

## 가정용 냉장고의 단열 최적화

박진구<sup>†</sup>

LG전자(주) 디지털어플라이언스연구소 냉장고그룹

### Optimization of Heat Insulation System for a Household Refrigerator

J. K. Park<sup>†</sup>

DA Lab., LG Electronics Inc., 327-23 Gasan-dong, Keumchun-gu, Seoul 153-802, Korea

(Received November 12, 2002; revision received December 13, 2003)

**ABSTRACT:** Optimization for the insulation thickness and external shape of a household refrigerator is performed in order to minimize thermal load through the insulation wall. The one dimensional conduction heat transfer model is adopted to calculate thermal load. Calculus of variation is employed to optimize the thickness and shape of refrigerator or freezer. The uniform distribution of an insulation thickness and cubed external shape make thermal load minimize. Finally, by using both of the computational and experimental method, the thermal load is minimized for a refrigerator/freezer. It is shown that there exists optimal thickness of insulation walls and external shape for given the external cabinet dimensions and freezer and refrigerator internal volumes, Also, the analytical results are well agreed with the experimental results.

**Key words:** Insulation(단열), Thermal load(단열), Optimization(최적화)

#### 기 호 설 명

$A$  : 열전달면적 [ $m^2$ ]  
 $Bi$  : Biot 수,  $th/k$   
 $D$  : 깊이 [mm]  
 $M$  : 기계실 [mm]  
 $f$  : 목적함수  
 $H$  : 높이 [mm]  
 $h$  : 대류 열전달계수 [ $W/m^2\text{ }^\circ C$ ]  
 $k$  : 단열재 열전도계수 [ $W/m\text{ }^\circ C$ ]  
 $T$  : 온도 [ $^\circ C$ ]  
 $t$  : 단열벽 두께 [mm]

$\Delta T$  : 온도차 [ $^\circ C$ ]  
 $q$  : 단위면적당 열전달량 [ $W/m^2$ ]  
 $V$  : 체적 [ $m^3$ ]  
 $W$  : 폭(width)

#### 그리스 문자

$\lambda$  : Lagrange multiplier

#### 하첨자

$avg$  : 평균  
 $b$  : 사철판(barrier)  
 $d$  : 도어(door)  
 $f$  : 냉동실  
 $grill$  : 그릴팬  
 $t$  : 냉장고 내부

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-2-818-3511; fax: +82-2-856-0313

E-mail address: kcm@lge.com

- $k$  : 전도열전달
- $n$  :  $n$  번째 단열재
- $o$  : 냉장고 외부
- $r$  : 냉장실
- $w$  : 냉장고 벽면

1. 서론

가정용 냉장고는, 외부의 열이 냉장고 내부로 침입하는 것을 차단하기 위한 폴리우레탄과 같은 고성능 단열재와, 내부의 열을 외부로 효과적으로 배출시키기 위한 냉동사이클로 구성된다. 일반적으로, 냉장고의 에너지효율은 단열효율과 냉동사이클의 효율에 의해 좌우되며, 에너지소비량은 단열부하(단열재를 통하여 냉장고 내부로 침입하는 열량)에 비례하고 냉동사이클의 효율에 반비례한다. 따라서, 냉장고의 에너지소비량을 줄이기 위해서는 가능한 한 단열부하량을 줄이고 냉동사이클의 효율을 극대화시키는 것이 무엇보다도 중요하다.<sup>(1-8)</sup> 본 연구에서는 가정용 냉장고의 단열특성에 대한 이론 및 실험적 분석을 통하여 Cabinet 열전달 모델을 도출하고, 변분해석 및 전산해석을 통하여 냉장고 단열두께 분포 및 형상에 대한 최적화 방법을 제시하고자 한다. 이하에 제시되는 연구는 제반 500 L급 전자제어 간냉식 대형 냉장고를 기준으로 한다.

