

냉장고 멀리언부 구조보강용 철구조물의 열손실 영향 연구

하지수

계명대학교 환경과학과

(2014년 2월 17일 접수, 2014년 5월 19일 수정, 2014년 5월 23일 채택)

A Study on the Heat Loss Effect of Steel Structure in a Refrigerator Mullion

Ji Soo Ha

Department of Environment Science, Keimyung University

(Received 17 February 2013, Revised 19 May 2014, Accepted 23 May 2014)

요약

본 연구는 냉장고의 냉장실과 냉동실 사이에 있는 멀리언부의 가스켓 주위의 열전달 해석을 수행하여 이 부분에서 열손실을 크게 하는 구조물인 구조보강용 철구조물 유무에 따른 전산해석을 통한 열전달 해석과 이의 결과에 대한 검증을 위해 냉장고 내부 벽면의 온도를 측정하여 열손실 분석을 통한 냉장고 열손실을 개선하는 것을 목적으로 하였다. 본 연구를 통해 철구조물이 있는 경우에 이를 통하여 고온의 Hotline과 외부 공기의 열이 잘 전달되어서 냉장고의 열손실에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있었으며 이를 제거하면 냉장고 열손실이 24.8% 감소하여 철구조물을 제거하는 것이 냉장고 열손실 설계 개선을 크게 향상시킴을 알 수 있었다.

주요어 : 냉장고, 철구조물, 열손실, 열유속, 열전달량, 멀리언

Abstract - The present study has been carried out to reduce the heat loss from a refrigerator by numerical heat transfer analysis and temperature measurement experiment for the verification of heat transfer analysis result. To perform this purpose, two dimensional heat transfer analysis and measurement of temperature on the surface of freezer for the horizontal cross sectional plane of a refrigerator has been accomplished. From the present study, it could be seen that the steel support in the mullion near gasket region has a heat transfer characteristics which transfer outside heat well from the high temperature hotline and outside air to the inner refrigerator. The effect of removing steel support on the reducing heat loss of a refrigerator was 24.8% and removing steel support might introduce significant improvement of refrigerator heat loss.

Key words : Refrigerator, Steel support, Heat loss, Heat flux, Heat transfer rate, Mullion

1. 서 론

냉장고는 내부의 냉기를 유지하기 위해 냉매를 압축하는 압축기, 액체 상태로 복원하는 응축기, 증발시켜 냉기를 생산하는 증발기 그리고 단열재로 되어

있는 냉장고 본체로 구성되어 있다. 냉장고의 열손실은 냉장고 소비전력과 직결되어 있어서 냉장고의 열손실을 줄이는 것이 냉장고 제품의 경쟁력을 향상시키는 가장 큰 요소 중의 하나이다. 냉장고의 열손실을 줄이기 위해서는 냉장고 사이클을 최적화하는 방법과 냉장고 본체의 단열손실을 줄이는 방법 등이 있는데 많은 연구 들이 냉장고 단열 손실을 줄이는데

[†]To whom corresponding should be addressed.

Department of Environment Science, Keimyung University
Tel : 053-580-5919 E-mail : jisooa@kmu.ac.kr



Fig. 1. Photograph of (a) test refrigerator in a constant temperature and constant humidity chamber and (b) thermocouple installation at the mullion side wall and freezer side wall.

노력을 기울이고 있다. 냉장고의 열손실은 크게 냉장고 벽면을 통하여 나가는 열손실, 냉장고 문에 있는 가스켓을 통한 열손실, 문의 개폐에 따른 냉기 유출에 따른 열손실 등 여러 가지가 있다. 냉장고의 열손실은 냉장고 문에 있는 냉장고 가스켓을 통하여 냉장고 전체의 약 30%의 열손실이 발생하고 있으며 이를 개선하는 연구⁽¹⁻⁶⁾도 많이 이루어지고 있다. 냉장고 벽면은 일반적으로 냉장고에 널리 사용하는 단열재인 PU Foam(폴리우레탄 폼)을 사용하는데 냉장고의 고급화 추세에 따라 열전도율이 PU Foam의 1/10정도로 낮은 진공단열재(Vacuum Insulation Panel, VIP)를 사용하기도 한다.

