

# 층류유동 저습도 조건에서의 평행평판형 냉각판 서리성장 실험

## Experiment of frost growth on the parallel plates in the condition of laminar and low humidity

한 홍 도\*, 노 승 탁\*\*  
H. D. Han, S. T. Ro

**Key words:** Frost(서리), Parallel plates(평행평판), Dew point(노점), Laminar flow(층류유동)

### ABSTRACT

The frosting characteristics on the vertical parallel plates with three cooling plates were experimentally investigated. The experimental parameters were the cooling plate temperature, the air humidity, the air temperature, the air Reynolds number, and the location. The frosting conditions were limited to air temperatures from 10 to 15°C, air Reynolds numbers from 1600 to 2270, air humidity ratios from 0.00275 to 0.0037 kg<sub>w</sub>/kg<sub>a</sub> and cooling plate temperatures from -10 to -20°C. Frost growth and density toward the front of the plate were more thick and dense than toward the rear. Frost growth increased with decreasing plate temperature and increasing humidity. In the conditions of the laminar flow, dew point below 0°C and non-cyclic frosting period, frost thickness increased with increasing air temperature. The reason of increasing frost thickness with increasing air temperature was sublimation-ablimation process. The average growth thickness along the locations showed little dependence on the Reynolds numbers.

### 기 호 설 명

### 1. 서 론

- $t_a$  : 공기온도[°C]
- $t_{dew}$  : 공기의 이슬점 온도[°C]
- $t_{fs}^*$  : 무차원 서리표면 온도[-]
- $t_m$  : 물의 빙점[°C]
- $t_p$  : 냉각판 온도[°C]
- $W$  : 공기의 절대습도[kg<sub>w</sub>/kg<sub>a</sub>]
- $Re$  : Reynolds 수,  $\frac{UL}{\nu}$

냉동기, 열펌프등에 사용되는 공기대냉매 방식의 열교환기인 증발기의 표면온도가 빙점이하로 되면 증발기 표면에는 습공기중의 물분자가 응축 동결된 서리가 생성되게 된다. 이 서리는 시간에 따라 성장하게 되어 공기 유동통로의 축소와 서리층에 의한 열저항으로 냉동기, 열펌프의 성능을 저하시키게 되고, 방치하면 압축기를 손상시키게 된다.

서리성장에 관한 연구는 지난 50여년간 다양한 냉각판 형상 및 성장환경에 대해 다수의 연구자에 의해 연구되어 왔다.<sup>(1-3)</sup> 평행평판형에 대해서

\* 정회원, 경기공업대학 공조냉동과  
\*\* 정회원, 서울대학교 기계공학과

는 Brian 등<sup>(4,5)</sup>, Yamakawa 등<sup>(6)</sup>, O'Neal과 Tree<sup>(7)</sup>, Östin과 Andersson<sup>(8)</sup>, 이관수 등<sup>(9)</sup>이 있다. 평판형에 대해서는 Yonko와 Sepsy<sup>(10)</sup>, Trammell 등<sup>(11)</sup>, Abdel-Washed 등<sup>(12)</sup>, Tokura 등<sup>(13)</sup>이 있다.

본 연구는 평판형 코일(flat plate finned coil)의 최적 제상을 위한 기초연구로 80% 이상의 열전달면적을 갖는 평판형의 내부유동을 평행유동으로 가정하여 한 개의 평행평판에 대한 서리성장을 모사실험한 것으로, 공기 노점온도가 0°C 이하의 층류유동 조건하에서 서리성장 환경변수인 냉각판 온도, 습도, 공기 온도 및 냉각판 위치에 대해 실험 연구하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 실험장치는 크게 온습도를 조절하는 항온항습실(climate chamber), 서리성장 및 측정을 위한 시험부(test section)와 밀폐로(closed loop)를 순환시키게 하는 공기 구동부(blower chamber)로 구성되어 있다.

항온항습실은 두께 10mm의 투명 아크릴판으로 길이 1.2m, 높이 0.8m 폭 0.8m의 크기로 만들어졌고, 외부는 두께 30mm인 아이소핑크 단열재로 단열처리한 후 두께 5mm인 은박 스티로폼 테이프로 마감하였다. 항온항습실 내부에는

온도조절을 위한 냉동코일과 흰부착 공기히터(finned air heater), 가습을 위한 진동판형 가습기와 냉동코일에 부착된 축류송풍기(axial fan)형 교반기(stirrer)로 구성되어 있다. 냉동코일은 항온항습실 하부에 위치한 R-22 냉매를 사용하는 표준냉동용량 3kW 냉동기의 증발기이다. 흰부착 공기히터는 슬라이덱스와 PID 제어형 온도조절기를 이용하여 공기온도를 제어한다.

