

## 제상 히터와 냉장고 플라스틱 내벽 사이의 안전거리에 대한 모델링

정 영<sup>†</sup>, 신 종 민, Alexei V. Tikhonov

LG전자 디지털 어플라이언스 사업본부 연구소

### Modeling of the Safety Distance between Defrost Heater and Plastic Inner Wall of Refrigerator

Young Jeong<sup>†</sup>, Jongmin Shin, Alexei V. Tikhonov

Digital Appliance Company Research Lab., LG Electronics, Changwon, Kyungnam 641-711, Korea

(Received June 20, 2002; revision received January 21, 2003)

**ABSTRACT:** Two dimensional modeling was carried out to find the safety distance between the defrost heater and the plastic inner wall of domestic refrigerator. Estimation was processed for the three cases; the estimation of plastic wall temperature (1) without any protection, (2) with an aluminum foil attached on a wall, and (3) with an aluminum shield installed between heater and wall. The former two cases are found to be dangerous during defrosting process, because the temperatures of inner wall reach above 80°C, which is the upper temperature limit of the wall material. The case with an aluminum shield is considered to be safe by maintaining the temperature of the wall in the range of 60°C during defrosting process.

**Key words:** Defrost heat(제상 히터), Plastic inner wall(플라스틱 내벽), Safety distance(안전거리)

#### 기 호 설 명

$F$  : View factor  
 $g$  : Gravity accelation [ $m/s^2$ ]  
 $Gr$  : Grashof number  
 $h$  : Heat transfer coefficient [ $W/m^2K$ ]  
 $l$  : Length [m]  
 $Nu$  : Nusselt number  
 $Pr$  : Prandtl number  
 $Q$  : Heat transfer rate [kW]

$Ra$  : Rayleigh number  
 $T$  : Absolute temperature [K]

#### 그리스 문자

$\beta$  : Volumetric thermal expansion coefficient [ $K^{-1}$ ]  
 $\epsilon$  : Emissivity  
 $\nu$  : Kinematic viscosity [ $m^2/s$ ]  
 $\sigma$  : Stefan-Boltzmann constant  $\sigma=5.67 \times 10^{-8}$  [ $W/m^2 \cdot K^4$ ]

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-55-260-3839; fax: +82-55-260-3507

E-mail address: elbin@lge.com

#### 하첨자

$w$  : 내벽(wall)

- $h$  : 제상 히터(defrost heater)
- $s$  : 판(shield)
- $eff$  : effective
- $air$  : 공기

1. 서 론

최근 생활수준이 높아지고 서구식 식생활을 하는 사람들이 늘어나게 되면서 점차 식품을 보관하는 양이 늘어나게 되었다. 일정기간 이상을 지낼 수 있는 식품을 저장하게 되면서 냉장고의 용량이 대형화되어지고 있다. 이렇게 냉장고가 대형화되고 많은 양의 식품이 냉장고 내에 놓이게 됨으로써 일정수준의 냉동능력을 유지하기 위해서 증발기의 크기 또한 커지게 되었다. 그런데 냉장고의 운전 특성상 증발기는 영하의 조건에서 운전되어야 하므로 그 표면에 착상현상이 발생하게 된다. 이러한 증발기 표면에서의 착상은 열전달성능의 저하 및 증발기 양단의 압력강화로 인한 냉장고 성능저하의 원인이 된다. 따라서 냉장고의 성능을 유지하기 위해서는 일정시간이 경과한 후에 서리를 제거시키는 제상과정(defrost process)이 필요하게 되므로 따라서 제상과정 역시 대형화된 증발기에 착상된 서리(frost)를 제거하기 위해서 제상 히터는 충분한 열량을 발생할 수 있어야 한다.