냉장고를 가동하면 냉장고 내부의 낮은 온도로 말미암아 냉장고 외부 벽면의 온도가 낮아져서 냉장고 벽면에 이슬이 생기는 결로현상이 발생할 수 있다. 이러한 것을 방지하기 위해 냉장고 가스켓 주위에 압축기에서 나온 고온의 냉매를 배관(hotline)을 통해 흐르게 하여 이슬이 생기지 않도록 하고 있다. 냉장고 가스켓 부근에서 열손실 큰 이유는 두께가 얇은 가스켓이 냉장고 내부와 외부에 가깝게 있어서 열손실이 다른 곳 보다 크게 되는 이유도 있으며 또한 이 부근에 고온의 냉매 배관이 흐르기 때문에 이에 따른 열손실이 크기 때문이다.

본 연구에서는 냉장고의 열손실을 줄이기 위해 고온의 hotline 부근의 냉장고 열전달 구조를 최적화하여 냉장고 소비전력을 개선하고자 수행하였다. 이를 위해 냉장고의 냉장실과 냉동실 사이에 있는 멀리언부의 가스켓 주위의 열전달 해석을 수행하여 이 부

분에서 열손실을 크게 하는 구조물인 구조보강용 철 구조물 유무에 따른 전산해석을 통한 열전달 해석과의 결과에 대한 검증을 위해 냉장고 내부 벽면의 온도를 측정하여 열손실 분석을 수행하여 냉장고 열손실을 개선하는 것을 목적으로 하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용한 실험 장치는 진공단열재 내장 빌트인 냉장고 시료로서 좌우에 냉장실과 냉동실이 있다. 냉장고의 용량은 708 liter이다. 냉장고 시료를 항온항습챔버에 설치하여 냉장고 외부온도를 32°C로 하고 냉동실 내부 온도는 -20°C, 냉장실 내부 온도는 3°C로 설정하여 운전하였다. 냉장고를 항온항습챔버를 가동하여 운전하면 냉장고가 설정온도로 되어 안정화되기까지 몇 시간이 소요된다. 이 이후에는 압축기가 주기적으로 가동되어 냉장고의 소비전력, 냉장고 내부 온도 등이 시간에 따라서 주기적으로 변하게 된다. 본 연구의 실험에서는 이렇게 안정화 된 이후에 소비전력이 주기적으로 변하는 시간 구간에서 8주기의 시간 구간에서 온도를 측정하여 평균온도를 산출하였다. 온도 센서는 T-type 열전대를 이용하였다.

본 연구에서 실험은 냉장고 냉동실의 벽면 온도를 측정하여 전산해석을 통한 온도 분포 해석 결과와 비교하여 해석 결과의 신뢰성을 검증하는데 이용하였다. Fig.1에 본 연구의 냉장고 시료를 항온항습챔버에 장착한 것과 냉장고 냉동실에 온도를 측정하기 위하

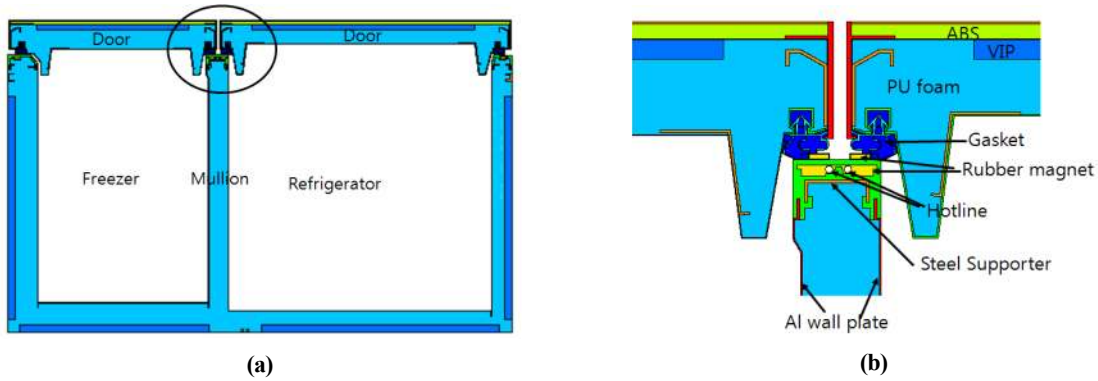


Fig. 2. Computational domain of (a) the horizontal cross sectional plane of a refrigerator and (b) the detail configuration of door and mullion near gasket region.