시험부는 냉각판과 전후의 층류유동 생성을 위한 라미네이터(flow laminator)로 구성되어 있고, 평행평판 공기유동 통로는 폭 10mm, 높이 164mm이다. Fig. 2는 시험냉각판의 개략도를 나타낸 것으로, 전체 냉각판의 크기는 276mm, 높이는 164mm이고, 냉각판은 3개의 냉각모듈로 구성되어 있다. Fig. 3은 냉각모듈의 개략도로 Peltier 효과를 이용한 가로 62mm 세로 62mm 두께 6.2mm의 열전자 냉동소자를 이용한 냉각모듈의 구성 및 크기를 나타낸 것이다. 냉각판에는 6개의 열전자 냉동소자가 사용되었다. 냉각판 반대편에는 두께 15mm의 투명 아크릴판에 서리두께 측정을 위한 마이크로미터와 서리 표면온도 측정을 위해 적외선 온도계가 각각의 냉각모듈 중심부에 설치되어 있다. 냉각판 내의 열전자 냉동소자용 직류전원은 300A 용량의 직류전원 공급장치에 의해 공급되고, 각각의 냉각모듈의 입력전력을 PID온도제어기에 의해 제어 된다. 열전자 냉동소자의 고온측의 냉각은 냉각자켓 내에 2차 냉매를 순환시켜 냉각시키는데, 2차냉매는 R-502

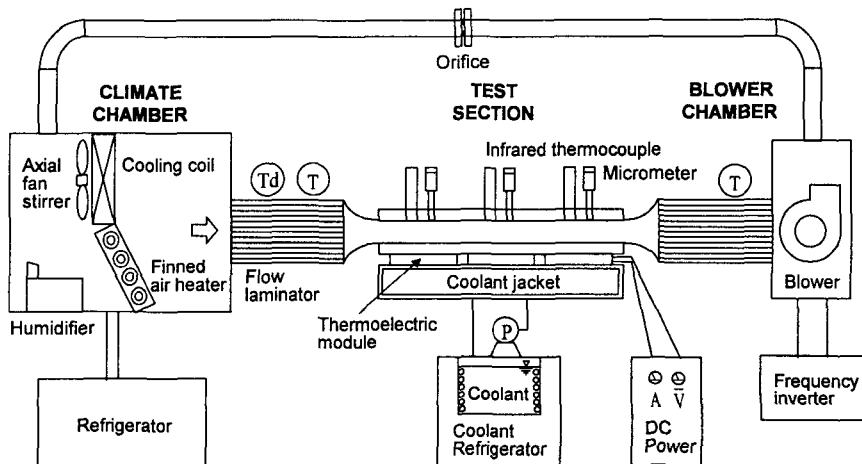


Fig. 1 Schematic experimental apparatus.

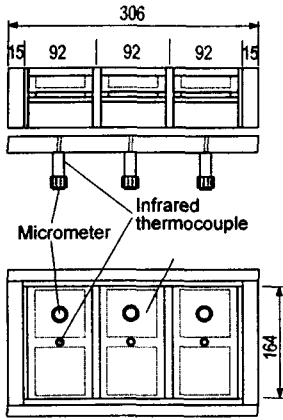


Fig. 2 Test section.

용 1kW급 전용 냉동기와 순환펌프에 의해 2차 냉매 냉각부와 시험부의 냉각판을 순환한다.

공기구동부 내에는 전향익형 다익 송풍기가 직렬로 2대 설치되어 있다. 공기풍량은 대수제어와 주파수 변조기(frequency inverter)에 의해 송풍기의 RPM을 제어하여 얻는다. 공기구동부에서 토출된 공기는 직경 50mm의 투명 아크릴판을 통해 원래의 항온항습실로 되돌아 가고, 투명 아크릴판 중간의 오리피스(Sharped edged orifice) 유량계를 이용하여 공기유량을 측정한다. 서리두께를 제외한 모든 계측값은 데이터로거에 수집되고 GPIB통신에 의해 30초 간격으로 PC에 기록된다.

2.2 실험방법

2.2.1 측정위치

3개의 냉각판 중앙에서 서리두께, 서리표면온도, 에너지전달율을 측정한다. 측정위치는 61, 153, 245mm이고, 전면(front), 중앙(middle), 후면(rear)으로 나타낸다.

