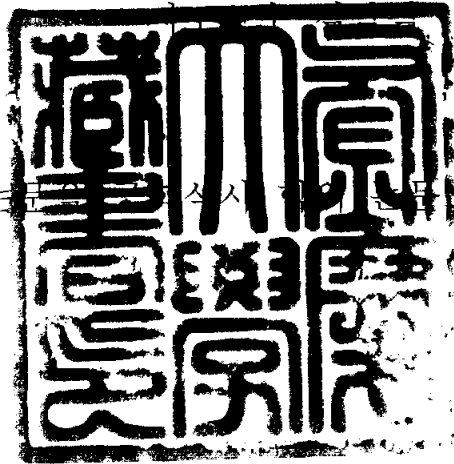


719
3-1-5-
2
=2

공 학 석 사 학 위 논 문

냉동실 내의 착상현상 최소화 및 정량화를
위한 결빙 메카니즘에 관한 연구

이 논문은 공학 석사 학위 논문으로 제출함



2003년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

자 동 차 공 학 과

김 상 현

김상현의 공학석사 학위 논문을 인준함

2002 년 12 월

주 심 공학박사 배 대 석



위 원 공학박사 김 남 식



위 원 공학박사 이 연 원



목차

Abstract

I. 서론	1
II. 실험 장치	2
1. 윈드 터널	2
2. 항온 항습실	5
III. 착상 개념 및 풍동실험 결과	6
1. 착상의 개념	6
2. 서리층 성장의 원리	9
3. 풍동실험 결과	11
IV. 냉장고 현황 파악	15
1. 착상 발생 위치 파악	15
2. 시료 냉장고 특성 파악	16
3. 수치해석	24
3.1 지배방정식 및 계산 모델	24
3.2 냉동실 내부공간의 유동분포	27
3.3 벽면 근처의 유동분포	30
4. 결빙 메커니즘 정량화	37
V. 결론	43

A Quantification of the freezing mechanism for the improvement of Frosted Amount in a Freezer

sang-hun kim

***Department of Automotive Engineering, Graduate School,
Pukyong National University***

Abstract

The purpose of this study is to reduce the Frosted Amount in a Freezer. To find out the freezing phenomena in a domestic refrigerator, a computational simulation and practical experiment were accomplished. A basic experiment for a vertical plain plate was performed in a wind tunnel to find out the influence of frost factors on the environment under the normal conditions of 30°C with 87% humidity.

These basic studies of freezing, sublimation, and evaporation were performed. With result, the freezing mechanism was obtained, applicable to a domestic refrigerator, and the quantification of the freezing amount was also made under high temperature and humidity. To reduce the frost development, followings should be done.

1. Inlet air should be minimized.
2. Wetted air after defrosting should be blocked.

I. 서론

냉장고는 F실(냉동실), R실(냉장실) 그리고 냉장고 뒷면 하부에 위치한 기계실로 구성되는데, 일반적으로 F실은 -18°C , R실은 $+3^{\circ}\text{C}$ 로 유지되며 외기 온도 $+30^{\circ}\text{C}$ 습도 87%에 대비하여 냉장고 정상 작동 시 항상 일정한 온도를 유지하도록 설계되어져 있다. 그러나, 저온에서 이루어지는 공기 조화와 냉동 산업이 직면하고 하고 있는 가장 큰 문제는 열교환기 표면에서 일어나는 착상 현상이다. 냉장고 도어 개폐에 따른 외부 공기 유입에 의해서 또는 도어 밀폐시 외부 습공기의 침입에 의해서 냉장고에서 발생하게 되는 착상은 열교환기 냉각 표면에 부착하여 공기와 열교환기 사이에 열저항으로 작용하여 열전달량을 감소시킬 뿐만 아니라, 열교환기 내의 공기유동 단면을 축소시켜 전체적인 냉동 시스템 성능 저하를 가져오고 압축기의 손상을 가져온다.

따라서 본 연구는 착상, 승화 및 증발에 관한 기초연구를 수행함과 아울러 냉동실 벽면의 단순한 형태인 평형평판에 대해서 풍동 실험을 행하여 결빙 인자의 영향을 파악하였다. 또한 실제 냉장고에 적용하여 결빙 메커니즘을 정립하였고 착상에 대한 정량화를 시도하였다.

II. 실험 장치

1. 풍동 실험

서리 성장에 관한 연구는 지난 50여년간 다양한 냉각판 형상 및 성장 환경에 대해 다수의 연구자에 의해 연구되어 왔다. 하지만 실제 냉장고 내부는 형상이 복잡하여 불균일한 유동장을 가지고 있음 알 수가 있다. 따라서 냉동실내의 실제 실험에 앞서 냉동실 벽면의 단순한 형태인 평형 평판에 대해서 풍동 실험을 행하여 각 결빙 인자의 영향을 알아보기 위해서 실험을 실시하였다.

Fig. 1은 착상 실험을 위해 자체적으로 제작한 폐회로 풍동 장치이며 각 부분을 독립적으로 제어하여 다양한 실험조건에 부합될 수 있도록 제작하였다. 이 실험 장치는 실험 목적에 따라 여러 가지 형태의 시험부를 장착하여 착상 현상을 관찰 할 수 있도록 하였으며, 송풍기의 회전수를 변화시켜 공기의 유량을 조절할 수 있는 순환부, 유동공기의 온도 및 습도를 제어 할 수 있도록 항온항습실과 귀환 사이클을 이루며, 시험 열교환기의 온도를 조절하는 냉각부로 구성되어 있다.

시험부는 평판 위에서 일어나는 착상 현상을 시각적으로 관찰할 수 있도록 두께 5mm 투명한 아크릴 수지판을 사용하여 $300 \times 300 \times 300 \times (L \times H \times W)$ 의 크기로 제작하였다. 그리고 시험부와 외부를 단열 시키기 위하여 시험부의 모든 부분에 두께 10mm의 발포 폴리에틸렌을 부착하였다. 순환부는 항온항습실에서 온도 및 습도가 제어된 습공

기를 시험부로 유입시키고, 시험부로부터 유출되는 공기를 항온항습실로 귀환시킨다. 순환부의 내부에 길이 300mm, 폭 300mm의 하니컴을 시험부로부터 100mm, 500mm 전에 설치하여 시험부로 유입되는 공기의 유동을 균일하게 만들었다. 팬에 인버터를 설치하여 팬의 회전수를 변화시켜 순환부를 순환하는 공기의 유량을 조절하였다. C-Type 열전대(Φ 0.2)를 설치하여 시험부 평판의 온도를 측정하였으며, 시험부 입구의 온도, 풍속 및 습도는 Air Velocity Meters(TSI,8383A)를 사용하여 측정하였으며, 이러한 값들은 Data Logger를 통하여 컴퓨터에서 처리하도록 구성하였다.

냉각부는 시험부내에 있는 열교환기의 온도를 설정온도로 유지하기 위하여 냉매를 냉각시키는 냉동기와 냉매를 순환시키는 펌프로 구성되어 있다. 이때 냉동기는 3마력이며 작업냉매는 R502이다.

실험조건은 고온, 고습인 여름철을 기준으로 하여 주위온도 30℃, 상대습도 87%를 기준으로 하였다. 본 연구에서는 공기측의 풍속은 냉장고의 냉동실 그릴팬의 풍속을 기준으로 하여 최소 0.3m/s, 최대 3m/s까지 측정하였다. Fig. 2는 시험부의 상세도를 나타내며, 그림과 같이 시험부 평판에 전면부와 후면부에 각각 5개의 열전대를 장착하여 온도를 측정하여, 평균값을 취하도록 하였다. 또한, 탈착이 용이하도록 제작하여 착상량을 측정하였다.

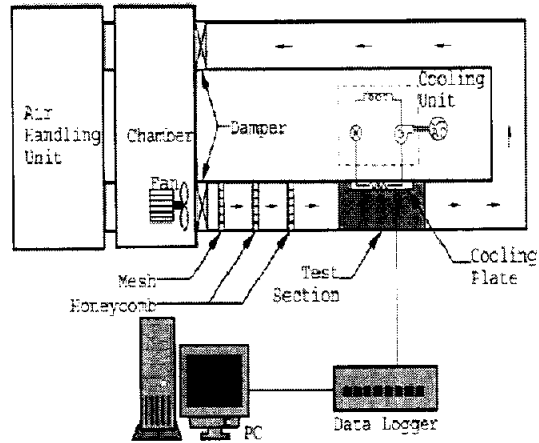


Fig1. Schematic experimental apparatus of wind tunnel

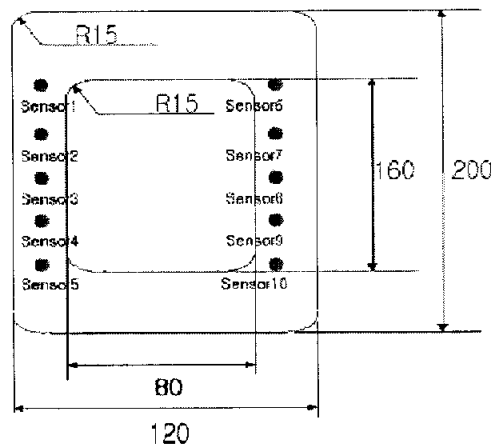


Fig2. Thermocouple location in the cooling plate

2. 항온 항습실

냉동실 내의 상태를 측정하기 위하여 주위 온도 및 습도를 일정하게 유지하기 위해 공기의 온도 및 습도를 조절하는 항온 항습실(Fig. 3)을 나타내고 있으며, 3대의 시료 냉장고가 동시에 측정 가능하도록 제작되어져 있다. 가습량 조절을 위해 원심식 가습기(H250)을 사용하였으며, 냉장고 내에 온도를 파악하기 위해 센서를 부착하였으며 외부에 설치한 Yokogawa사의 HR2500E 데이터 로거에 연결해서 자료를 수집하였다.

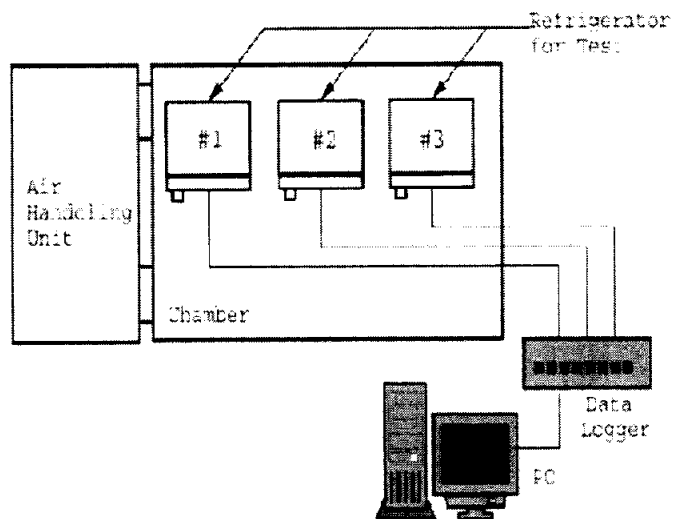


Fig. 3 Experimental apparatus of air chamber

III. 착상 개념 및 풍동실험 결과

1. 착상개념

Fig. 4는 착상의 개념을 나타내고 있다. 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 하는 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.