여 온도 센서를 부착한 것을 함께 나타내었다. 온도 측정은 냉동실 수직방향 중간 위치에서 수행하였으며 멀리언부는 열전달 해석 결과에서 온도 분포가 급격하게 변하는 곳이라서 상부(8개소)와 하부(5개소) 두 부분에 열전대를 부착하였다. 멀리언부 건너편 측면에서도 열전대를 설치하여(5개소) 온도를 측정하였으며 냉동실 가운데의 동구는 냉동실 내부 온도가 설정 온도가 되는지 검증하기 위하여 설치하였다. 멀리언부와 냉동실 측면에 있는 열전대는 냉장고 내부의 냉기 유동에 의한 대류 열전달 영향을 최소화하기 위해 온도 측정 부위를 PU Foam으로 벽에 부착시켰다.

3. 수치해석방법

본 연구에 사용한 냉장고에서 멀리언부 구조보강용 철구조물의 열전달 효과를 해석하기 위해 냉장고 전체 형상을 모델링하여 진행하지 않고 냉장고의 높이 방향으로 중간 높이에서의 2차원 단면에 대한 형상을 모델링하여 해석을 진행하였다. Fig. 2에 2차원 단면 형상과 각 부분 명칭을 표기하여 나타내었다.

냉장고 단면은 냉동실(Freezer)과 냉장실(Refrigerator)로 구성되어 있으며 냉동실과 냉장실 사이의 격벽을 멀리언(Mullion)으로 표현하였다. 멀리언과 냉장고 문(Door)이 만나는 곳을 Fig. 2(b)에 자세히 나타내었는데 멀리언부 구조보강용 철구조물(Steel Support)를 비롯해서 진공단열재(VIP, Vacuum Insulation Panel), PU 폼, 가스켓, 고무자석, Hotline, 알루미늄 벽면, ABS등으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 Fig. 2(b)에 나타난 철구조물의 유무에 따른 열전달 특성을 살펴봄으로써 이를 통한 열손실

Table 1. Thermal conductivities for the present used materials

Material	Thermal conductivity (W/mK)
PU foam	0.026
VIP	0.0032
Al	202
Gasket	5
Steel	14.9
ABS	0.19
Rubber magnet	10
Air	0.024

을 정량적으로 평가하고 열손실 저감을 위해 이에 대한 제거 효과를 진단하기로 한다. 구성 부품에 대한 열전도율은 Table 1에 나타내었다.

얼음배출구에 대한 열전달 해석에 적용한 지배방정식은 정상상태 2차원 열전도 방정식을 이용하였다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(k \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k \frac{\partial T}{\partial y}) = 0 \tag{1}$$

식 (1)에서 좌표 x, y는 Fig. 2에서 수평과 수직 방향 좌표이며 k는 열전도율, T는 온도를 나타낸다.

본 연구에서 열전달 해석에 사용한 전산해석 소프트웨어는 열유체 전산해석에 널리 사용되고 있는 상용코드인 Fluent 소프트웨어를 사용하였다. 격자의 개수는 약 350만개를 사용하였다. 냉장고 냉동실 내부의 온도 경계 조건은 -20°C,이며 냉동실은 3°C,로 설정하였고 냉장고 외부의 온도는 32°C,이다. 냉장고 내부에 있는, 이슬방지용 Hotline의 벽면 온도는

38°C,fn 설정 하였다. 냉장고 내부의 벽면 대류 열전달 계수는 15w/m²K이고 냉장고 외부는 자연대류로 간주하여 6w/m²K으로 설정하였다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 구조보강용 철구조물 유무에 따른 냉장고 온도 분포 특성

구조 보강용 철구조물 유무에 따른 냉장고의 온도 분포 특성을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 냉장고 수평 단면에서의 전체 온도 분포를 보여주고 있고 Fig. 4(b)는 구조보강용 철구조물이 있는 경우의 멀리언 가스켓 부근의 온도분포를 상세히 보여주고 있다. Fig. 4(c)는 구조보강용 철구조물 대신 이 부분을 PU Foam으로 대체한 경우의 온도 분포이다. 전체 온도 분포를 살펴보면 가스켓 부근에 있는 고온의 Hotline과 외부 온도에 따라 이 부분에서 온도가 높음을 알 수 있다. 이런 온도 분포로부터 가스켓 부근에서 열손실이 상대적으로 크게 나타날 것으로 예측할 수 있다.