2.2.2 서리두께

서리두께의 측정은 냉각모듈(cooling module) 중앙에 관통되어 설치된 마이크로미터를 이용하여 매 20분 간격으로 측정한다. 측정은 하부에서 비쳐진 불빛이 보이지 않을 때의 길이를 3회 반복하여 평균값을 구한다.

2.2.3 서리표면 온도

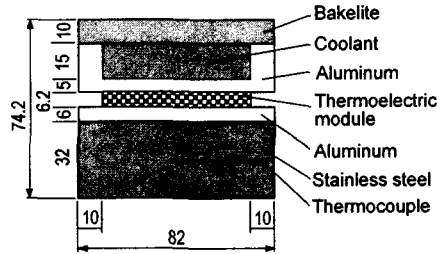


Fig. 3 Cooling module.

서리표면 온도는 냉각모듈(cooling module) 중앙에 관통되어 설치된 적외선 온도계의 출력값을 30초 간격으로 측정한다. 적외선 온도계의 출력 전압은 냉각판에 원형의 얇은 흑체를 부착하고 서리성장이 안되는 온도범위에서 냉각판의 열전대의 온도와 적외선 온도계의 출력전압과의 관계식을 도출하여 온도값을 얻는다. 서리의 방사율에 의한 온도보정을 위해 Yamakawa<sup>(6)</sup>의 서리의 방사율 0.98을 사용하였다.

2.2.4 에너지전달율 및 서리 유효열전도계수

냉각판으로의 열 및 물질전달에 의한 에너지전달율은 두께 32mm 스테인레스 304의 열전도계수값과 두께방향으로 심어진 T형 열전대의 온도차를 이용하여 열전도식에 의해 계산한다. 서리 유효열전도계수는 서리표면 온도와 냉각판온도차, 에너지전달율, 서리두께에 의해 계산된다.

2.2.5 단위면적당 착상량 및 서리밀도

단위면적당 착상량 및 서리밀도는 3시간의 착상시간이 경과한 후 전면, 중앙, 후면의 3개의 냉각판에 성장된 서리를 각각 끊어서 마이크로 저울로 무게를 측정하고, 착상면적과 서리두께에 의해 계산한다.

2.2.6 실험준비

공기온도, 공기습도, 냉각판온도, 공기유량을 정상상태로 만든 후 실험 준비과정 중에 냉각판 표면에 착상되는 것을 방지하기 위해 냉각판을 덮은 알루미늄 박판 피복을 제거한 후 실험을 개시한다. 실험중 공기유량은 일정하게 유지하여 레이놀드수가 일정하도록 한다.

### 3. 결과 및 분석

냉각판 위치에 따른 전형적인 측정결과로 Fig. 4는 서리두께 변화, Fig. 5는 무차원 서리표면온도, Fig. 6은 3시간 착상후의 단위면적당 착상량과 서리밀도, Fig. 7은 열 및 물질전달에 의한 에너지전달율, Fig. 8은 서리의 유효열전도계수를 나타낸 것이다. 서리두께 및 서리표면온도는 시간에 따라 증가하는 경향을 보였고, 냉각판 전면부에서 후면부보다 크게 나타났다. 착상량 및 서리밀도도 전면부에서 높게 생성되었다. 이것은 유동입구 길이가 작을수록 열 및 물질전달계수가 커지고, 이에 따라 서리성장도 증대된 것이다. 에너지전달율은 서리층에 의한 열저항으로 점차 감소하였고, 서리의 유효열전도계수는 착상초기의 얼음기둥(ice crystal coulum) 생성에 따른 국소

와류영향(local eddy effect)으로 크게 되었다가, 얼음기둥 사이에 서리가 채워지면서 와류영향이 감소하면서 급격히 감소하였다고 생각된다.

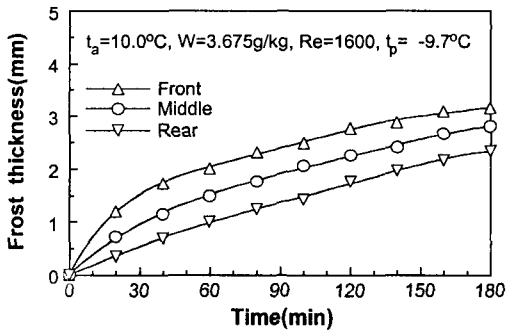


Fig. 4 Variation of frost thickness with time for the longitudinal locations.

