficient", Hitachi Review, Vol. 16, No. 6, pp. 254~259.
 22. Aoki, K. and Hattori, M. and Hayashi, Y., 1985, "A Study of Extended Surface Heat Exchanger with Frosting ; 1st Report, Overall Heat Transfer Characteristics", JSME Trans., Ser. B, Vol. 51, No. 469, pp. 3048~3054.
 23. 이관수, 이태희, 김우승, 1995, "핀-관 열교환기의 착상에 대한 설계인자의 영향", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 (II), pp. 588~593.
 24. 이관수, 박희용, 이태희, 이남교, 이수

- 엽, 이명렬, 1995 “착상조건하에서 핀-관 열교환기 성능에 관한 실험적 연구”, 공기조화·냉동공학회 논문집, Vol. 7, No. 2, pp. 319~328.
25. O’Neal, D. L., 1983, “The Effects of Frost Formation on the Performance of a Parallel Plate Heat Exchanger”, Ph. D. Thesis, Purdue University.
26. Kondepudi, S. N. and O’Neal, D. L., 1993, “Performance of Finned-Tube Heat Exchangers under Frosting Conditions : I. Simulation Model”, Int. J. Refrig., Vol. 16, No. 3. pp. 175~180.
27. 이관수, 박회용, 이욱용, 이태희, 이수엽, 이명렬, 1995, “착상조건 하에서 핀-관 열교환기의 성능 예측을 위한 컴퓨터 시뮬레이션”, 공기조화·냉동공학회 논문집, Vol. 7, No. 1, pp. 161~170.