Fig. 4(b)와 (c)의 온도 분포를 살펴보면 Hotline 아래에 있는 구조보강용 철구조물의 영향으로 철구조물이 있는 경우가 철구조물이 없는 경우 보다 Hotline 밑 부분에 상대적으로 높은 온도 분포가 넓게 분포하고 있음을 알 수 있다. 또한 왼쪽의 냉동실 벽면으로 철구조물이 있는 경우가 열이 잘 전달되어 철구조물이 없는 경우에 비해 상대적으로 높은 온도 분포를 보여주고 있다.

Fig. 5에 멀리언 가스켓 영역 부근에서 열유속 벡터를 비교하여 나타내었다. 열유속 벡터는 다음과 같은 식으로 도출하였다. 아래의 식에서 q_x 는 수평방향 열유속이고 q_y 는 수직방향 열유속이며 q_{mag} 는 열유속 벡터의 크기이다.

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

$$q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad (3)$$

$$q_{mag} = \sqrt{q_x^2 + q_y^2} \quad (4)$$

Fig. 5(a)를 살펴보면 고온의 Hotline 열이 철구조

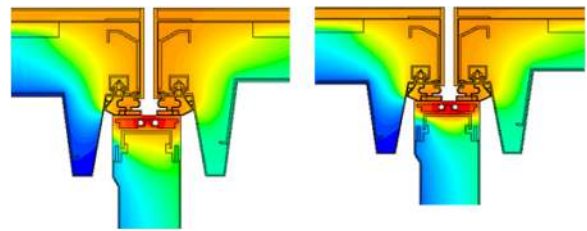
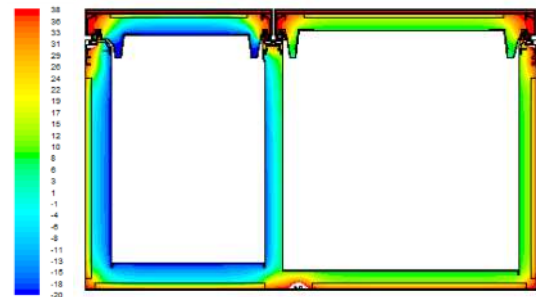


Fig. 4. Computational domain of (a) the horizontal cross sectional plane of a refrigerator and (b) the detail configuration of door and mullion near gasket region.

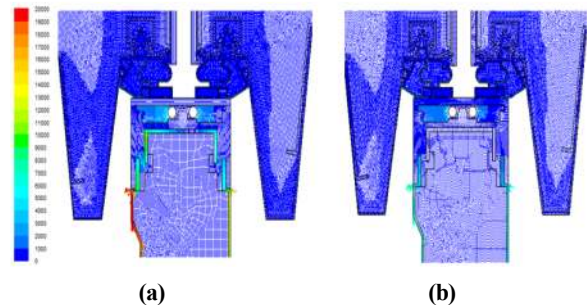


Fig. 5. Heat flux vectors of (a) the mullion gasket region with the steel support and (b) the mullion gasket region without the steel support.

물을 타고 냉장고 내부 벽면의 알루미늄으로 잘 전달되는 것을 확인할 수 있다. 반면에 Fig. 5(b)를 관찰하면 철구조물 부분을 PU Foam으로 대체하였기 때문에 Fig.5(a)와 같이 철구조물 부분으로 열이 전달되는 것이 철구조물이 있는 경우처럼 잘 나타나지 않으며 냉장고 내부 벽면의 알루미늄으로의 열전달이 상대적으로 작다는 것을 확인할 수 있다. 다음 절에는 철구조물 유무에 따라 냉장고 내부로 열이 전달되는 것을 정량적으로 비교하기로 한다.