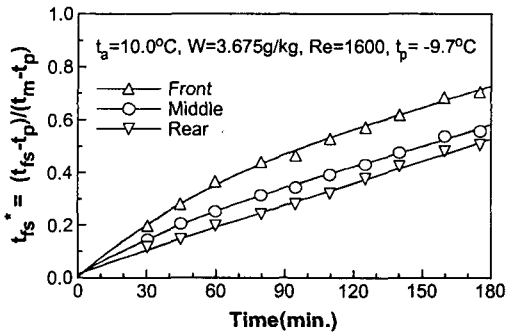


Fig. 5 Variation of dimensionless frost surface temperature with time for longitudinal locations.

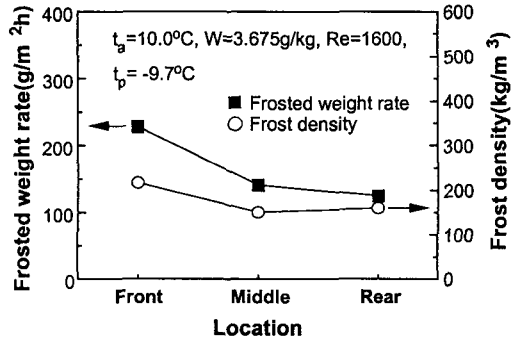


Fig. 6 Variation of frosted weight rate and frost density along the plate after 3 hours run.

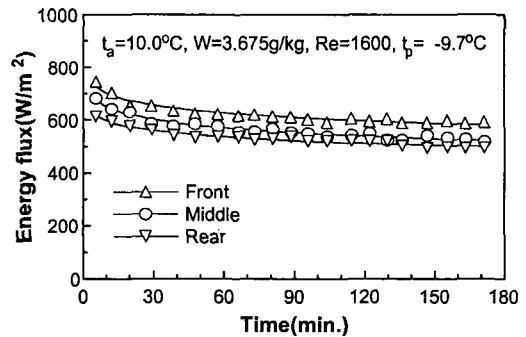


Fig. 7 Variation of energy flux with time along the plate.

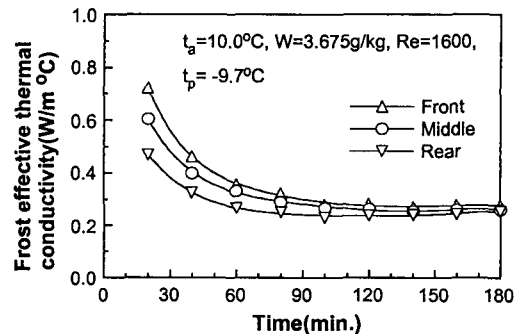


Fig. 8 Variation of frost effective thermal conductivity along the plate.

다음은 서리성장 환경변화에 대한 서리성장 특성에 대해 서술한다. Fig. 9는 냉각판 온도변화에 대한 서리두께를 냉각판 전면과 후면에 대해 비교한 것이다. 냉각판 온도가 낮은 경우가 서리성장은 크게 나타났고, O'Neal과 Tree<sup>(7)</sup>, 이관수 등<sup>(9)</sup>, Yonko와 Sepsy<sup>(10)</sup>, Abdel-washed 등<sup>(12)</sup>과 같은 결과를 얻었다. Fig. 10은 서리표면 온도변화를 나타낸 것으로 착상시간에 따라 증가하는 경향을 보였고, 냉각판 온도가 낮은 경우의 초기 서리표면 온도 상승률이 큰 것을 알 수 있었다. 이 구간에서의 Fig. 9의 서리두께는 두껍게 생성되었고, 이후의 증가율은 냉각판 온도변화에 거의 무관하였다. 낮은 냉각판 온도 경우의 서리성장은 초기의 낮은 서리표면온도로 서리층으로의 수증기의 물질전달량이 많아져서 서리두께가 커

지게 된다. 냉각판 온도변화에 따른 서리성장 차이는 초기의 착상 결과가 지배적으로 영향을 미치게 된다.