제상과정에 대한 현재까지의 연구는 주로 (1) 제상 메카니즘과 제상방식에 관한 연구, (2) 제상 성능평가에 관한 연구 및 (3) 최적 제어제상에

관한 연구 등으로 서리의 성장과정, 서리제거 및 제상 후 증발기 또는 고내 상태에 중심을 둔 연구가 이루어져 왔으며, 제상과정과 제어방식에는 Aoki et al.<sup>(1-3)</sup>에 의한 연구 및 Inaba et al.<sup>(4-6)</sup>에 의한 연구 등이 있고, 제상 성능평가에 대한 연구는 Sugawara et al.<sup>(7-10)</sup>에 의한 연구, 최적 제어제상에 관한 연구에는 Allard et al.<sup>(11)</sup>에 의한 연구 등이 있다. 또한 제상시의 입구에서의 온도, 습도 및 속도에 대한 제상과의 관계의 정립 및 제상과정에서의 서리에 대한 연구가 진행되어 왔으나, 제상과정에서의 제상 히터의 온도가 내벽에 미치는 연구에 대해서는 진행되지 못했다.

따라서, 제상과정에서의 제상 히터에서 발생하는 온도에 대해서 플라스틱(plastic) 내벽을 보호하기 위해서는 히터와 내벽 사이의 안전한 거리는 어느 정도인가?, 발열 열량의 내벽에 대한 영향은 어느 정도인가?, 만약 히터의 고열로 인한 내벽에 변형이 일어난다면 이것을 방지하기 위한 방안은 무엇인가? 에 대한 질문이 있게 되었다.

본 연구는 핀-튜브(Fin-and-tube) 증발기에 설치된 제상 히터(defrost heater)가 작동할 때, 내벽의 온도값을 예측할 수 있는 모델링(modeling)을 통하여 내벽의 온도값을 계산하며, 또한 내벽의 온도가 일정온도 이하로 유지되기 위한 방법을 제시하고 제시된 방법을 사용할 때 내벽의 온도값을 예측하는 과정을 수행하였다.

2. 모델링

2.1 모델링을 위한 배경

730리터급 가정용 냉장고에는 Fig. 1과 같이 제상 히터를 포함한 핀-튜브 증발기가 부착되어 있는데, 본 연구의 시료인 증발기에서 제상 히터의 위치는 곡관부(return band) 부위로 약 200 mm의 열발생 부분이 존재하고 이 경우 내벽과의 거리는 20 mm인 위치에 설치되었다.

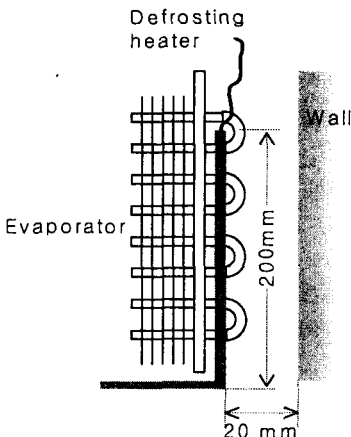


Fig. 1 Specification of the defrosting system.

Table 1 Specification of the defrost heater

Capacity	500 W
Total length	1100 mm
Diameter	6.6 mm
Surface area	0.0226 m <sup>2</sup>
Material	Stainless steel
Maximum temperature	500 °C

제상 히터의 주요 사양은 Table 1에 주어졌다. 모델링의 단순화를 위하여 아래와 같이 가정하였다.

(1) 제상 히터에서 발생한 열이 내벽에 도달하고 내벽에서 받은 열에 대해서는 전부 방출하는 열적 평형상태이다.

(2) 내벽의 외부(제상 히터가 위치한 곳과 반대편)와는 단열이 완벽하게 이루어지고 있으며, 전도에 의한 열교환은 무시한다.

(3) 히터에서 발산되는 열은 모든 방향으로 일정하다.

(4) 내벽과 히터의 방사율(emissivity)은 각각 0.8~0.95와 0.2~0.4의 범위<sup>(12)</sup>이다.

(5) 대류 열전달계수를 계산하기 위한 공기의 온도는 0℃, 20℃로 설정한다. 이러한 가정은 대부분 가정용 냉장고에서 제상과정 중 공기의 온도는 서리를 녹이기 위한 최소 온도는 0℃이고 제상과정이 끝난 후의 증발기 주위 공기의 최대 온도가 거의 20℃ 전후임에 근거한다.

(6) 증발기와 제상 히터가 위치하는 고내의 내벽은 플라스틱(Plastic) 재질로 이루어지며, 그 재질의 열변형 온도는 89~96℃로 주어지며, 안전계수 10~20%를 고려하여서 80℃를 열변형 온도로 선택한다.