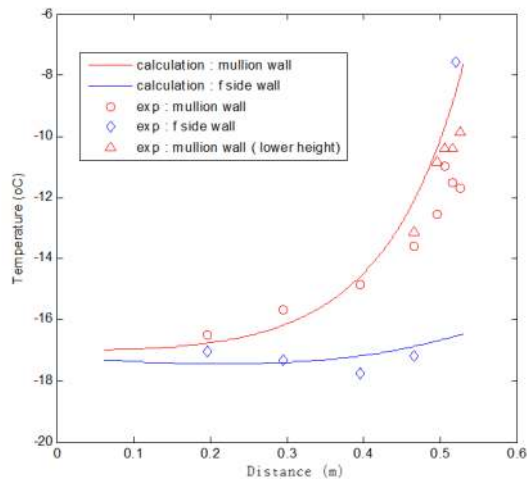


Fig. 6. Comparison of temperature distribution between experimental and calculated results at the surface of freezer mullion wall and freezer side wall.

4.2. 냉장고 벽면 온도 및 열유속 분포 비교

본 연구에서는 2절에서 언급한 바와 같이 냉동실 측에서 멀리언 부분 벽면과 반대편 벽면에서 냉장고 가동시의 온도를 측정하여 실험 결과와 해석 결과의 온도를 비교함으로써 열전달 해석 결과의 타당성을 검증하기로 한다. 이렇게 비교한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에는 Fig. 1(b)에 나타난 위치에서 온도를 측정한 결과와 이에 해당하는 위치의 온도 해석 결과를 동시에 나타내었다. 실험에서 멀리언 벽면은 Fig. 1(b)에서와 같이 위와 아래 두 부분에서 측정하여 같이 나타내었다. Fig. 6에서 수평축은 Fig. 1(b)에 화살표로 나타낸 것과 같이 냉장고 안쪽 벽에서부터 냉장고 문 방향으로의 길이 좌표를 나타낸다. 멀리언 부분 벽면과 반대편 벽면에서의 온도 실험 결과와 해석 결과는 잘 일치함을 관찰할 수 있다. 실험결과와 해석 결과가 크게 차이나는 곳은 반대편 벽면에서 냉장고 문 부근이며 측정된 온도가 해석 결과 보다 크게 높게 나타나는데 이는 Fig. 1(b)에서 볼 수 있듯이 실제 냉장고에서 이 부분 부근에 냉장고 내부 조명을 위해 LED 등이 길게 설치되어 있어서 가스켓 주위의 Hotline과 외부의 열이 냉장고 내부로 전달되지 않고 이 부분에만 집중적으로 영향을 주기 때문에 나타나는 현상이다.

Fig. 6의 결과를 살펴보면 냉동실 측면 벽면의 온도는 길이 방향으로 가면서 온도 변화가 크지 않음을

알 수 있다. 그러나 멀리언 부분은 안쪽 벽면에서부터 냉장고 문 방향으로 가면서 온도가 급격히 증가하는 것을 관찰할 수 있는데 안쪽 온도가 약 -17°C 이지만 냉장고 문 인접한 곳에는 -8°C 까지 상승하였다. 이렇게 급격히 온도가 증가하는 것은 고온의Hotline과 외부 온도가 구조보강용 철구조물 존재로 인한 열전달 촉진으로 기인한다고 볼 수 있다. 이러한 열전달 경로는 이미 Fig. 5의 열유속 벡터 분포에서 관찰한 바 있다. 냉장고 내부 온도 측정 결과와 본 연구의 열전달 해석을 통한 온도 분포 결과가 잘 일치한다는 것을 Fig. 6에서 확인 가능하였다.