공기의 이슬점이 영하인 조건에서의 공기습도 변화에 대해 Fig. 11은 서리두께 변화를 나타낸 것이고, Fig. 12는 3시간 착상후의 단위 면적당 착상량과 서리밀도를 나타낸 것이다. 높은 습도인 경우가 서리두께, 착상량 및 서리밀도가 전체 냉각판에서 크게 나타났다. 냉각판 위치에 따른 서리두께 변화는 높은 습도인 경우가 작아짐을 알 수 있었고, 전면 냉각판에서 서리두께, 착상량 및 서리밀도가 보다 높게 나타났다. 공기습도가 클수록 수증기의 물질전달 구동력이 증가되어 서리성장이 크게 된 것이고, 냉각판 입구에서의 길이 작을수록 열 및 물질전달률이 증가하게 된

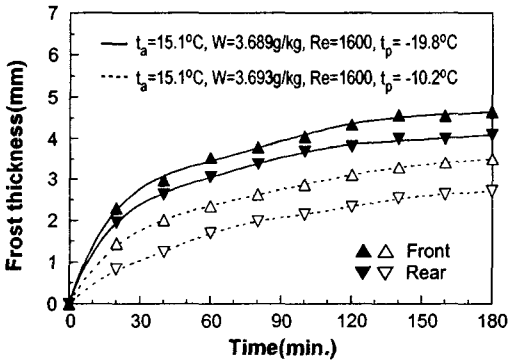


Fig. 9 Variation of frost thickness with time for the different plate temperatures.

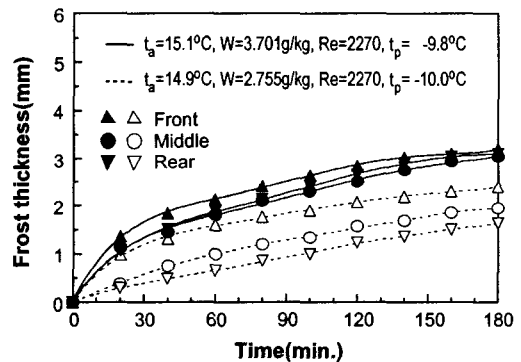


Fig. 11 Variation of frost thickness with time for the different humidity ratios.

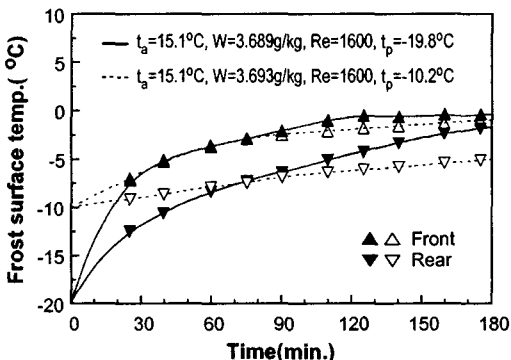


Fig. 10 Variation of frost surface temperature with time for the different plate temperatures.

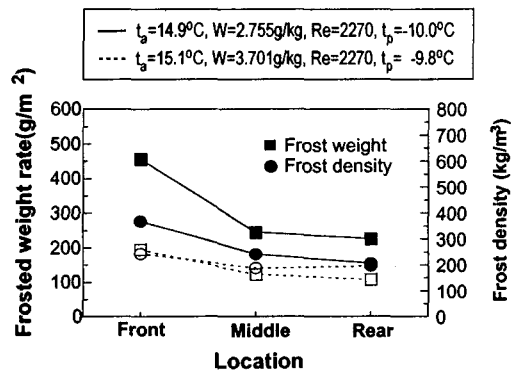


Fig. 12 Variation of frost weight per area and frost density for different humidity ratios along the plate after 3 hours run.

다. 공기의 이슬점이 영상인 기존의 실험결과와 동일한 경향을 보였다.

공기의 이슬점 0.3°C, 충류유동 조건에서 공기 온도 변화에 대해 Fig. 13은 서리두께, Fig. 14는 무차원 서리표면온도를 나타낸 것이다. 공기온도가 높은 경우에 전체 냉각판 위치에서 서리두께 및 무차원 서리표면온도가 높게 측정되었다. 공기온도에 대한 실험결과는 많지 않지만, ONeal 등<sup>(7)</sup>, Brian 등<sup>(5)</sup>은 감소한다고 하였고, Trammell<sup>(11)</sup>은 거의 무관하다고 보고하고 있다. 착상조건은 ONeal 등<sup>(7)</sup>은 공기 이슬점이 0.7°C, Re = 9800이었고, Brian 등<sup>(5)</sup>은 공기 이슬점이 2.7에서 0.9°C이고, Re = 5100~8430이었다. 기존 연구자들의 공기온도 상승에 따른 서리두께 감소는 서리표면에서 해동 및 동결(melting-refreezing)에 의한 동

적과정(dynamic process)에 의한 것으로 설명되고 있다. 본 실험에서 공기 이슬점은 0°C 이하이고, Fig. 14에서 서리표면 온도는 3시간의 착상동안 빙점이하 온도이었다. 그러므로, 해동 및 동결(melting-refreezing)에 의한 서리두께 감소 이유는 없다고 보여진다.