(7) 제상 히터가 발열시에 주위 공기와의 온도차는 500℃이고 제상 히터의 온도는 등온을 유지한다.

(8) 제상 히터는 증발기와 평행하게 수직인 형태로 장착되어 있으므로, 수직한 튜브(Tube) 옆에서 작동하고 있다.

2.2 복사 열전달 모델링

Fig. 2는 Fig. 1의 실제 시스템을 간략화시킨 것이며, Fig. 3은 모델링을 위해 그 히터와 내벽 사이의 횡단면을 보여주는 그림이다.

내벽의 기준에서 제상 히터에서 발생하는 열량과 내벽에서 방출되는 열량은 각각 식(1)과 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$Q_{in} = q_{heater} \cdot F_{h-w} \cdot \epsilon_w \cdot A_{heater} \quad (1)$$

$$Q_{out} = \epsilon_w \cdot \sigma \cdot \{ (T_w)^4 - (T_{air})^4 \} \cdot A_w + h_h \cdot (T_w - T_{air}) \cdot A_w \quad (2)$$

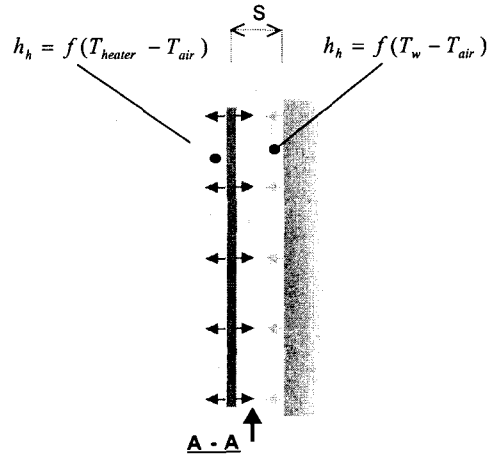


Fig. 2 Simplified defrosting heater.

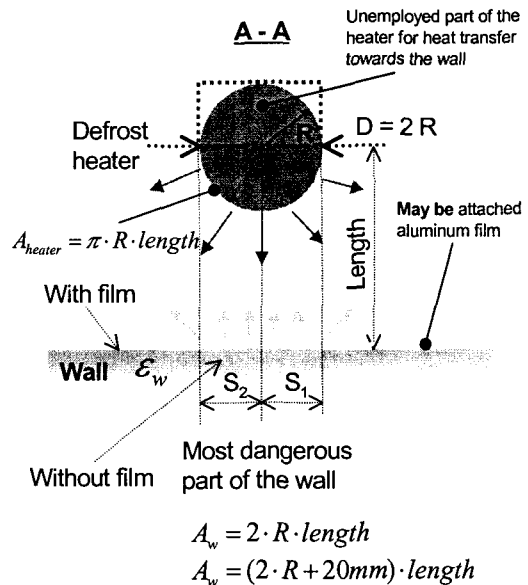


Fig. 3 Details around the defrosting heater and wall.

벽에서의 방출되어서 나오는 열은 대류와 복사열을 이용하여 계산을 수행하였고, 가정에서 내벽의 출입 열은 동일하다고 하였으므로 식(1), 식(2)는 동일하다.

이때, 복사열에 따른 표면에 대한 영향을 계산하기 위해서 관측계수(view factor, F)를 정의하였다. F<sub>ij</sub>는 i 표면에 산란적으로 떠난 복사에너지가 j 표면에 직접 부딪치는 복사에너지의 비율

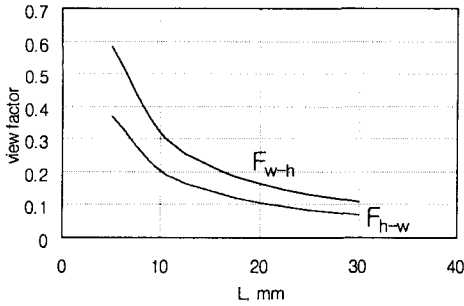


Fig. 4 View factors as a factor of distance between heater and wall.