총 열전달(Q)

=현열전달(Q_s)+ 잠열전달(Q_l)

$$= h_h \cdot A \cdot (T_a - T_{f,s}) + \dot{m}_f \cdot L_H \quad C_{p,h}$$

$$\text{착상률}(\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_f}) = h_m \cdot A \cdot (w_a - w_{f,s})$$

여기서

h_h =열전달계수[W/ $M^2 \cdot ^\circ C$]

h_m =물질전달 계수[kg/ $M^2 \cdot s$]

L_H =수증기의 승화잠열[J/kg]

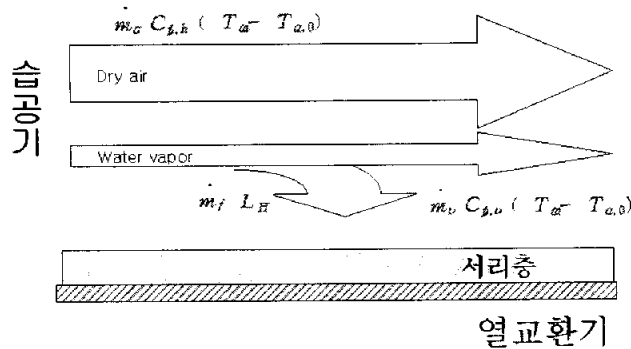


Fig4. Frosting conception

착상 현상을 파악하기 위해서는 서리층의 성장과정을 이해하는 것이 중요하다. Fig. 5는 서리의 성장과정을 나타내고 있으며 냉각면 온도, 공기 유속, 공기 온도와 습도 등에 많은 영향을 가지고 있다. 특징을 보면 결정 성장기, 서리층 성장기, 서리층 성숙기로 나눌 수 있다5).

첫번째로, 결정 성장기에는 공기의 수증기 분압과 표면의 포화 수증기 분압차가 상변화의 추진력으로 작용하여 서리의 핵이 형성되고 서로 다른 공간적 형태를 갖는 결정들이 성장하여 처음으로 얇은 서리층이 저온 열원면을 덮는다. 그 후, 수증기는 농도구배가 큰 쪽으로 쉽게 모이므로

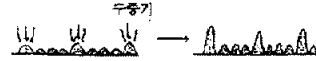
일정한 간격으로 생성된 서리 결정들 위에 집중적으로 수증기가 착상되며, 서리층 표면과 수직한 방향으로 서리 기둥을 형성하면서 서리층은 일차원적으로 성장한다. 이 때 물질전달률이 낮을수록 서리 기둥들 사이의 간격은 좁아지고 성장율은 감소한다. 이 기간 동안 서리 밀도는 핵의 수에 의해서 결정된다.

두번째로, 서리층 성장기에는 결정 성장기에 형성된 서리 기둥이 기둥상단부에 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 일차원저금로 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.

세번째로, 서리층 성숙기에는 서리층 표면 온도가 0℃에 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 변화게 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

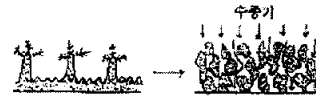
□ 결정 성장기

- 서리층의 결정 성장
- 주상형 결정구조
- 서리층의 두께 증가



□ 서리층 성장기

- 방사형 결정구조
- 서리층의 밀도 증가



□ 서리층 성숙기

- 수막형성→침투→결빙→착상의 주기적인 반복과정

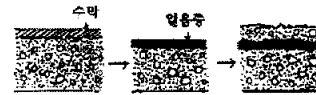


Fig5. Frost growth process

2. 서리층 성장의 원리

습공기와 sodrraus 사이의 수증기 압 차이로 인하여 냉각면으로 전달된 수증기는 상변화를 일으키면서 냉각면 위에 서리층을 형성한다. 습공기로부터 냉각면으로 전달되는 수증기의 질량 유속은 습공기의 서리층 표면의 절대습도의 차이, 그리고 , 물질전달 계수의 곱으로 나타나며 식으로 표현하면

$$\dot{m}_f = h_m (cw_a - w_{fs})$$

여기서

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

cw_a : 공기의 절대 습도 [kg_w/kg_a]

w_{fs} : 서리층 표면의 절대 습도 [kg_w/kg_a]

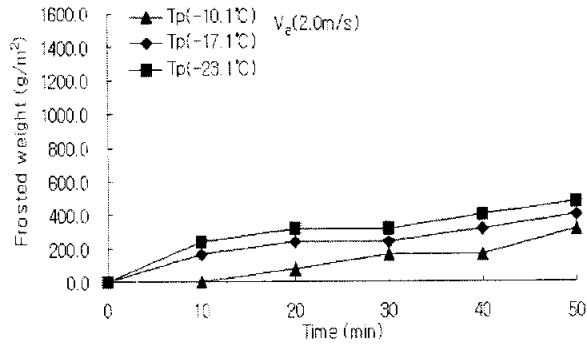
이 때, 물질 전달계수 h_m 는 공기의 유속과 열교환기의 형상 및 위치의 함수이다. 그리고, 서리층 표면의 습도 w_{fs} 는 서리층 표면 온도에서의 포화습도이다. 이 식에서 알 수 있듯이 착상은 공기와 서리층 표면사이의 습도 차이에 의해 일어나므로, 서리층의 성장에 따라 서리층의 표면 온도가 증가하면 물질 전달의 추진력이 감소되어 수증기의 질량유속 또한 작아진다. 즉, 서리층은 그 표면 온도가 낮은 착상 초기에 빠르게 성장하고, 그 이후에는 서리층의 표면 온도가 계속 증가하여 성장 속도는 둔화된다. 서리층의 성장 속도는 열교환기의 위치에 따라 다르게 나타나는데 이것은 열교환기의 위치에 따라 공기 중에 포함된 수증기의 양이 변화하고, 위치에 따라 물질전달계수도 함께 변화하기 때문이다.

3. 풍동실험 결과

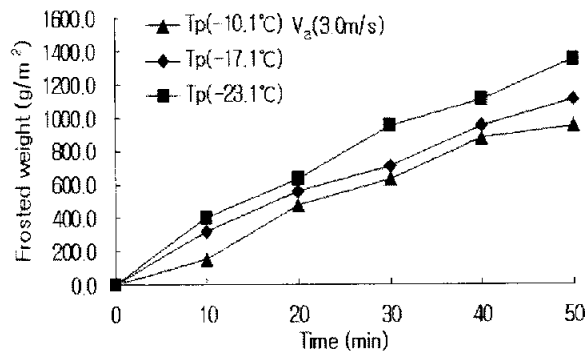
Fig. 6은 풍동 실험장치에서 행하여진 평행평판 위의 실험결과로써 고온 고습도 조건하에서 입구공기의 유속이 일정할 때 냉각면 온도에 따른 착상량의 시간경과 변화를 나타내고 있다. 착상량은 냉각면의 온도가 낮을수록 증가하며 또한, 입구공기의 속도가 빠를수록 착상량의 증가율이 높다는 것을 알 수 있다.

공기중의 수증기가 물의 삼중점이하의 조건에서 저온 냉각면의 표면에서 얼음으로 상전이 하는 현상을 승화응결이라고 부르며, 노점온도가 0℃ 이상인 경우는 응고과정이 지배적이며, 물입자가 서리층 내부로 흡입동결되어 서리성장은 적어지고 밀도증가에 기여하게 된다. 반면, 노점온도가 0℃ 이하인 경우에는 승화과정이 지배적이며, 얼음입자가 서리층에 부착되어 서리두께 성장이 증가하게 된다.

본 실험조건에서는 서리 표면온도는 물의 빙점이하 온도이므로 승화과정에 의한 서리두께 성장으로 인하여 착상량이 증가하였다고 사료된다.



(a) $V_a = 2.0 \text{ m/s}$

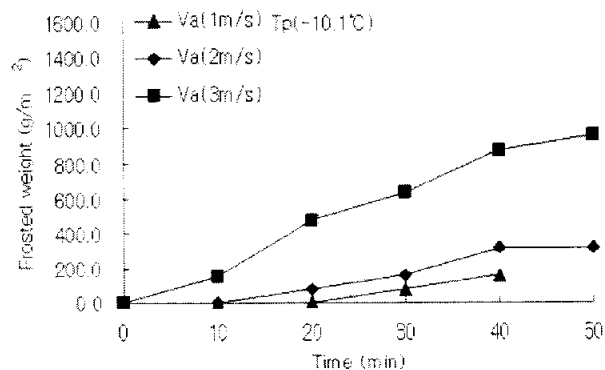


(b) $V_a = 3.0 \text{ m/s}$

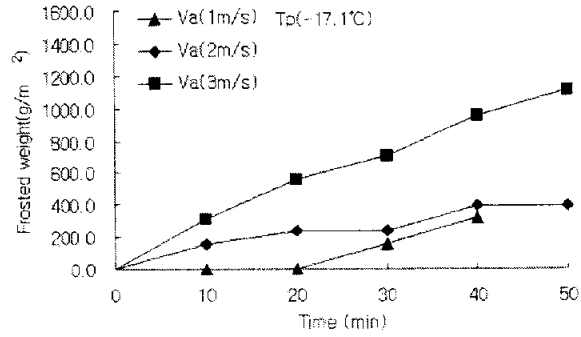
Fig6. Variation of frost weight with time history
for the different cooling plate temperatures

Fig. 7은 고온 고습도 조건하에서 냉각면의 온도가 일정할 때 입구공기의 유속에 따른 착상량의 시간경과 변화를 나타내고 있다. 착상량은 입구공기 유속이 빠를수록 시간이 경과함에 따라 높은 값으로 증가하였다. 입구공기의 유속 증가는 서리층의 성장을 촉진시켜서 얼음기둥(ice crystal column)을 생성하며, 이로 인하여 와류(local eddy)가 생성되어 초기에는 열전달이 촉진되어 착상속도가 증가하지만, 시간이 증가함에 따라 얼음기둥(ice crystal column) 사이가 채워지면서 얼음기둥(ice crystal column)에 의한 항력(drag force) 및 서리층 표면에서의 마찰저항(friction force)의 증가로 인하여 대류에 의한 열 및 물질전달이 둔화되어 서리층 성장이 감소하게 된다.