착상시 서리표면으로 물질전달된 물분자는 일부는 서리층 내부로 확산되어 서리밀도 증가에 기여하고, 나머지는 서리표면에 부착되어 서리두께 성장에 기여한다고 알려져 있다. 서리는 다공질체로 서리표면에서의 물분자의 표면 부착은 물분자의 상변화를 동반하는 매우 복잡한 물리현상으로 완전한 해석에 어려움이 많다. 착상현상을 크게 두가지로 나누다면 첫째, 기체상의 수증기가 서리표면에서 응축되어 액체상의 물로 되었다가 고체상의 얼음입자로 변화하는 과정과 둘째, 기체상의 수증기가 액체상의 변화 단계없이 고체상의 얼음입자로 변화하는 승화과정에 의한 과정으로 고려할 수 있다. 착상시 상기 두가지 중에서 어떤 변화과정에 의해 서리가 성장하는 가는 서리성장 환경에 따라 다르게 된다. Fig. 15는 Fig. 14의 공기온도 증가에 따른 서리두께 증가를 부연 설명하기 위해 충류유동 조건에서 수증기의 물질전달시 공기의 노점이 0°C 이상인 경우와 0°C 이하인 경우에 대해 온도경계층(thermal boundary layer)과 서리층 내부에서의 수증기의 상변화 과정의 개념도를 나타낸 것이다. 0°C 이상인 경우에는 수증기(water vapor)는 물입자(water liquid)를 거쳐 얼음입자(water ice)로 변화하고, 0°C 이하인 경우에는 수증기(water

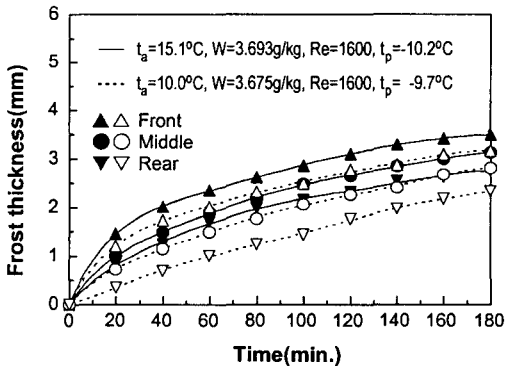


Fig. 13 Variation of frost thickness with time for the different air temperatures.

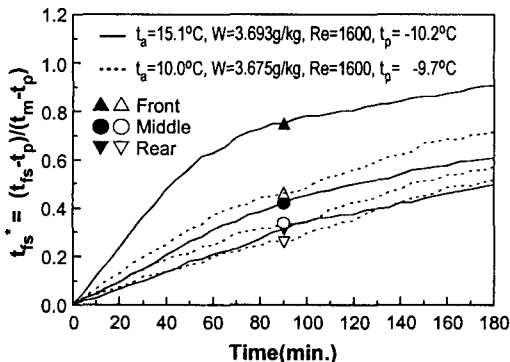


Fig. 14 Variation of dimensionless frost surface temperatures with time for the different air temperatures.

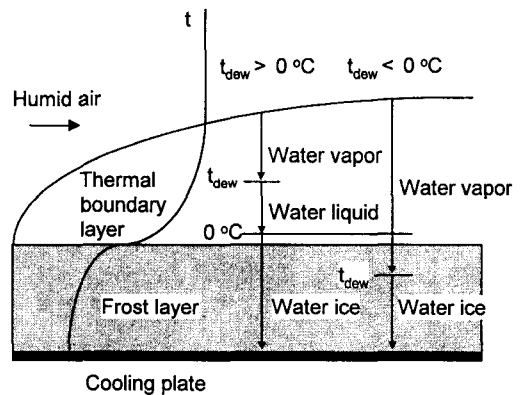


Fig. 15 Dew point effect on the frost growth.