2. 냉장고 Cabinet 열전달 모델

외부공기로부터 냉장고 내부공기로의 열부하 유입은 외부공기와 내부공기의 온도차에 기인하며,

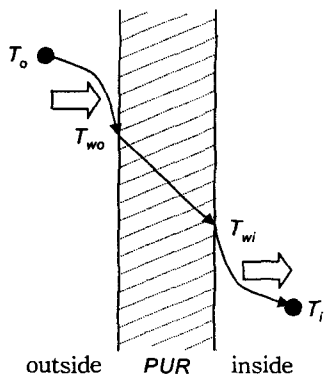


Fig. 1 Heat transfer through a cabinet wall.

Fig.1과 같이 냉장고 Cabinet 구조를 형성하는 단열재를 통하여 열전달이 이루어진다.

냉장고 단열부하(thermal load)의 유입은, 먼저 외부공기로부터 대류열전달을 통하여 냉장고 외벽면으로 열이 전달되고, 이어 전도를 통하여 외벽면으로부터 내벽면으로 열이 전달되며, 마지막으로 대류열전달에 의하여 내벽면으로부터 내부공기로의 열전달이 이루어진다.

일반적으로, 냉장고 단열벽면의 두께는 외형의 1/10 수준이며, 벽면 주위의 공기온도도 거의 일정하므로, 상기 열전달과정은 1차원 열전달 모델을 적용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$q = h_o(T_o - T_{wo}) = \frac{k(T_{wo} - T_{wi})}{t} = h_i(T_{wi} - T_i) = \frac{h_i(T_o - T_i)}{(1 + h_i/h_o + th_i/k)} \quad (1)$$

$$T_{wo} = \frac{(aT_o + bT_i + abT_i)}{(a + ab + b)}$$

$$T_{wi} = \frac{(aT_o + bT_i + abT_i)}{(a + ab + b)} \quad (2)$$

$$a = \frac{k}{th_o}, \quad b = \frac{h_i}{h_o}$$

여기서  $h_i = h_o = h$ 라고 가정하면,

$$q = \frac{h(T_o - T_i)}{(2 + Bi)}, \quad Bi = \frac{th}{k} \quad (3)$$

와 같이 표현된다. 식(4)에서 대류 열전달계수가 무한히 큰 경우( $h \rightarrow \infty$ )의 열전달량을  $q_k$ 라고 하면,

$$q_k = \frac{k(T_o - T_i)}{t} \quad (4)$$

이 되고

$$\frac{q}{q_k} = \frac{Bi}{2 + Bi} \quad (5)$$

이 된다. 식(4)는 전도만에 의한 열전달량을 나타내며, 식(5)는 실제의 열전달량과 전도만에 의한 열전달량의 비를 나타낸다. 식(5)에서 알 수 있듯

이 Bi 값이 클수록 전도에 의한 열전달저항이 대류에 의한 열전달저항에 비하여 커지므로 전도가 지배적인 열전달특성을 나타낸다. 일반적으로, 가정용 냉장고의 경우,  $t=65\text{ mm}$ ,  $k=0.0177\text{ W/m}^\circ\text{C}$ ,  $h_i=26.6/12.83\text{ W/m}^\circ\text{C}$ ,  $h_o=7.93\text{ W/m}^\circ\text{C}$  이므로  $Bi=97.7/29.1$ ,  $q/q_k=0.980/0.936$ (냉동실/냉장실) 이 된다. 따라서, 식(4)를 Cabinet 열전달 모델로 사용할 경우 2~6% 정도밖에 오차가 발생하지 않음을 알 수 있다. 본 연구에서는 식(4)를 열전달 해석모델로 사용함과 동시에, 실험을 통하여 측정된 내외벽면 온도차를 입력치로 사용하여 대류 열전달에 의한 오차를 보정하는 방법을 사용한다.

### 3. 냉장(동)전용고의 단열 최적화

#### 3.1 최적단열 두께

냉장고의 단열부하는 식(4)에서 알 수 있듯이 단열 두께에 반비례하므로, 단열 두께를 늘릴수록 단열부하는 줄어들게 된다. 그런데, 단열 두께를 늘리면, 냉장고의 유효내용적이 줄어들거나 외형용적이 커지게 되고, 단열재의 사용량 증가에 따른 비용도 증가하게 된다. 따라서, 동일한 단열재량을 사용하면서도 가장 단열부하를 적게 할 수 있는 방법을 생각할 필요가 있다.