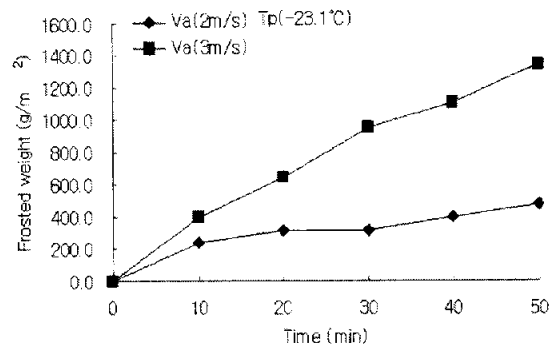
본 실험조건에서는 입구공기의 유속 증가에 따른 서리층의 성장으로 인하여 얼음기둥(ice crystal column)이 생성하여 이로 인하여 와류(local eddy)가 생성되어 대류에 의한 열 및 물질전달이 촉진됨으로써, 착상량이 증가하였다고 사료된다.^{2~21)}



(a) $T_p = -10.1^\circ\text{C}$



(b) $T_p = -17.1^\circ\text{C}$



(c) $T_p = -23.1^\circ\text{C}$

Fig7. Variation of frost weight with time history for the different air velocities

IV. 냉장고 현황 파악

1. 착상 발생 위치 파악

우선 냉장고의 착상이 많이 일어나는 곳을 확인하고 그 원인을 밝히기 위한 기초작업으로서, 시료 냉장고의 결빙실험을 행하였다.

Fig. 8은 실험 결과를 근거하여 착상의 가능 위치를 나타내고 있으며, 냉동실내에서 착상의 위험이 큰 위치로는, 그릴팬의 각 토출구 주위, Lamp cover 후연부 및 좌측, 선반 전면부으로 나타났다.

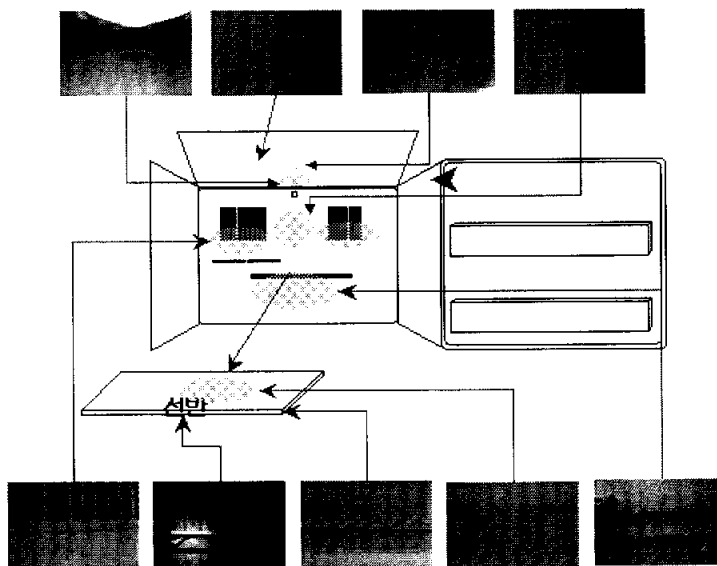


Fig8. Frosting positions

2. 시료 냉장고 특성 파악

시료 냉장고의 운전 상태를 파악하기 위하여, 압축기의 정상운전 상태 (정지 및 가동)와 도어를 개방했을 때, 그리고 제상 냉동실의 벽면 온도 변화를 측정하였다.

측정방법은 압축기가 가동 및 정지한 직후에 1분간 개폐를 하였으며, 실험 시작후 8시간, 10시간, 12시간경에 개폐를 하였다. 또한, 온도 측정위치는 그릴팬(9 point), 상부(9 point), 우측(9 point), 좌측(9 point), 선반(9 point), 도어(6 point)에 각각 센서를 부착하였으며, 이때의 챔버 평균온도 및 습도는 30℃, 87%였다. Fig.8은 압축기 운전에 따른 증발기의 온도 변화를 나타내고 있다. 그 결과로써, 현 시료 냉장고는 정상적으로 작동하고 있음을 알 수 있었으며 또한, 압축기가 가동한 직후의 온도는 압축기가 정지한 직후에 도어 개방하였을 때보다 냉동실의 온도가 낮음을 알 수 있었다. 이러한 이유로, 압축기가 가동한 직후에 열손실은 압축기가 정지한 직후에 냉동실을 냉각시킨 것보다 적기 때문이라고 사료된다.

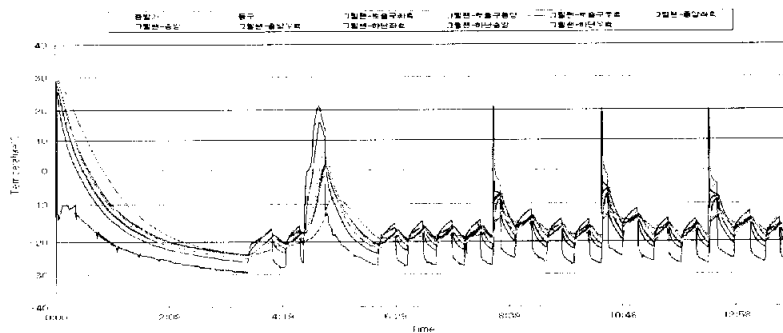
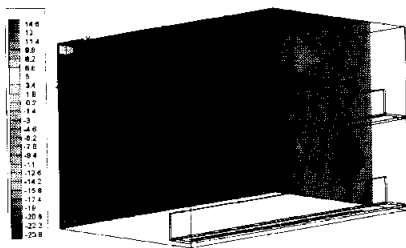


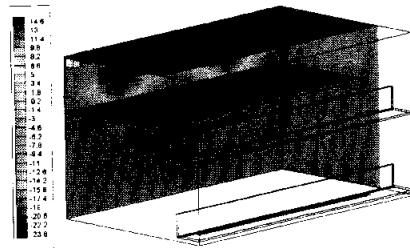
Fig. 8 Temperature distribution with time history in evaporator

Fig.9, 10, 11은 Fig. 8의 (A)에서의 시간별 냉장고 내 온도분포를 나타내고 있으며 Fig. 9는 제상시 온도를 시간별로 냉장고 내 온도분포를 나타내고 있다. 제상 히터는 증발기 사이로 같은 위치에 있으며 제상 시에는 가장 먼저 열이 전달되는 부분이다. 또한 (a)는 제상 시작한 시점의 온도를 나타내고 있으며 (B)는 제상이 시작 후 3분 48초 때 냉장고 내 온도를 나타내고 있으며 최상부 좌,우측 토출구로 뜨거운 공기가 나오고 있으며 위에서 아래로 열이 전달되는 것을 알 수 가 있다. 최초 냉장고의 전원을 넣을 경우에는 약 4시간만에 첫 제상이 들어오는 것을 알 수가 있었다. 또한 제상 발열은 최고 23°까지 올라간다. 제상 시간은 약 20분간 제상 히트가 작동되고 약 4분간 휴지기간을 지난다. 첫 제상이 들어오고 나서 정상운전(Comp On/off)까지 걸리는 시간은 약 1시간25분이 경과됨을 알 수가 있었다.

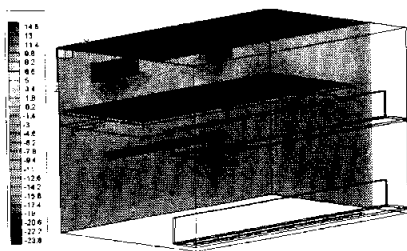
Fig. 10은 정상 운전(Comp On/off)시 온도를 시간별로 냉장고 내 온도분포를 나타내고 있으며 (A)는 Comp가 Off 시점의 온도를 나타내고 있다. 특히 온도는 도어쪽에서 가까운 부위에서 먼저 올라가고 차츰 그릴 팬 쪽으로 온도가 올라가는 것을 알 수가 있었다. (D)는 Comp On되고 나서 1분 48초 때 냉장고 내 온도를 나타내고 있다. Comp는 약15분 동안 작동되며 약20분 동안은 꺼진 상태를 반복하면서 운전 되어진다. 특히 시간이 경과한 후에는 냉장고 내 온도는 균일한 온도를 유지하고 있음을 알 수가 있다.



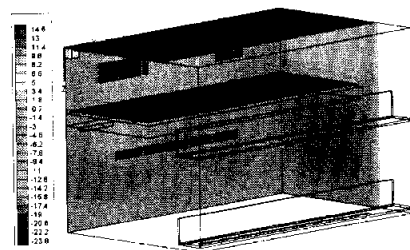
(A) Defrosting Start



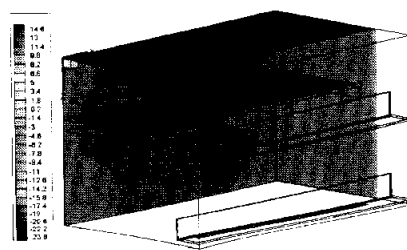
(B) 03:48



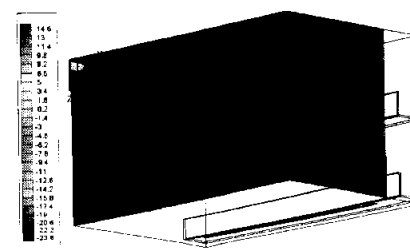
(C) 20:53



(D) 25:35

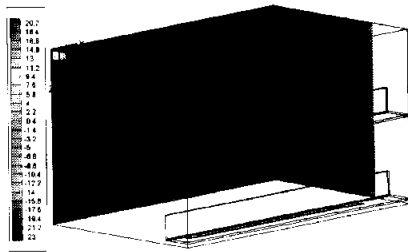


(E) 57:28

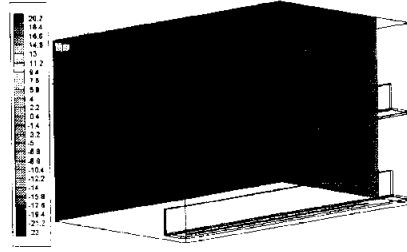


(F) 1:25:00

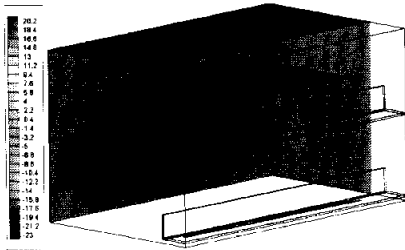
Fig 9. Temperature distribution with defrosting period