vapor)는 얼음입자(water ice)로 상변화한다. 이 두경우에서 서리표면에서의 물분자의 상태변화는  $0^{\circ}\text{C}$  이상인 경우는 응고과정이 지배적이고,  $0^{\circ}\text{C}$  이하인 경우는 승화과정이 지배적이게 되는 확실한 차별이 있게 된다. 결국, 서리층 주변에  $0^{\circ}\text{C}$  이상인 경우는 물입자가,  $0^{\circ}\text{C}$  이하인 경우에는 얼음입자가 지배적으로 생성되게 된다. 이 입자들이 서리층에 부착될 때  $0^{\circ}\text{C}$  이상인 경우는 물입자가 서리층 내부로 흡입동결 되어 서리성장은 적어지고 밀도증가에 기여하게 된다. 반면,  $0^{\circ}\text{C}$  이하인 경우는 얼음입자는 서리층에 부착되어 서리두께 성장이 증가하게 될 것이다. 그러므로, Fig. 14에서 입구 공기온도 증가에 따른 서리두께 증가 이유는 공기의 노점이  $0^{\circ}\text{C}$  이하인 조건에서 승화과정에 의한 착상으로 사료된다. 난류유동 경우는 분자운동이 증대되고, 서리표면의 돌출된 얼음기둥(ice column)에 의한 와류생성 등의 복잡한 유동형태로 전술한 상변화 양상이 난류정도에 따라 이루어지지 않을 수 있다. Brian 등<sup>(5)</sup>의 실험조건이 이슬점이하에서 서리두께가 감소한 이유는 난류유동에 의한 것으로 사료된다.

1994년 Tao 등<sup>(3)</sup>은 시뮬레이션 결과이기는 하나 공기온도가 영도 이하에서는 공기온도 상승에 따라 서리두께가 증가한다고 보고하고 있고, 이 유로는 승화과정(sublimation-ablimation)에 의한 정상상태 서리성장으로 설명하고 있다. 즉, 본 실험에서의 공기온도 상승에 따른 서리두께 증가 이유는 승화과정(sublimation-ablimation)에 의한 정상상태 서리성장이라고 판단된다. 해동 및

동결(melting-refreezing)의 주기적 서리성장이 일어나기 이전 성장단계에서  $0^{\circ}\text{C}$  이하의 공기 노점온도 및 층류유동 조건에서 공기온도 증가에 따라 서리두께는 증가한다.

Fig. 16은 층류영역에서 공기의 레이놀즈수 변화에 대한 서리두께 성장을 비교한 것이다. 전체 냉각면에 대한 평균 서리두께는 거의 변화가 없었으나, 냉각판 앞부분과 뒷부분에서는 다소의 차이를 보였다. 레이놀즈수가 큰 경우에 서리두께 변화는 전면 냉각판에서는 감소, 후면 냉각판에서는 증가의 경향을 보였다. 일반적으로 레이놀즈수 증가에 대한 서리성장은 증가한다고 알려져 있는데 여기에는 상반되는 실험결과가 보고되었다. 평판형 냉각판에 대해서 Yonko 등<sup>(10)</sup>은 증가, Biguria 등<sup>(14)</sup>은 감소, Tokura 등<sup>(13)</sup>은 변화없다고 하였다. 평행평판에 대해 Brian 등<sup>(4)</sup>은 감소, Yamakawa 등<sup>(6)</sup>, O'Neal 등<sup>(7)</sup>, 이관수 등<sup>(9)</sup>은 증가한다고 보고하고 있다. 이와 같은 상반된 실험결과로 보아 서리두께 성장에는 다수의 인자들이 복잡한 물리적 상호작용을 하고 있다고 사료된다. 일반적으로 서리두께 증가의 요인으로 물질전달계수와 구동력 증가가 알려져 있고, 감소 요인으로는 서리표면에서의 해동(melting)현상이 있다. 본 실험조건에서 서리표면온도는 물의 빙점이하 온도이므로 해동현상에 의한 두께감소는 없고, 서리두께 감소요인으로 레이놀즈수 증가에 따른 서리표면에서의 마찰저항과 돌출된 얼음기둥의 항력(drag force)의 증가로 서리성장이 억제된 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

층류유동, 공기 노점온도가  $0^{\circ}\text{C}$  이하의 조건에서 단면냉각 평행평판 유동경우의 냉각판 위치 및 환경변화에 대해 서리성장 특성에 관해 살펴 보았다. 본 실험 조건하에서의 실험결과는 다음과 같다.

(1) 냉각판 입구에서의 길이가 작은 전면 냉각판에서 서리두께, 착상량 및 서리표면온도가 크게 측정되었다. 그러므로, 냉동용 열교환기의 성능저하에 입구영역에서의 서리성장이 영향을 크게 미침을 알 수 있다.