냉장고의 유효내용적 및 단열재량이 주어질 때, 이를 이용하여 단열부하량을 최소화할 수 있는 냉장고의 최적단열 두께는 다음과 같이 변분해석을 이용하여 도출할 수 있다. 즉, 냉장고의 총합 단열체적을  $V_p$ 라 하면,

$$V_p = \sum A_n t_n = \text{constant} \quad (6)$$

이고, 단열부하량은

$$q = k\Delta T \sum \frac{A_n}{t_n} \quad (7)$$

과 같이 표현된다. 여기서, Lagrange multiplier  $\lambda$  를 도입하여 다음과 같이 목적함수  $f$ 를 정의하고

$$f = q + \lambda(\sum A_i t_i - V_p) \quad (8)$$

$f$ 의 定常化(stationary) 조건을 구하면

$$\frac{\partial f}{\partial t_n} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{1}{\lambda} = t_1^2 = t_2^2 = \dots = t_n^2 = t_{avg}^2$$

이 된다. 즉, 단열재량을 일정하게 사용할 경우, 단열부하량은, 단열 두께 분포가 균일할 때 최소로 됨을 알 수 있다.

#### 3.2 최적형상

냉장고의 외형용적이 정해질 경우, 단열부하를 최소화하기 위한 형상은 상기와 동일한 방법을 통하여 도출할 수 있다. 즉, 외형용적을  $V_o$ 라 하면,

$$V_o = DHW = \text{constant} \quad (10)$$

이때 단열부하량 및 목적함수  $f$ 는 다음과 같이 표현되며

$$q = \frac{k\Delta T(DH + HW + WD)}{t_{avg}} \quad (11)$$

$$f = q + \lambda(DHW - V_o)$$

목적함수  $f$ 에 대한 정상화 조건을 구하면

$$\frac{\partial f}{\partial D} = \frac{\partial f}{\partial H} = \frac{\partial f}{\partial W} = 0 \quad (12)$$

$$D = H = W$$

이 된다. 즉, 냉장고 외형이 정육면체일 때 단열부하량이 최소화되는데, 이는 외형이 정육면체일 때 열전달면적이 최소가 되기 때문이다. 현실적으로 정육면체 구조를 갖기 어려운 냉동냉장고를 제외한, 냉장전용고나 냉동전용고의 경우는 이러한 특성을 고려하여 형상을 결정할 필요가 있다.

### 4. 냉동냉장고의 단열 최적화

#### 4.1 실험

냉장고의 단열재를 통하여 유입되는 단열부하

Table 1 Temperature and thermal load distribution through cabinet wall

Position		Thickness (mm)	Area (m <sup>2</sup> )	Inner wall temp (°C)	Outer wall temp (°C)	Thermal load (W)
Left	Near eva.	97.8	0.029	-18.9	28.2	0.249
	A	67.3	0.158	-16.3	27.9	1.834
	B	55.1	0.088	-14.9	30.2	1.276
	SUM		0.275			3.359
Right	Near eva.	97.8	0.029	-17.8	27.6	0.240
	A	67.3	0.158	-16.0	27.6	1.807
	B	55.1	0.088	-16.0	29.6	1.288
	SUM		0.275			3.334
Top	Near eva.	88.3	0.047	-17.8	28.1	0.431
	A	68.5	0.238	-17.4	27.9	2.782
	B	52.5	0.131	-12.4	29.3	1.838
	SUM		0.416			5.051
Rear	A	76.8	0.357	-18.7	27.2	3.779
	B	42.0	0.014	-20.7	27.5	0.284
	SUM		0.371			4.063
Door		66.3	0.449	-16.8	28.1	5.385
SUM						21.191
Left	Near duct	56.9	0.114	4.2	29.6	0.899
	A	56.9	0.062	6.0	29.9	0.459
	B	56.9	0.006	4.2	29.6	0.049
	C	56.9	0.273	4.5	29.8	2.150
	D	46.5	0.103	7.9	32.8	0.977
	SUM		0.558			4.535
Right	Near duct	56.9	0.114	4.1	29.3	0.892
	A	56.9	0.062	5.4	29.5	0.462
	B	56.9	0.006	4.1	29.3	0.049
	C	56.9	0.273	4.1	29.3	2.143
	D	46.5	0.103	7.5	31.2	0.932
	SUM		0.558			4.479
Bottom	Near duct	71.5	0.141	5.1	32.0	0.939
	A	68.3	0.167	6.7	35.1	1.230
	B	65.0	0.302	6.3	28.5	1.819
	SUM		0.610			3.989
Rear	A	79.5	0.530	3.9	27.8	2.825
	B	56.1	0.069	5.3	28.6	0.505
	SUM		0.598			3.330
Door		52.8	0.904	4.8	28.8	7.269
SUM						23.601