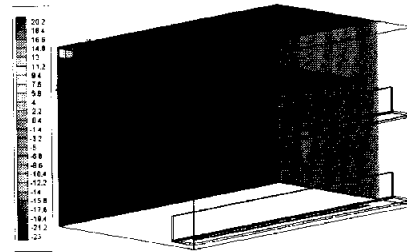
(A) Comp Off



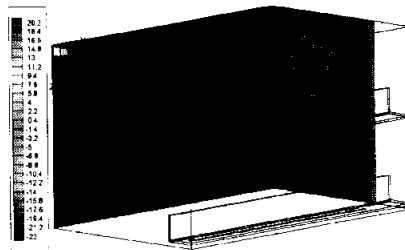
(B) 4:19



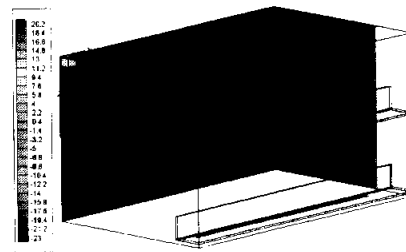
(C) 18 :12



(D) Comp On 1:48

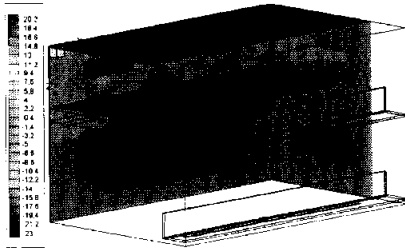


(E) 7:02

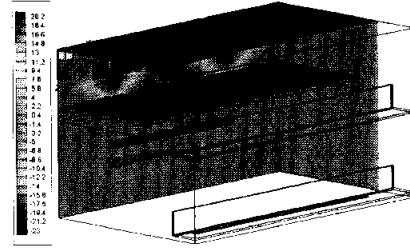


(F) 14:37

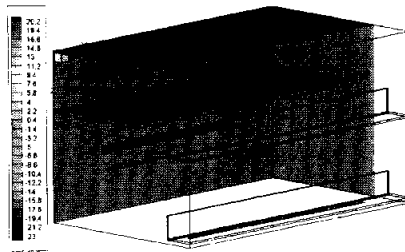
Fig 10. Temperature distribution with Comp On/Off period



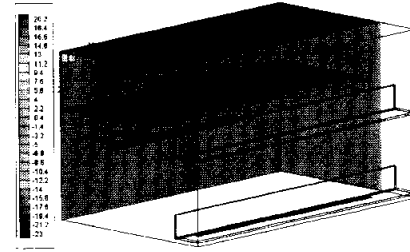
(A) Door Open (00:10)



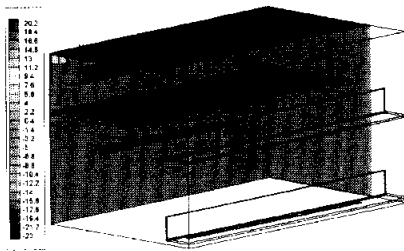
(B) 00:44



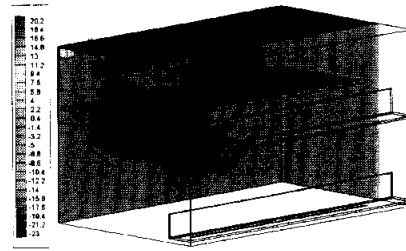
(C) 2:10



(D) 7:45



(E) 10:05



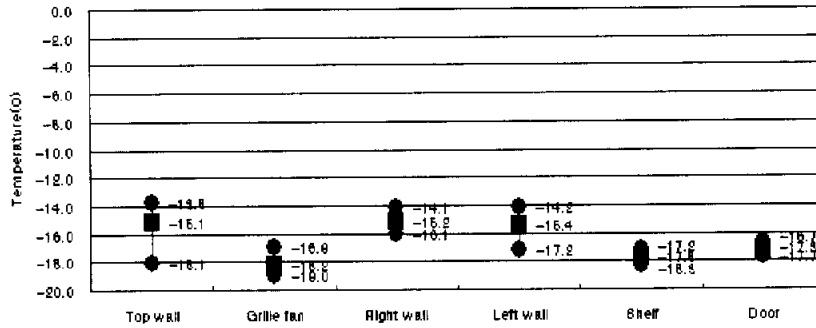
(F) 16:23

Fig 11. Temperature distribution with Door Open period(Comp Off)

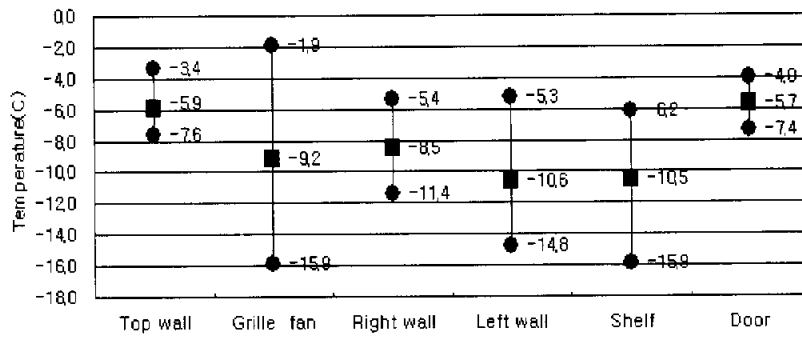
Fig. 11은 도어 개방시 온도를 시간별로 냉장고 내 온도분포를 나타내고 있으며 Fig. 11의 (A)는 도어 개방의 시작 시점의 온도를 나타내고 있다. 또한 가장 취약한 부분은 선반 위 그릴팬 중앙부분임을 알 수 있었다. 정상 운전시 온도 -18°C , 속도 0.078m/s 를 나타내고 있으며, 온도 면에서 기준온도 -18°C 에 도달하였으나 토출구 등의 기하학적 배치로 인하여 속도가 매우 미약하며 승화증발에 취약함을 알 수 있었다. 도어 개방시 속도가 0.145m/s 속도로 상승함에 따라 습공기의 유입이 활발함을 알 수 있었고, 이것이 저온 표면에서 결빙의 원인으로 되고 있으며 위에서 지적하였듯이 문을 닫은 후, 정상 작동 기류의 속도가 미약하여 결빙을 억제하기에 취약하였다.

Door 부분은 냉동실을 열 때, 가장 먼저 직접적으로 고온 고습의 상태에 접하므로 결빙에 취약하다. 이를 억제하는 방법으로서는 정상 운전중의 기류 배분을 최적으로 하여 국부적인 과냉을 피하면서 승화증발을 촉진시키도록 노력하여야 할 것으로 사료된다.

Fig. 12는 Fig. 8의 측정값들을 최고값, 최저값 및 평균값으로 정리한 것이다. 그 결과로써, 도어 개방시에도 전체 벽면의 온도는 0°C 이하의 상태를 유지하고 있음을 알 수 있었다. 또한 그릴팬은 도어 개방시에도 벽면의 온도가 가장 낮기 때문에 외부 습공기와 그릴팬의 온도차로 인한 열전달 증가로 인하여 착상이 촉진된다고 사료된다. 특히 그릴팬 상부 좌/우 토출구 가운데 영역은 온도가 상승하였으며, 이러한 이유로, 토출구에서 나오는 냉기가 없기 때문에 외부 습공기의 유입량이 증가하였기 때문이라고 사료된다.^{22~25)}



(a) Closed door



(b) Open door

Fig12. Average temperature in freezer compartment

착상량을 측정하기 위한 실험조건은 습도 87%에 온도 30°에서 실시했으며 측정방법은 그릴팬, 천정, 그릴팬, 좌측 벽면, 우측 벽면, 선반, 도어를 냉장고의 온도가 안정화되는 정상 운전 시 각각 부위별로 측정하였다. 각 부위별 평균 온도는 그릴팬이 가장 낮았고 가장 취약한 부위였다. 그 결과로써, 그릴팬, 도어, 천정, 선반, 좌측 벽면, 우측 벽면의 순으로 착상량이 많았다.

우측벽면이 좌측벽면보다 착상량이 적은 것은 팬의 특성에 의한 것으로 팬으로부터 나오는 냉기가 좌측 토출구에서는 측면의벽을 향하고 있지만, 우측 토출구에서 나오는 냉기는 전면의 도어 바스켓 방향으로 취출되기 때문이다. 또한 냉동실의 문이 우측에 부착되어 상대적으로 좌측보다 외기의 영향을 적게 받았다고 추정된다.

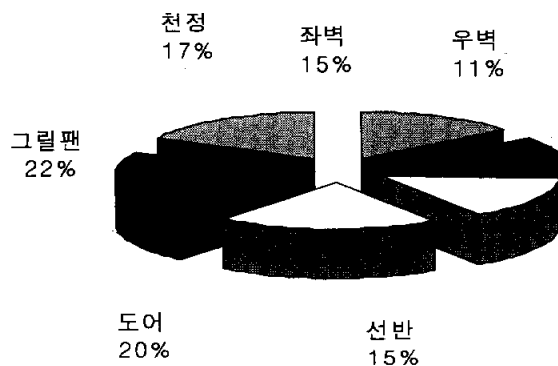


Fig. 13 Frosted weight in freezer compartment

3. 수치해석

3.1 지배방정식 및 계산 모델

본 연구에서 해석모델로 채택한 냉장고의 기하학적 형상을 Fig.14에 도식하였다.

그리고 토출구 및 흡입구에서의 풍속을 도시하고 있으며, 입출구 경계조건으로 ①~⑥번 냉기 토출구는 입구 경계조건이며, ⑦번 냉기 흡입구는 출구 경계조건으로써, 정량적인 실험 데이터를 사용하였다. 또한 공기의 물성치는 273K에서의 값을 기준으로 밀도는 1.189kg/m^3 , 점성계수는 $1.544\text{kg(m} \cdot \text{s)}$ 이다.

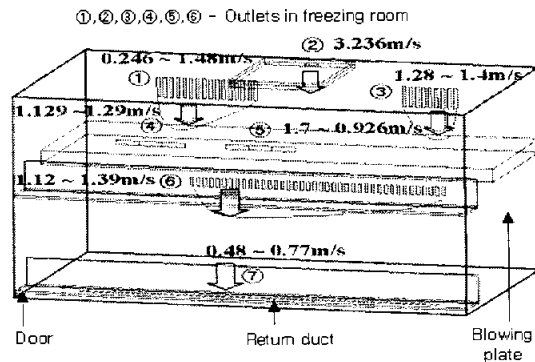


Fig.14 Computational simulation model

본 연구에서는 수치계산을 위하여 다음과 같은 가정을 도입하였다.

1. 유체의 유동형태는 3차원 정상상태, 비압축성, 난류유동이다.
2. 압축성에 의한 점성소산과 중력을 비롯한 체적의 효과는 무시된다.
3. 작동 유체의 물성치들은 일정하게 유지된다.
4. 난류모델로서는 시간평균 표준 $K-\epsilon$ 모델을 적용한다.