Fig. 7에 구조보강용 철 구조물의 유무에 따른 냉동실의 각 벽면에서 온도와 열유속 분포를 비교하여 나타내었다. Fig. 7(a)는 철구조물이 있는 경우에 냉동실 벽면에서의 온도 분포를 보여주고 있는데 빨간 선과 검은 선으로 나타낸 온도 분포는 이미 Fig. 6에서 관찰하였던 결과이다. 냉장고 문과 문의 반대편 벽면의 온도 분포는 냉장고 측면의 온도 분포와 크기가 비슷한 것을 확인할 수 있다. Fig. 7(b)는 철구조물이 제거 되어 이 부분이 PU Foam일 때의 각 벽면 온도 분포이다. 냉장고 측면, 문 그리고 문의 반대 벽면에서의 온도 분포는 철구조물이 있는 경우와 유사한 분포를 보여 주고 있다. 그러나 멀리언 부분의 온도 분포를 보면 다른 벽면 보다는 온도가 약간 크게 나타났지만 철구조물이 있는 경우에서 관찰한 바 있는 문 쪽으로 가면서 급격하게 온도가 올라가는 경향이 줄어들고 약간 상승하는 것을 관찰할 수 있다.

온도 분포의 결과에서 예측할 수 있듯이 Fig. 7(c)와 (d)에 나타난 열유속 분포에서도 철구조물 존재로 인한 열전달 차이를 관찰할 수 있다. Fig. 7(c)는 철구조물이 있는 경우의 각 벽면에서 냉장고 내부로 전달되는 열유속 분포를 보여 주고 있는데 멀리언 부분을 제외한 벽면에서는 거의 유사한 크기의 변화를 보여 주고 있고 멀리언 부분에서는 온도 분포에서 관찰한 것과 같이 냉장고 문 쪽으로 갈수록 열유속의 절대 값이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 철구조물이 없는 경우인 Fig. 7(d)를 살펴보면 멀리언 부분의 열유속 분포가 상대적으로 크게 약화된 것을 관찰할 수 있다. 이러한 결과로부터 철구조물의 존재가 멀리언부의 열손실에 매우 지대한 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

철구조물의 존재가 냉장고의 열손실에 얼마만큼 영향을 미치는지를 Table 2에 나타내었다. Table 2는

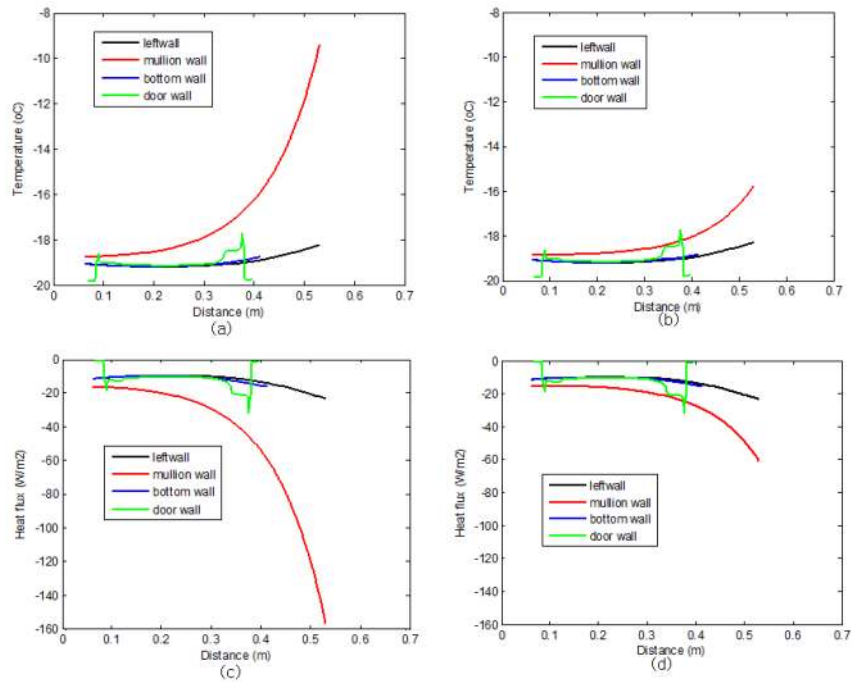


Fig. 7. Comparison of temperature and heat flux distributions between the case with the steel support and the case without the steel support. (a) temperature distribution with the steel support, (b) temperature distribution without the steel support (c) heat flux distribution with the steel support and (d) heat flux distribution without the steel support.