$$h_o = 7.93 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$$h_i = 26.6/12.83 \text{ W/m}^2\text{°C} (\text{냉동/냉장})$$

$$k = 0.0177$$

량은 다음과 같은 방법으로 측정하였다. 즉, 냉장고 도면을 이용하여 내외벽면을 10~15의 영역으로 나누고, 각 영역의 중심위치에 열전대를 부착한 후 냉장고를 연속운전 또는 단속운전(on/off)시켜 안정된 상태에 도달한 후 영역별 내외벽면의 온도를 일정시간 측정하여 평균값을 취한다. 이때, 각 영역의 내외부의 중심위치는 가로 및 높이가 방향으로 서로 일치하여야 한다. 다음으로, 측정된 벽면온도와 식(4)를 이용하여 각 영역별

단열부하량을 계산한다. Table 1은 단속운전시 측정된 온도 및 단열부하량을 나타낸 것이다.

#### 4.2 전산해석

3.1절에서 언급한 바와 같이 주어진 단열재량에 대하여 단열부하량을 최소화하기 위해서는 냉장고 전체의 단열 두께를 균일하게 하여야 한다. 그런데, 냉동냉장고의 경우는 냉장실과 냉동실의 고내온도가 크게 다르므로 냉장실 및 냉동실에 대한 최적 두께가 서로 다르게 된다.

따라서, 본 연구에서는 전산해석방법을 이용하여 외형총범이 850 mm×1715 mm×729 mm(W×H×D)이고 냉장실 및 냉동실 내용적이 각각 387 L, 153 L인 냉장고를 대상으로, 다음의 세 가지 경우에 대한 전산해석을 통하여 최적단열 두께 및 형상을 도출하였다.

- Case 1 : 기존 냉장고의 단열 부하량 산출
- Case 2 : 기존 냉장고의 단열 두께 최적화
- Case 3 : 기존 냉장고의 형상 변경 최적화

먼저 Fig. 2와 같이 냉장고 형상을 단순화하고, 아래와 같이 각 부의 치수를 독립변수( $W_f$ ,  $W_r$ ,  $D_f$ ,  $D_r$ ,  $H_f$ ,  $H_r$ ,  $t_f$ ,  $t_r$ )로 하는 7원 1차 연립방정식을 유도한다.<sup>(9-11)</sup>

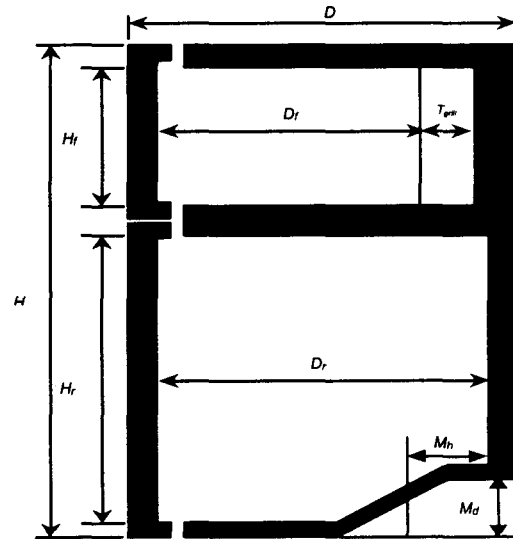


Fig. 2 Schematic for side view of a refrigerator.