이러한 값을 연속 방정식을 Tensor notation을 쓰면 식(1)과 같이 된다.

연속방정식;

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

운동방정식;

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

여기서, Reynolds stress를 분자점성에 의한 응력과 같은 구배확산형으로 나타내면 식(3)과 같이 된다.

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

여기서 Turbulent viscosity μ_t 는 난류 운동에너지(k)와 소산율(ϵ)으로 부터 식(4)와 같이 구할 수 있다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

여기서 C_μ 는 모델상수이며, 식 (4)의 난류 운동에너지(k)와 소산율(ϵ)은 식(5) 및 식(6)에서 구할 수 있다.

$$\frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^3}{k} \quad (6)$$

여기서, G_k 는 turbulent stress 때문에 발생하는 난류 운동에너지 생성항이며 식(7)과 같이 된다.

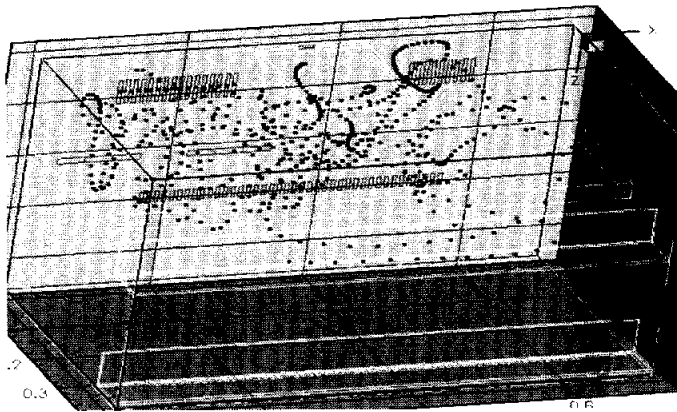
$$G_k = -\rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \quad (7)$$

난류모델상수들은 식(8)과 같이 정의하였다.

$$C_\mu = 0.09, C_{\epsilon 1} = 1.44, C_{\epsilon 2} = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3 \quad (8)$$

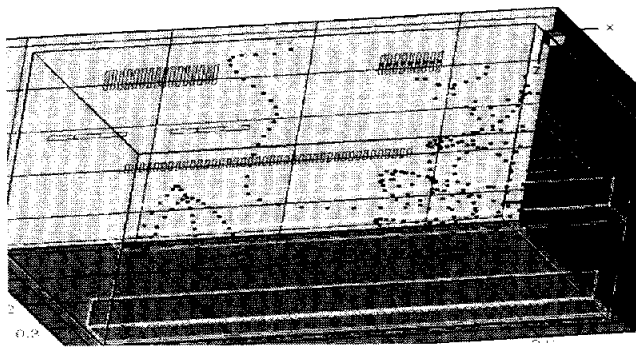
3.2 냉동실 내부공간의 유동분포

Fig. 15(a)는 Fig. 14의 1번 토출구에서 나오는 냉기 유동의 Streamline에 대한 결과를 도시한 것이다. 그 결과로는, 좌측벽면 하부면으로 흐름이 형성되기 때문에 냉장고가 정상운전시 좌측벽면에서의 결빙현상을 촉진시킨다고 사료된다. 1번 토출구에서 나오는 냉기는 선반 위의 중앙부분 및 좌측부분을 담당하고 있는 것으로 판단된다.

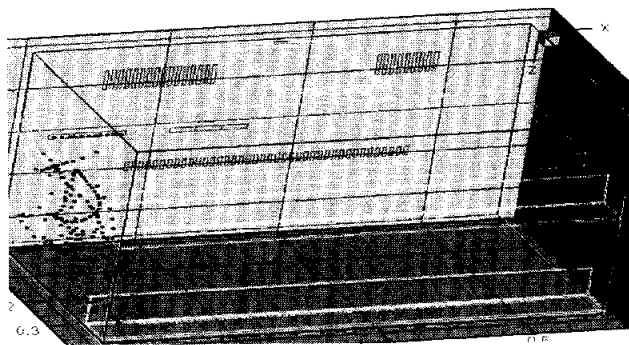


(a)

Fig. 15(b),(c)는 Fig. 14의 3번,4번 토출구에서 나오는 냉기 유동의 Streamline에 대한 결과를 도시한 것이다. 그 결과로는, 우측벽면 상부면으로 흐름이 형성되어 Return duct 쪽으로 흐르는 것을 알 수 있고, 선반 하부의 좌측벽면으로 흐름이 형성되기 때문에 냉장고가 정상운전시 선반 하부의 좌측벽면을 과냉시킬 가능성이 있는 것으로 판단된다.

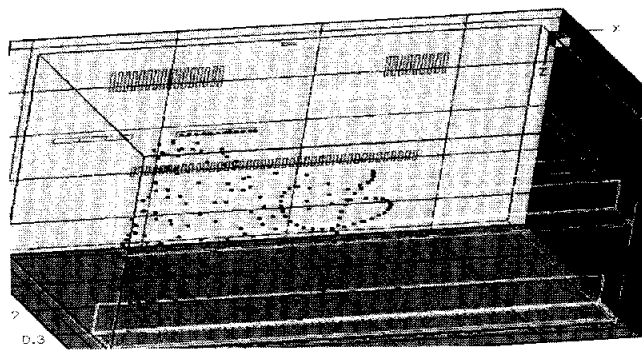


(b)

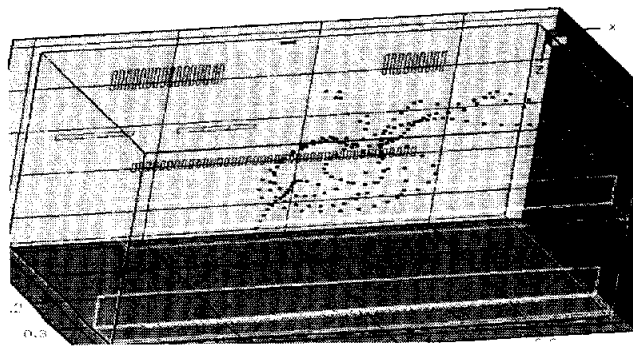


(c)

Fig.15(d),(e)는 Fig. 14의 5번,2번 토출구에서 나오는 냉기 유동의 Streamline에 대한 결과를 도시한 것이다. 그 결과로는, 선반 하부의 중앙부분으로 흐름이 형성되어 Return duct 쪽으로 흐른다. 또한 Lamp cover 후면에서 Vortex가 발생하며, 선반으로 흐름이 형성되기 때문에 냉장고가 정상운전시 선반에서의 결빙현상을 촉진시킨다고 사료된다.



(d)



(e)

Fig. 15 Streamlines of cold flow issuing from grille fan in freezer

3.3 벽면 근처의 유동분포

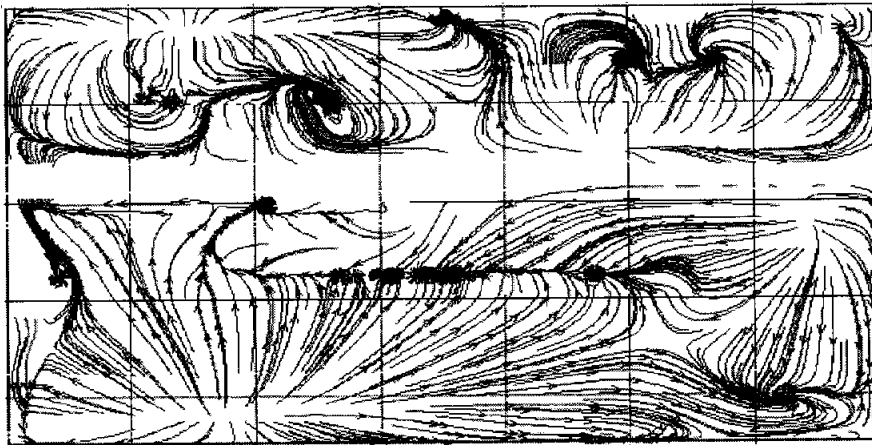
Fig. 16은 그릴팬 전면부에서의 냉기 유동에 대한 결과를 도시한 것이다. 그 결과로는, Fig. 14의 ①번 토출구에서 나오는 냉기는 좌측벽면 하부면으로 흐름이 형성되고 있으며, ③번 토출구에서 나오는 냉기는 우측벽면 상부면으로 경사지게 흐름이 형성되고 있음을 알 수 있었다. 또한, ⑤번 토출구에서 나오는 냉기는 냉동실 선반 하부 공간의 전체로 퍼져 나감을 알 수 있었다. 따라서, ①, ③번의 냉기 흐름은 냉장고가 정상운전시 각 벽면에서의 결빙 현상을 촉진 시킨다고 사료된다. Fig. 17은 천정에서의 냉기 유동에 대한 결과를 도시한 것이다.

그 결과로는, Lamp Cover 후연에서 Vortex현상이 발생하고 있음을 알 수 있었다. 이러한 이유로는, Fig. 14의 ②번 토출구에서 나오는 냉기로 인하여 Lamp cover 후연에서 Vortex현상이 발생되기 때문이다.

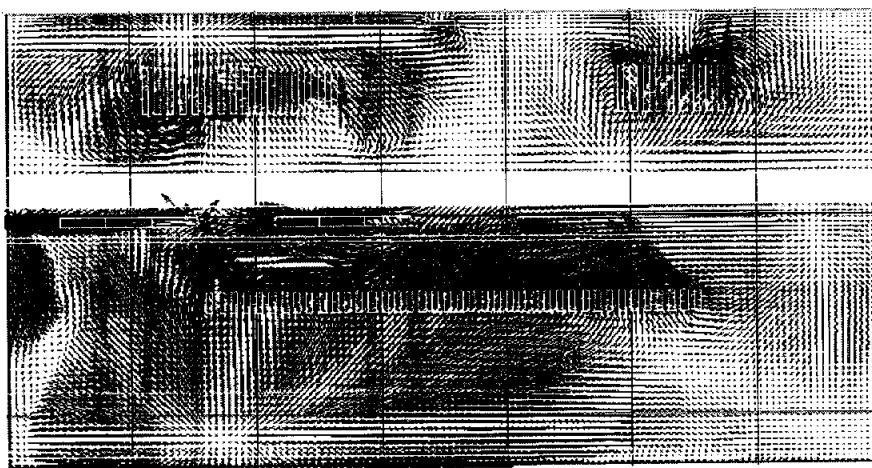
따라서, 이러한 냉기의 흐름은 Lamp cover 후연에서 국부적인 정체로 인한 Vortex를 형성함으로써, 냉장고가 정상운전시 Lamp cover 후연에서 결빙 현상을 촉진시킨다고 사료된다.22-25) Fig. 20과 Fig. 21은 각각 우측벽면과 좌측벽면에서의 냉기 유동에 대한 결과를 도시한 것이다.