Table 2. Comparison of heat transfer rate between the case with steel support and the case without steel support

	Freezer	Refrigerator	Total
q'_{ref} with steel support (w/m)	48.30	23.48	71.78
q' without steel support (w/m)	37.19	16.79	53.98
$\Delta q'$ (w/m)	11.11	6.69	17.80
$\Delta q'/q'_{ref}$ (%)	23.00	28.49	24.80

철구조물이 있는 경우와 없는 경우에 냉장고 수평 단면에서 냉장고 높이 방향 단위 길이 당 열전달량을 정리하였는데 냉동실, 냉장실 그리고 냉장고 전체로 구분하여 나타내었다. 철구조물이 있는 경우의 전체 열전달량은 71.78w/m이며 철구조물이 없는 경우는 53.98w/m로서 24.8% 열손실이 저감되는 것을 확인할 수 있다. 냉동실은 23.0%, 냉장실은 28.49% 감소하는 것을 함께 확인할 수 있다. 이로서 멀리언부 철구조물을 제거하면 냉장고의 열손실을 약 25% 저감할 수 있음을 알 수 있으며 이러한 결과를 바탕으로 냉장고의 열손실 설계 개선에 활용 가능하였다.

5. 결론

지금까지의 냉장고의 냉장실과 냉동실 사이에 있는 멀리언부의 가스켓 주위의 열전달 해석을 수행하여 이 부분에서 열손실을 크게 하는 구조물인 구조보 강용 철구조물 유무에 따른 열전달 해석과 분석을 수행하였다. 또한 열전달 전산 해석의 결과에 대한 검증을 위해 냉장고 내부 벽면의 온도를 측정하여 열손실 분석을 수행하여 열전달 특성을 알아보았으며 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) 냉장고 멀리언부에 있는 철구조물이 이 부근에 있는 고온의 Hotline과 외부 공기의 열을 냉장고 내부로 전달하는 것을 냉장고 온도 분포와 열유

- 속 벡터 분포로 확인할 수 있었다.
- (2) 냉동실의 멀리언 벽면과 반대편 벽면의 온도 측정결과와 열전달 해석 결과는 잘 일치한 것을 확인하였으며 이로부터 본 연구의 열전달 해석 결과를 신뢰할 수 있음을 알 수 있었다.
- (3) 냉동실 멀리언 벽면에서 온도와 열유속이 냉동실 문 쪽으로 가면서 급격히 증가하는 것을 관찰할 수 있었으며 이는 멀리언에 있는 철구조물이 고온의 Hotline과 외부공기의 열을 냉장고 내부로 잘 전달하고 있다는 것으로 판단할 수 있으며 이로부터 철구조물의 존재는 열손실에 지대한 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.
- (4) 멀리언부의 철구조물을 제거한 경우 열손실량이 24.8% 감소하였으며 이로부터 냉장고 열손실 개선을 위해 멀리언부 철구조물을 제거하는 것이 효과적임을 알 수 있었다.

Refrigeration Engineering, 2009, Vol. 21, No. 5, pp. 305-310.

6. Ha, J.S., A study on the unsteady temperature characteristics at the refrigerator gasket", The Korea Society for Energy Engineering, 2012, Vol. 21, No.2, pp. 136-141.

References

1. Park, J. K., Optimization of heat insulation system for a household refrigerator, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 2003, Vol. 15, No. 2, pp. 95-102.
2. Jung, D. S., Computer simulation of refrigeration cycle of domestic refrigerators combined with cabinet heat transfer, Proceedings of the SAREK 1993 Winter Annual Conference, 1993, pp. 88-94.
3. Lee, M. Y., Choi, S. J. and Kim, S. U., Evaluation on the cycle and adiabatic performance of a small multi-refrigeration system, Proceeding of the KSME, Autumn Annual Conference, 2003, pp. 769-774.
4. Moon, J. H., Park, S. K., Oh, S. K. and Kim, Y. J., Development of thermal-flow analysis program for refrigerator duct systems, Proceedings of the SAREK 2003 Winter Annual Conference, 2003, pp. 393-398.
5. Ha, J. S., Jung, K. S., Kim, T. K., Kim, K. H. and Kim, S. R., The effect of gasket shape on heat loss reduction in a refrigeration, Korean Journal of Air-Conditioning and