로 정의한다. 이에 대해서 식(3)<sup>(13)</sup>과 같이  $F_{w-h}$ 를 정의하였다.

$$F_{w-h} = \frac{R}{S_1 - S_2} \left[ \tan^{-1} \frac{S_1}{L} - \tan^{-1} \frac{S_2}{L} \right] \quad (3)$$

$$= 2.28 \cdot L^{-0.81} - 0.038$$

여기서, 관측계수  $F_{w-h}$ 와  $F_{h-w}$ 의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$F_{h-w} = F_{w-h} \cdot \frac{A_w}{A_h} = F_{w-h} \cdot 0.637 \quad (4)$$

위의 식을 이용하면 내벽과 곡관부 사이의 거리에 대한 두 가지 인자(factor)에 대한 값은 Fig. 4와 같은 그래프로 나타나게 된다.

### 2.3 대류 열전달 모델링

자연대류 층류유동의 경우는 아래의 식(5)와 식(6)<sup>(14)</sup>으로 표현된다.

$$Nu = 0.75 \cdot (Ra)^{0.25} \quad (5)$$

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot l^3}{\nu^2} \cdot Pr \quad (6)$$

이때 각종 물성치를 Film temperature인 250°C에서 취하여 Ra를 계산하고, 식(5)에 대입하면  $Nu=65.38$ 을 얻는다. Nu의 값을 이용하여 히터(heater) 주변에 대한 열전달계수( $h$ )를 계산하면  $h_{heater,h} = 13.79 \text{ W/m}^2\text{K}$ 이고 전체 대류에 의한 열유동량은  $6893 \text{ W/m}^2$ 이다.

내벽측의 경우도 식(5), 식(6)으로부터 Nu값을 계산함으로써 식(7)과 같이 열전달계수를 정의할 수 있다.

$$h_{wall,h} = 2.89 \cdot \Delta T^{0.25} \quad (7)$$

### 2.4 내벽의 온도 모델링

에너지 보존법칙에 의해서 식(1), 식(2)로부터 식(8)을 구할 수 있다.

$$q_{out} = q_{in} \quad (8)$$

$$= q_{heater,r} \cdot F_{h-w} \cdot \epsilon_w \cdot \frac{A_{heater}}{A_w}$$

또, 식(2)에 물성치를 대입하고, 식(7)을 이용하면 식(9)를 얻을 수 있다.

$$q_{out} = \epsilon_w \cdot \sigma \cdot \{ [T_w]^4 - [273]^4 \} \quad (9)$$

$$+ 2.89 \cdot (T_w - 273)^{0.25} \cdot (T_w - 273)$$

### 3. 결 과

식(8)과 식(9)를 이용해서 제상 히터와 내벽의 거리(length,  $L$ ) 및 방사율(emissivity)에 따른 내벽온도( $T_w$ )값을 예측하는 과정을 수행하였다. 또한 내벽의 온도값을 계산할 때 세 가지의 경우에 대해서 모델링을 수행하였다.

#### 3.1 제상 히터와 내벽 사이에 아무런 보호 물체가 존재하지 않는 경우

실제의 내벽에 사용되어지는 플라스틱의 방사율(emissivity)은 0.8~0.95이므로 제상 히터와 내벽 사이의 거리가 25 mm 이하인 경우 내벽의 온도가 80°C 이상으로 크게 올라가고 있다

제상 히터와 내벽 사이의 거리의 변화( $L=15 \text{ mm}$  and  $25 \text{ mm}$ )에 따른 방사율에 따른 벽면의 온도를 나타내었다.

Fig. 5, Fig. 6의 (a)와 (b)로부터 거리에 대한 온도의 차이가 발생함을 알 수 있으며, 예상되었듯이 거리가 증가될 경우 안전성을 확보할 수 있다. 그러나, 실제 냉장고에서는 공간상의 제약이

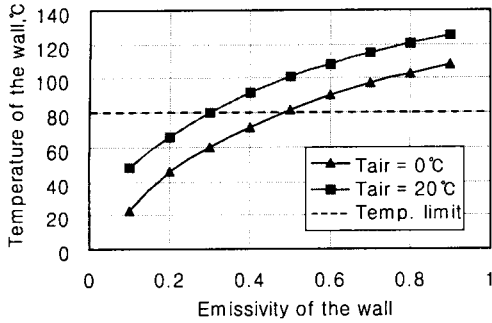


Fig. 5 Temperature of the wall to various emissivities for  $L=20$  mm.