그 결과로써, 우측벽면에 대한 냉기 흐름은 상부면으로 형성되며, 좌측벽면에 대한 냉기 흐름은 하부면으로 형성됨을 알 수 있었다. 이러한 이유로는, 팬의 회전 방향이 반시계방향으로 회전하기 때문이다.

따라서 이러한 냉기의 흐름은 냉장고가 정상운전시 각 벽면에서의 결빙 현상을 촉진시킨다고 사료된다.

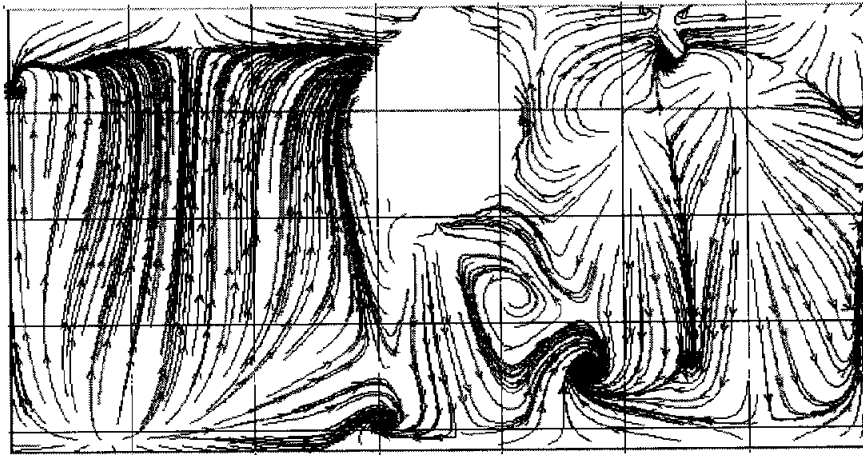


(a) Streamline distribution

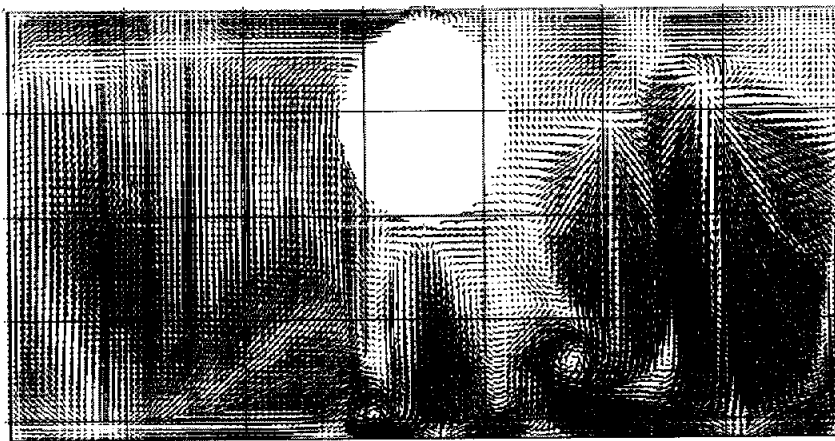


(b) Velocity vector distribution

Fig. 16 Flow patterns near grille fan in freezer

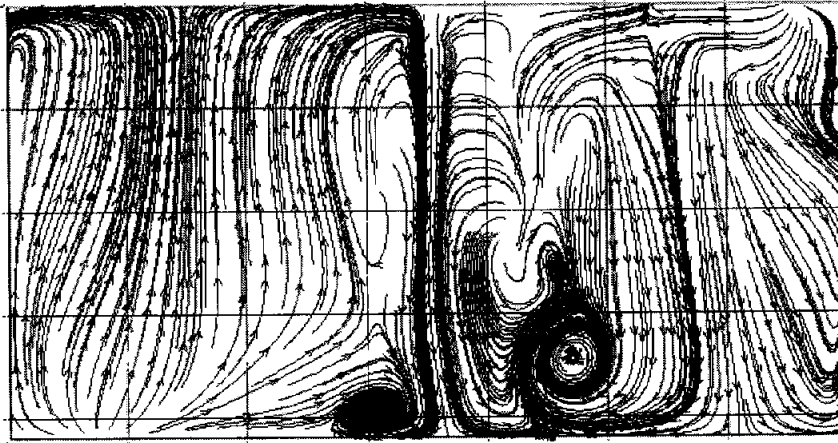


(a) Streamline distribution

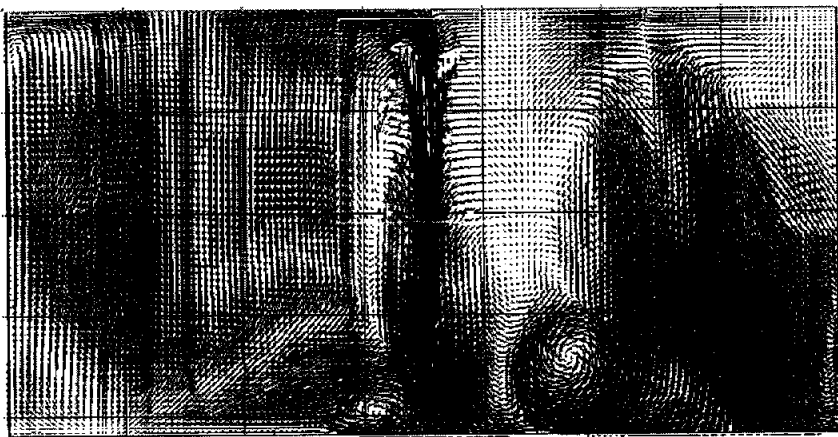


(b) Velocity vector distribution

Fig. 17 Flow patterns near top wall in freezer

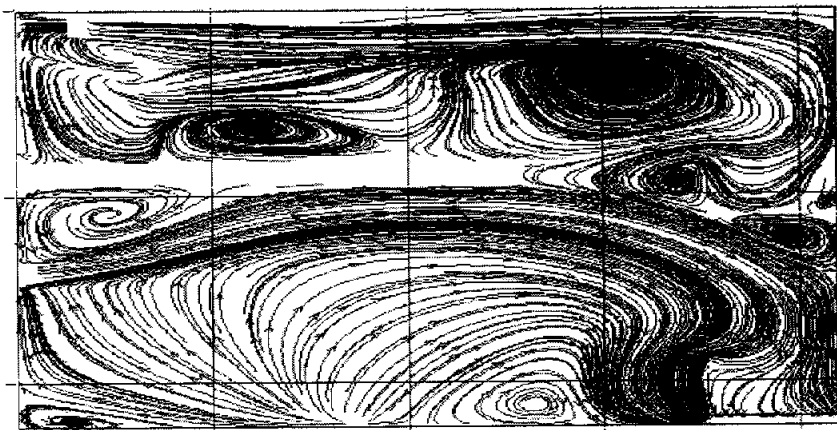


(a) Streamline distribution

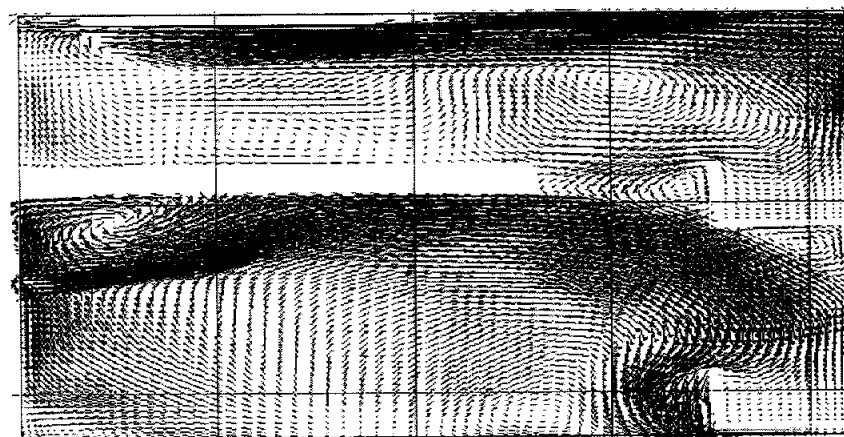


(b) Velocity vector distribution

Fig. 18 Flow patterns under lamp cover in freezer

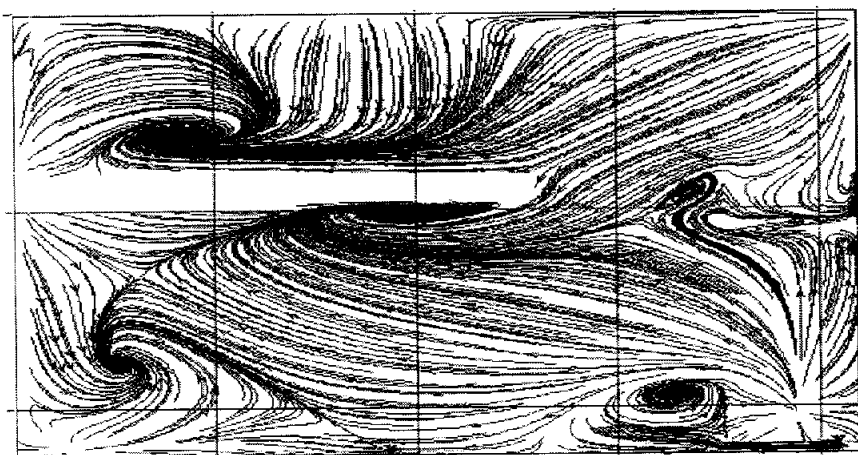


(a) Streamline distribution

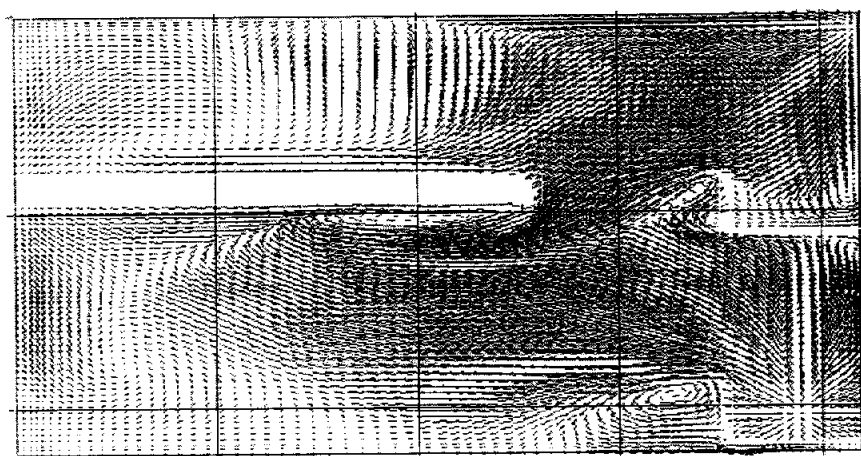


(b) Velocity vector distribution

Fig. 19 Flow patterns of central section of gill fan
(View of Y-Z)