(2)  $0^{\circ}\text{C}$  이하의 공기 이슬점 온도 조건에서 냉각판 온도가 낮을수록 공기습도가 높을수록 서리

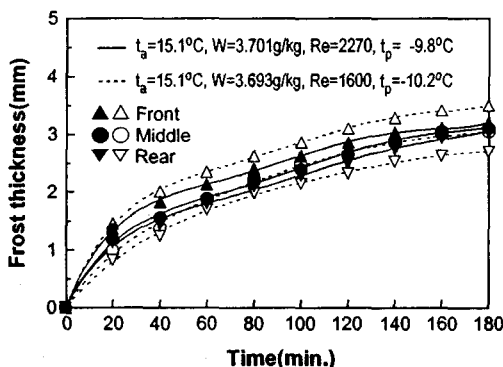


Fig. 16 Variation of frost thickness with time for the different Reynolds number.

두께가 증가하였다.

(3) 낮은 냉각판 온도 경우에 초기 서리표면 온도가 크고, 초기 서리성장이 서리두께 증가에 지배적으로 영향을 미친다.

(4) 해동 및 동결(melting-refreezing)의 주기적 서리성장이 일어나기 이전 성장단계에서 0℃ 이하의 공기 노점온도 및 충류유동 조건에서 공기 온도 증가에 따라 서리두께는 증가한다

(5) 충류유동 영역에서 레이놀즈수 변화에 대해 평균 서리두께는 거의 변화가 없었으나 냉각판 위치에 따라 다소 차이가 있다.

### 후 기

본 연구는 서울대학교 터보동력기계연구센터의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 깊은 감사사를 드립니다.

### 참고 문헌

1. O'neal, D. L., and Tree, D. R., 1985, A review of frost formation in simple geometries, ASHRAE Trans., Vol. 91, Pt. 1, pp. 267-281.
2. Padki, M. M., Sherif, S. A. and Nelson, R. M., 1989, A simple method for modeling the frost formation phenomenon in different geometries, ASHRAE Trans., Vol. 95, pp. 1127-1137.
3. Tao, Y. -X, Mao, Y. and Besant, R. W., 1994, Frost growth characteristics on heat exchanger surfaces: measurement and simulation studies, J. of ASME, HTD-Vol. 286, pp. 29-38.
4. Brian, P. L. T., Reid, R. C. and Brazinsky, I., 1969, Cryogenic frost properties, Cryogenic technology, Vol. 5, No. 5, pp. 205-212.
5. Brian, P. L. T., Reid, R. C. and Shah, Y. T., 1970, Frost deposition on cold surfaces, I&EC Fundamentals, Vol. 9, No. 3, pp. 375-380.
6. Yamakaya, N., Takahashi, N. and Ohtani, S., 1972, Forced convection heat and mass transfer under frost conditions, Heat transfer-japanese research, Vol. 1, No. 2, pp. 1-10.
7. O'Neal, D. L. and Tree D. R., 1984, Measurement of frost growth and density in a parallel plate geometry, ASHRAE Trans., Vol. 91, Pt. 2, pp. 278-290.
8. Östin, R. and Andersson, S., 1991, Frost growth parameters in a forced air stream, Int. J. of Heat Mass Transfer, Vol. 34, No. 45, pp. 1009-1017.
9. 이관수, 이태희, 김우승, 1994, 저온 수직 평판에서의 착상에 대한 운전조건 영향, 대한기계학회 논문집, 제18권, 제12호, pp. 3305-3311.
10. 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, Pt. 2, pp. 1.1.1-1.1.10.
11. Trammell, G. J., Caterbury, J. and Killgore, E. M., 1967, Heat transfer from humid air to horizontal flat plate held at sub-freezing temperatures, ASHRAE Trans., Vol. 73, Pt. 1, pp. IV.3.1-IV.3.6.
12. Abdel-washed, R. M., Hifni, M. A. and Sherif, S. A., 1984, Heat and mass transfer from a laminar humid air stream to a plate at subfreezing temperature, Int. J. Refrigeration, Vol. 7, No. 1, pp. 49-55.
13. Tokura, I., Saito, M. and Kishinami, K., 1988, Prediction of growth rate and density of frost layer developing under forced convection, Wärme- und Stoffübertragung 22, pp. 285-290.
14. Biguria, G. and Wenzel, L. A., 1970. Measurement correlation of water frost thermal conductivity and density, I&EC Fundamentals, Vol. 9, No. 1, pp. 129-138.