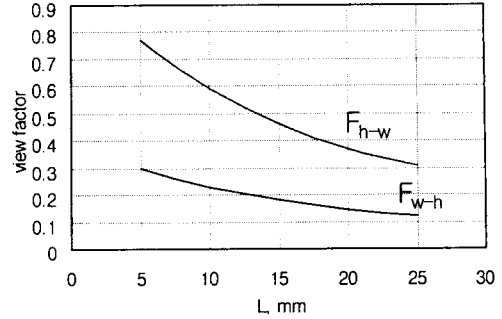
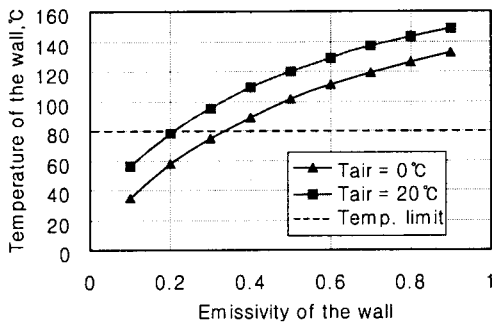
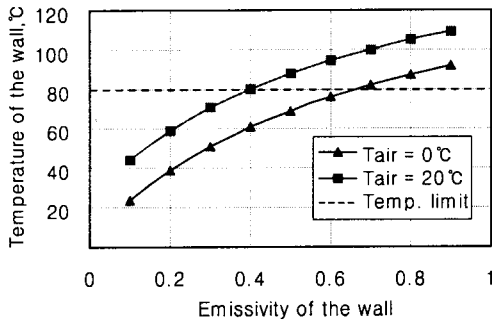


Fig. 7 View factors as a factor of distance between heater and wall.



(a)



(b)

Fig. 6 Temperature of the wall to various emissivities for (a)  $L=15$  mm (b)  $L=25$  mm.

따르므로 안정성 확보를 위해 무한정 거리를 증가시키는 데는 한계가 있다.

**3.2 내벽에 알루미늄 호일과 같은 얇은 보호막을 붙였을 경우**

이 절에서는 제상 히터로부터의 복사열을 감소

시키기 위해서 알루미늄 호일을 내벽에 부착했을 경우에 대한 내벽온도를 계산하였다. 이 경우에 벽면의 관측계수는 식(10)으로 주어진다.

$$F_{h-w} = F_{w-h} \cdot 2.567 \quad (10)$$

부착되어지는 알루미늄 호일의 크기는 내벽 전체에 알루미늄 호일을 부착할 수 있으나 부착시 편리성과 재료비 상승을 고려하여 3.1절의 상사면적보다 20 mm 큰 알루미늄 호일을 부착하였다. 따라서 상사면적은 기존 2R에서 20 mm 커진 경우이다. 따라서 식(3), 식(10)으로부터 거리에 대한 관측계수는 Fig. 7과 같이 주어진다.

알루미늄 호일의 열전도도(conductivity)는 10 W/mK, 두께는 50 μm, 방사율(emissivity)은 0.1 ~ 0.2임을 사용하여 내벽의 온도를 구할 수 있다. 내벽에 얇은 알루미늄 호일을 부착했을 경우에는 아무런 보호물체가 존재하지 않는 상태인 Fig. 5, Fig. 6의 결과와 비교해서 Fig. 8, Fig. 9에서는

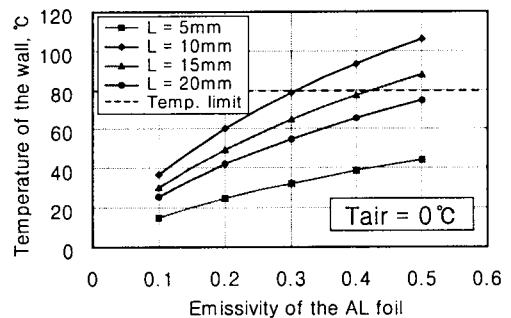


Fig. 8 Temperature of the wall to various emissivities at  $T_{air}=0^{\circ}\text{C}$  for various lengths.