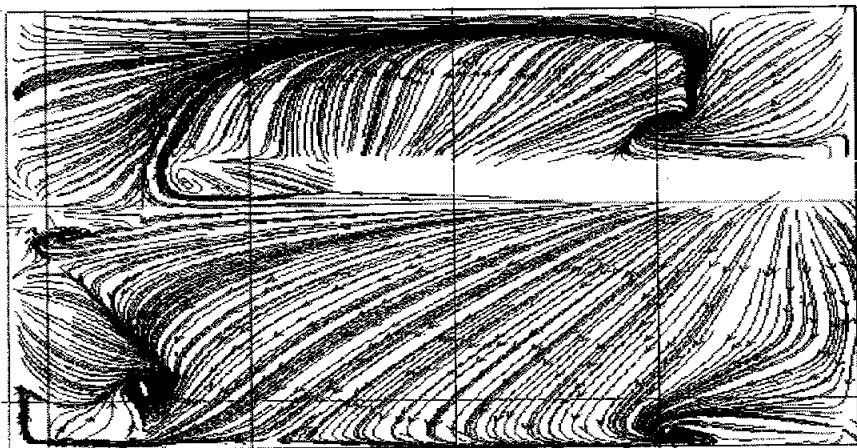


(a) Streamline distribution

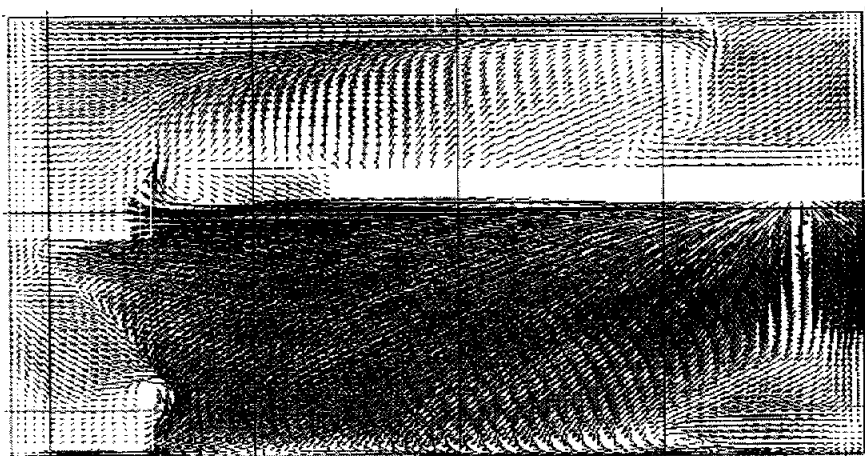


(b) Velocity vector distribution

Fig. 20 Flow patterns near right wall in freezer



(a) Streamline distribution



(b) Velocity vector distribution

Fig. 21 Flow patterns near left wall in freezer

4. 결빙 메커니즘 정량화

냉동실내에서 발생하는 결빙 현상을 최소화하기 위하여 냉동실내 결빙 메커니즘 정량화를 시도하였다. Fig. 22는 결빙 메커니즘을 표현한 것이다. 외부 습공기의 유입은 도어 개방시와 틈새침입에 의해 이루어지며, 들어온 습공기는 내부에서 기체 상태로 존재하다가 냉각에 의해 증발기에 부착하거나 혹은, 냉장고 내의 벽면에 부착된다. 증발기에 부착되어 결빙된 부분은 제상에 의해 물론 외부로 배출되고 일부는 습증기 상태로 내부로 역류되어 순환과정을 거친다. 냉장고 내의 벽면에 부착된 부분은 액체 상태에서 증발되거나 냉각에 의해 결빙되었다가 승화증발과정을 거친다. 나아가서 각 연결 부분의 정량화를 시도하였다. 측정방법은 전자저울을 사용하여 결빙 전 순수한 냉장고의 무게를 0으로 setting 한 후 실험 전과정 동안 결빙에 의한 냉장고 무게의 변화량을 측정하였다. 제상과 제상 사이에 도어를 개방하여 냉장고의 전체무게 변화량과 각 제상시 제상 전후의 무게차 및 드레인양을 측정하였으며, 고내 벽면에 부착된 착상량은 실험 종료 후에 Tissue를 사용하여 측정하였다.

Fig. 23은 도어를 개방하지 않은 상태에서 제상이 4회 들어가고 나서 실험을 종료했으며 도어 밀폐시 외기 침입량으로 볼 수 있다.

Fig. 24는 제상과 제상사이에 도어를 10분씩 6회 개방했을 경우 전자저울에 의하여 냉장고의 무게를 0으로 Setting시킨 후, 측정된 무게 변화를 나타내고 있다. 따라서, 측정된 무게는 그 시각의 전 결빙량을 나타내고 있다. 각 제상시 제상전후의 무게차, 고내 잔존 수분량, 제상후 증발량

이러한 무게변화를 근거로, 제상후 고내로 역류되는 수증기량(제상 증발량)을 제상전후의 냉장고 무게(제상 전후 무게차)와 드레인양의 차이로 추정할 수 있었으며, 증발기에 착상된 수증기량은 제상후 냉장고 무게와 고내 벽면의 착상량의 차이로 추정할 수 있었다.

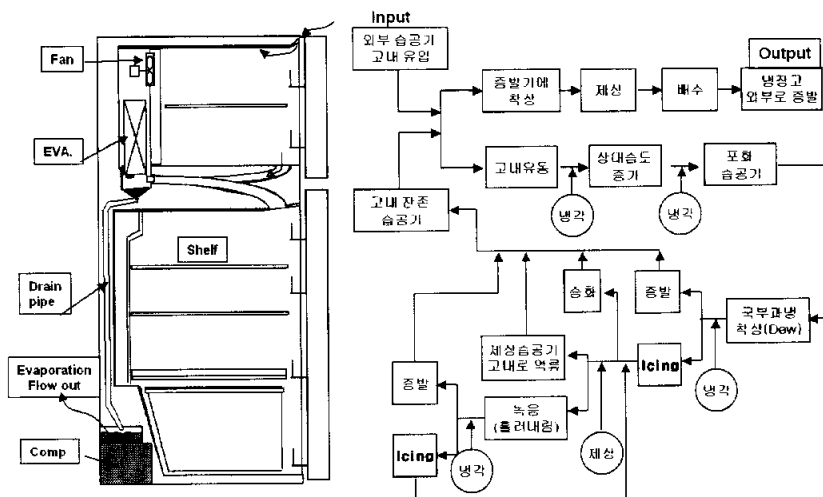


Fig. 22 Modeling of freezing mechanism in freezer

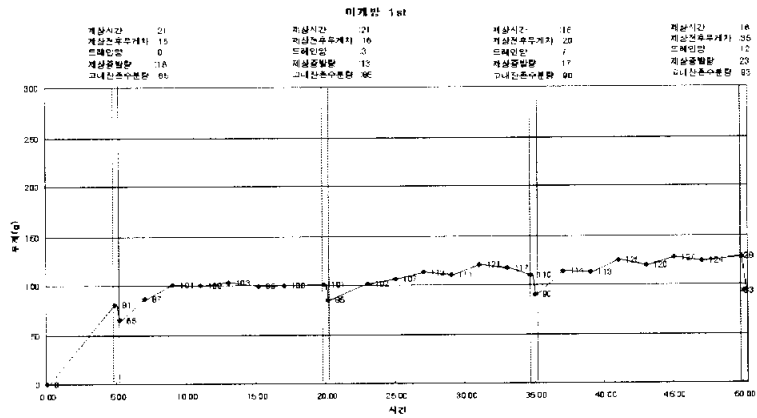


Fig. 23 Refrigerator weight variation(Door Close)

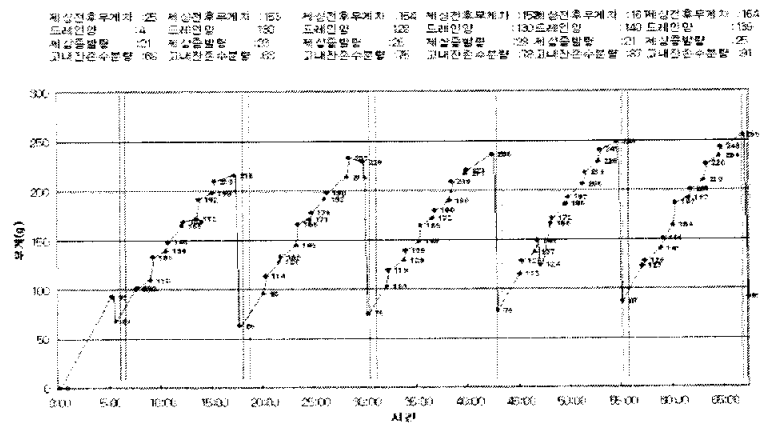


Fig. 24 Refrigerator weight variation(Open number(6))

실험은 도어를 4회 개방, 6회 개방 등 반복실험을 하였으며, 정량화는 미 개방 과 6회 개방(Fig. 24)의 실험적 Data 근거로 시도하였다.

Table 1은 실험한 데이터를 정리하였고 이것을 이용하여 단위시간당 착상량으로 표시하기 위해서 Table 2처럼 정량화를 실시하였다. 틸새로 침입한 양의 측정은 도어를 개방하지 않은 상태의 측정값으로부터 구하였다. Fig. 25는 Table 1과 Table 2의 근거로 작성되었다. 정량화된 메커니즘을 근거로 분석해 보면, 도어 개방시 외부공기에 의해 유입되는 수증기량이 가장 많았으며, 고내로 유입된 수증기와 고내에 잔존하고 있던 저온저습의 수증기는 벽면 및 증발기에서 착상을 발생시킨다. 또한 냉장고가 정상 운전시 발생된 착상은 제상후, 일부는 드레인 되며, 일부는 고내로 유입되어 벽면 및 증발기에서 재착상을 발생시켜 결빙을 촉진시킨다. 이러한 정량화 된 메커니즘을 근거로, 착상량을 줄이기 위해서는 첫째로 외부 유입량을 가능한 한 차단하여야 하며 둘째로는 제상 후 역류되는 습공기를 차단하여야 한다는 것을 알 수 있다. 따라서 이를 바탕으로 하며 우선 단기적으로 가능한 적용 안을 도출하였으며 이들 개선 아이디어를 적용하여, 냉동실내에서 발생하는 결빙현상을 최소화시킬 수 있도록 노력하고자 하였다.