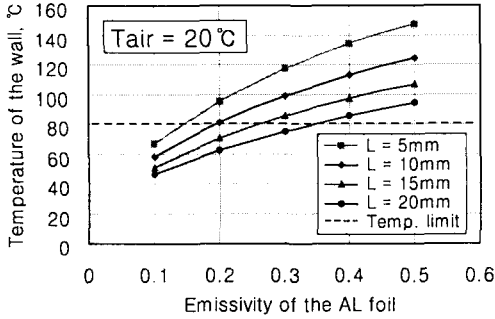


Fig. 9 Temperature of the wall to various emissivities at  $T_{air}=20^{\circ}\text{C}$  for various lengths.

제상 히터와 내벽의 거리가 20 mm였을 때 내벽의 온도가 상당히 낮아졌음을 확인할 수 있다. 또한 호일의 방사율이 0.1~0.2 사이임을 고려할 때 내벽측 온도는 80°C 이하를 유지하고 있다. 그러나, 냉장고의 증발기 설치위치가 매우 협소함을 고려할 때 제상 히터와 내벽 사이의 거리가 10 mm 이하로 설치될 경우 내벽의 온도가 제한 온도인 80°C 이상으로 상승하는 경우가 발생하게 된다.

3.3 제상 히터와 내벽 사이에 얇은 알루미늄 판이 위치했을 경우

제상 히터와 내벽 사이에 얇은 알루미늄 판이 위치했을 때 내벽온도에 대한 계산을 수행하였다. 이때 산화 알루미늄의 방사율은 0.2이다. 판 (shield)의 위치는 제상 히터와의 거리가 5 mm인 곳에 위치시켰다. 따라서 제상 히터와 내벽 사이의 공간이 판에 의해서 나누어지므로 새로이 판 측계수를 고려할 때  $F_{h-s}$ 는 0.77이 된다.

3.2절의 방법으로 알루미늄 판의 온도는 약 74~95°C로 계산되어지고, 전체 과정의 유효방사율 (effective emissivity)은 식(11)로 주어지고 계산 결과 0.19를 얻을 수 있었다.

$$\epsilon_{eff} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_w} + \frac{1}{\epsilon_{shield} - 1}} \quad (11)$$

Fig. 10, Fig. 11에 방사율 변화에 따른 내벽온도의 예측값을 나타내었다. 그리고 플라스틱과

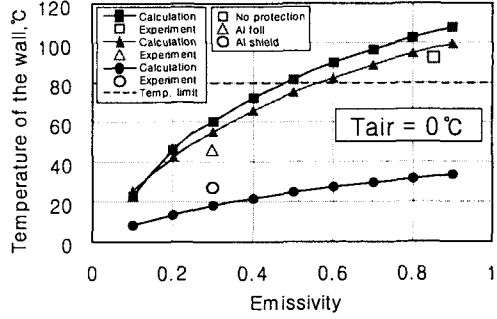


Fig. 10 Temperature of the wall to various emissivities at  $T_{air}=0^{\circ}\text{C}$  for various methods to product radiation.

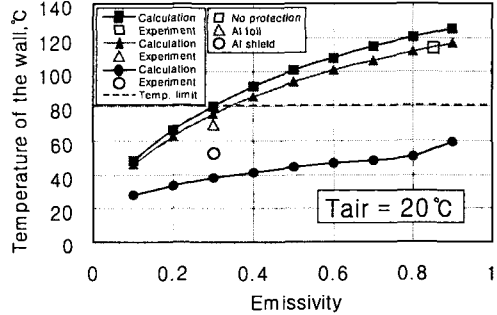


Fig. 11 Temperature of the wall to various emissivities at  $T_{air}=0^{\circ}\text{C}$  for various methods to product radiation.

알루미늄의 방사율을 고려하여 앞의 3.1, 3.2, 3.3 절의 방법에 대한 실험값을 표시하였다. 실험은 핀-튜브형 증발기와 Table 1의 사양을 가진 제상 히터를 730리터급 냉장고에 설치하였다. 히터와 내벽 사이의 거리는 20 mm로 설치하였고, 증발기 주위의 온도를 열전대(Thermocouples)를 이용하여 측정하였다. 표시된 온도는 제상과정에서의 가장 높은 온도를 표시하였다.