	미개방	4회 개방(1st)	4회 개방(2nd)	6회 개방
벽면착상량	11 g	9 g		14 g
드레인양	8.72 g	96.67 g	91.67 g	136.33 g
제상 후의 전체무게	136.25 g	56.5 g	116.25 g	78.80 g
제상 전후 무게차	22.33 g	119.25 g	104 g	158 g
제상 증발량	13.5 g	24.25 g	17.75 g	24.8 g
개방 횟수		4(5min)	4(10min)	6(10min)
주기	8	4	4	5
(침입/유입)시간	7202Min	80Min	160Min	300Min

Table 1. Experimental Data

단위(g/min)

항목	개방수	미개방에 대해서	6회 4회에 대해서
벽면 착상량		$\frac{\text{벽면착상량}}{(\text{제상시작} \sim \text{제상종료까지}) \times \text{주기수}}$	$\frac{\text{벽면착상량}}{\text{도어 개방 시간} \times \text{개방횟수} \times \text{주기수}}$
드레인양		$\frac{\text{드레인양}}{(\text{제상시작} \sim \text{제상종료까지}) \times \text{주기수}}$	$\frac{\text{드레인양}}{\text{도어 개방 시간} \times \text{개방횟수} \times \text{주기수}}$
제상 증발량		$\frac{\text{제상 전후 무게차} - \text{드레인양}}{(\text{제상시작} \sim \text{제상종료까지}) \times \text{주기수}}$	$\frac{\text{제상 전후 무게차} - \text{드레인양}}{\text{도어 개방 시간} \times \text{개방횟수} \times \text{주기수}}$
증발기 부착량		$\frac{\text{제상 후의 전체무게} - \text{벽면 착상량}}{(\text{제상시작} \sim \text{제상종료까지}) \times \text{주기수}}$	$\frac{\text{제상 후의 전체무게} - \text{벽면 착상량}}{\text{도어 개방 시간} \times \text{개방횟수} \times \text{주기수}}$
외부 공기 침입		$\frac{\text{미개방 (고내 착상량} + \text{드레인양} + \text{제상 증발량} + \text{증발기 착상량})}{(\text{제상시작} \sim \text{제상종료까지}) \times \text{주기수}}$	
외부공기 유입량		$\frac{6\text{회 (고내 착상} + \text{증발기 착상} + \text{드레인양} + \text{제상증발량}) + \text{고내 잔존 승승기량}}{\text{도어 개방 시간} \times \text{개방횟수} \times \text{주기수}}$	

Table 2. Calculation method

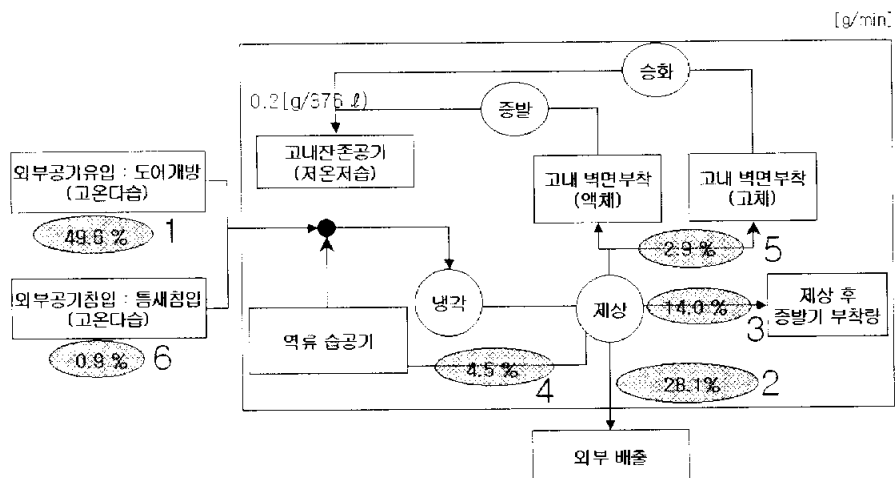


Fig. 25 Modeling of freezing mechanism in freezer

VI. 결론

본 연구는 냉동실내의 실제 실험에 앞서 냉동실 벽면의 단순한 형태인 평형평판에 대해서 풍동 실험을 행하여 결빙 인자의 영향을 파악하였다. 또한 실제 냉장고에 적용하여 결빙 메커니즘을 정립하였고 착상에 대한 정량화를 시도하였다.

- 1) 고온 고습 조건하에서 착상 거동에 대한 평행평판의 실험 결과로써, 입구 공기의 풍속이 증가할수록 착상량이 증가하였으며, 냉각면의 온도가 낮아질수록 착상량이 증가함을 알 수 있었다.
- 2) 도어 개폐에 따른 냉동실내 벽면의 착상량에 대한 결과로써, 그릴팬, 천정, 도어, 선반, 좌측 벽면, 우측 벽면의 순으로 착상량이 가장 많이 측정되었다.
- 3) 수치 시뮬레이션의 결과로써, 천정의 Lamp cover 뒤의 그릴팬의 토출구에서 나오는 냉기의 영향으로 Lamp cover 후연에서 와류가 형성되며, 국부적인 과냉의 원인으로 작용하여 실증실험에서 착상을 확인할 수 있었다.
- 4) 토출구의 기하학적 배치로 인하여 속도가 매우 미약하며 승화증발에 취약함을 알 수 있었다. 도어 개방시 속도가 0.145m/s 속도로 상승함에 따라 습공기의 유입이 활발함을 알 수 있었다.
- 5) 냉동실내에서 발생하는 착상량을 정량화를 실시하였으며 외부 유입량, 외부 배출량, 증발기 부착량, 역류 습공기, 벽면 착상량, 외부 침입량 순으로 나타났다.

참고문헌

1. 정학모, 강상혁, "덕트의 설계", 공기조화 냉동공학 제 28 권 제 2 호, pp. 99-107, 1999
2. 이진호, 권오갑, "환 형상에 따른 증발기의 전열 성능", 공기조화 냉동공학 논문집 제 2 권 제 1 호, pp. 27-36, 1990
3. 이관수와 5인, "착상조건 하에서 핀-관 열교환기의 성능예측을 위한 컴퓨터 시뮬레이션", 공기조화 냉동공학 논문집 제 7 권 제 1 호, pp. 161-170, 1995
4. 이관수, 이태희, 김우승, "착상조건하에서 평행 평판 열교환기의 열 및 물질전달", 공기조화 냉동공학 논문집 제 6 권 제 2 호, pp. 155-165, 1994
5. 이관수, 이태희, "착상이란?", 공기조화 냉동공학 논문집 제 24 권 제 3 호, pp. 325-337, 1995
6. 이관수, 지성, 이태희, "서리층 성장 예측을 위한 수치적 모델", 공기조화 냉동공학 논문집 제 9 권 제 2 호, pp. 249-258, 1997
7. 이관수, 박철균, "돌출부를 갖는 평행평판의 최적 설계를 위한 층류강제 대류 해석", 공기조화 냉동공학 논문집 제 10 권 제 1 호, pp. 129-136, 1998
8. 이관수, 김규우, 지성, "핀-관 열교환기에 대한 제상 거동에 관한 실험적 연구", 공기조화 냉동공학 논문집 제 10 권 제 6 호, pp. 649-657, 1998

9. 류수길, 이관수, "핀-관 열교환기의 표면특성에 따른 착상 거동에 관한 연구", 공기조화 냉동공학 논문집 제 11 권 제 3 호, pp. 377-383, 1999
10. 한홍도, 노승탁, "충류유동 저습도 조건에서의 평행평판형 냉각판 서리 성장 실험", 공기조화 냉동공학 논문집 제 11 권 제 4 호, pp. 440-447, 1999
11. 이관수, 지성, 이동욱, "핀-관 열교환기의 착상 거동에 대한 표면 접촉 각 영향", 공기조화 냉동공학 논문집 제 12 권 제 1 호, pp. 95-101, 2000
12. 이관수, 이태희, 김우승, "착상시 설계인자에 따른 핀-관 열교환기의 성능변화에 관한 실험적 연구", 대한기계학회논문집 제 19권 제 10 호, pp. 2657-2666, 1995
13. 이관수, 이태희, 허정희, "착상거동예측을 위한 이론적 모델", 대한기계학회 논문집(B), 제 20 권 제 3 호, pp. 1096-1105, 1996
14. 지성, 이관수, "핀-관 열교환기의 착 제상 거 동에 대한 표면처리의 영향에 관한 실험적 연구", 대한기계학회논문집 B권, 제24권 제 8호, pp.1062~1068, 2000
15. 이관수, 고영우, "제상 현상 연구를 위한 눈 융해과정 해석", 공기조화 냉동공학 논문집 제 11권 제 1 호, pp. 38-47, 1999
16. 박창섭, "도어 개폐에 따른 냉동실 내벽면 착상 메카니즘에 관한 연구", 부산대학교 공학석사 학위논문, pp. 1-126, 1999
17. 윤재호, 박승상, 류호열, "냉장고 성능평가 기술", 공기조화 냉동공학 제 23 권 제 2 호, pp. 85-96, 1994

감사의 글

석사 생활을 마감하면서 그 동안 저에게 많은 도움을 주신 분들에게 글로써나마 감사의 글을 올립니다. 바쁜 와중에도 저의 논문을 심사해주시고 부족한 점을 일깨워 주신 김남식 지도 교수님께 감사를 드립니다. 또한 학문의 자세와 방법을 가르쳐 주시고 세심한 지도와 조언을 아끼지 않으신 이연원 교수님께 감사를 드립니다. 또한 평소에 부족한 저에게 가르침을 주신 이도형, 배대석, 금종수 교수님께도 감사를 드립니다.

2년의 기간 동안 같이 프로젝트를 같이 하면서 도움을 주신 박용석, 김석로, 김영배 책임님께도 감사를 드립니다. 또한 신병환 선배님과 김재일에게 감사의 마음을 전합니다.

같이 실험실에서 동고동락하면서 부족한 점을 서로 밤을 세워 고민하며 도움을 주신 이영환, 김영국, 곽수민 선배님께 감사의 마음을 전합니다. 그리고 힘들 때나 피로울 때 서로의 마음을 전할 수 있는 김재열, 최성삼, 김봉석, 손성호, 황창욱, 김상우, 남정환, 양동호, 하덕용에게 감사의 마음을 전합니다.

마지막으로 항상 저를 믿어주시고 보살피 주신 아버지, 어머니에게 사랑과 감사의 마음을 전합니다.