모델링을 통한 예측값과 실험값의 차이는 3.1, 3.2절의 경우는 실험값이 낮게 나타나고 있는데 이것은 내벽 반대편으로의 열전달 때문인 것으로 생각되며, 3.3절의 경우에는 예측값이 높게 나타나고 있는데 이것은 알루미늄 판에서의 전도로 인한 열의 전달이 모델링의 수행시에 가정한 것보다 작게 일어나기 때문인 것으로 사려된다.

내벽을 보호하기 위한 장치가 없는 3.1 경우에는 내벽의 온도가 80°C 이상으로 나타나고 있으며, 3.2의 경우에는 80°C 이하로 유지되고 있으나

이것은 히터와 내벽 사이의 거리가 20 mm인 경우이다. 플라스틱 내벽의 온도는 3.3의 방법을 적용하였을 때 모델링에서는 15~60°C, 실험값은 60°C 이하의 값을 나타내므로 가장 낮은 온도를 유지하고 있다.

#### 4. 결 론

가정용 냉장고의 제상과정에서 제상 히터 작동시 플라스틱 내벽의 온도를 예측하고 내벽의 온도를 일정수준 이하로 유지하기 위한 방법을 제시하고 확인하는 실험과정을 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 거리 및 방사율에 따른 제상 히터 작동시 내벽온도의 변화에 대해서 정량적으로 나타낼 수 있었다.

(2) 내벽을 보호할 수 있는 장치가 없는 경우에 내벽과 제상 히터와의 거리가 짧을 경우 제상 히터의 열에 의해서 내벽이 손상될 가능성이 있으므로, 안전성을 확보하기 위해서는 제상 히터와 내벽 사이의 거리가 25 mm 이상이어야 함을 확인할 수 있다.

(3) 막(foil) 형태의 알루미늄을 내벽에 부착함으로써 내벽온도를 제어할 수 있음을 확인할 수 있다.

(4) 증발기 설치조건을 고려할 때 판(shield) 형태의 알루미늄을 내벽과 제상히터 사이를 적절히 위치시킴으로써 복사열 차단을 통해 안전성을 확보할 수 있다.

#### 참고문헌

1. Aoki, K., Hattori, M. and Edayoshi, A., 1989, Characteristics on heat pump system due to frosting, ASME, Vol. 4.
2. Aoki, K., Hattori, M., Chiba, S. and Hayaishi, Y., 1981, A study of the melting process in ice-air composite materials, ASME paper 81 - WA/HT.
3. Aoki, K., Hattori, M. and Ujiie, T., 1988, Snow melting by heating from the bottom surface, JSME International Journal series II, Vol. 31, No. 2, pp. 269-275.
4. Inaba, H. and Otake, H., 1993, Snow melting mechanism of radiative heat absorption material, JSME(B), Vol. 59, No. 567, pp. 278-285.
5. Inaba, H., Otake, H. and Nozu, S., 1992, Fundamental study on a horizontal frost layer melted from above by radiative heat, JSME(B), Vol. 58, No. 555.
6. Inaba, H. and Imai, S., 1996, Study on sublimation phenomenon of horizontal frost layer exposed to forced convection air flow and radiation heat, Transactions of the ASME, Vol. 118, pp. 694-701.
7. Sugawara, M., Kirihoshi, C. and Fujita, T., 1988, The melting behavior of an ice particles layer on a heated base with fins, JSME(B), Vol. 54, No. 508, pp. 2838-2841.
8. Sugawara, M., Uemura, S., Yajima, R., Kirikoshi, C. and Fujita, T., 1989, Study of melting of frost on heat exchanger for heat pump, JSME(B), Vol. 55, No. 510, pp. 504-509.
9. Sugawara, M., Uemura, S., Yajima, R., Takahashi, T. and Fujita, T., 1990, Melting of frost on heat exchanger of a heat pump, JSME(B), Vol. 56, No. 531, pp. 3457-3461.
10. Sugawara, M., Sakae, S. and Fujita, T., A basic study of defrost of heat exchanger, JSME(B), Vol. 57, No. 537, pp. 3457-3461.
11. Allard, J. and Heinzen, R., 1988, Adaptive defrost, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 24, No. 1, pp. 39-42.
12. Frank P. Incroper and David P. Dewitt, 1996, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, pp. 851-853.
13. Frank P. Incroper and David P. Dewitt, 1996, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, p. 722.
14. Frank P. Incroper and David P. Dewitt, 1996, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, p. 490.