Table 2 Comparison of the results between experiment and simulation

	$q_{total}$ (W)	$q_f$ (W)	$q_r$ (W)	$T_f$ (mm)	$T_r$ (mm)
Test	44.8	21.2	23.6	66~76	53~80
Case 1	45.7	23.3	22.5	66~76	53~80
Case 2	42.6	20.8	21.8	84	67

$$\begin{aligned}
 W_f &= W - 2t_f \\
 W_r &= W - 2t_r \\
 D_f &= D - t_{df} - t_f - t_{grill} \\
 D_r &= D - t_{dr} - t_r \\
 H_f &= \frac{V_f}{W_f D_f} \\
 H_r &= \frac{V_r + WM_d M_h}{W_r D_r} \\
 H &= H_f + H_r + t_f + t_b + t_r
 \end{aligned} \tag{13}$$

다음으로, 주어진  $t_f$ 에 대하여 식(13)을 만족하는  $t_r$ 을 bi-section method를 통하여 구하고, 냉장고의 총단열부하량은 다음 식으로부터 구한다.

$$q = q_r + q_f = \sum kA\Delta T_r + \sum kA\Delta T_f \tag{14}$$

Table 2는 4-1의 실험결과 및 Case 1, Case 2의 해석결과를 비교한 것이다. Table 2에서 Case 2의 데이터는 기존냉장고의 외형 및 유효내용적을 동일하게 유지하면서 냉장실 및 냉동실 단열 두께를 최적화한 값으로, 기존 대비 약 7% 정도 단열부하가 줄어들게 된다.

Fig. 3은 Case 2의 결과를 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 냉동실 단열 두께를 증가시킬수록 냉동실 단열부하는 감소하는 반면, 냉장실 단열 두께가 감소하여 냉장실 단열부하가 증

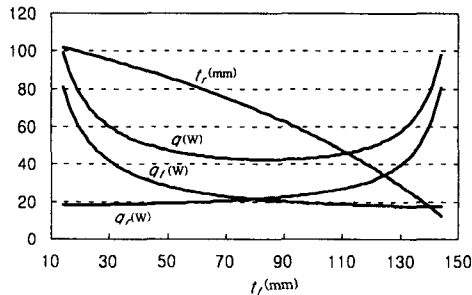


Fig. 3 Optimization of thermal load for Case 2.

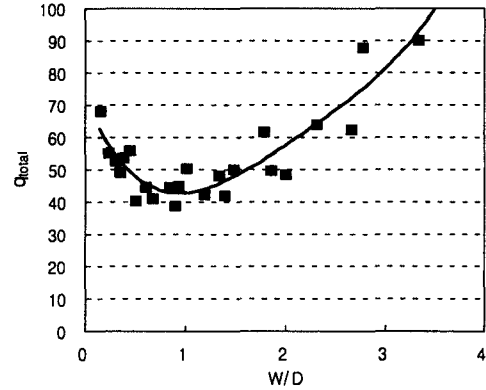


Fig. 4 Effect of an aspect ratio on the thermal load.

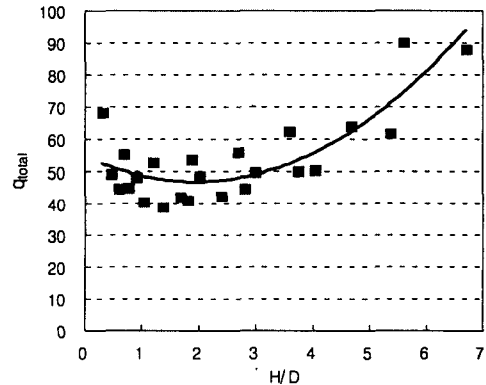


Fig. 5 Effect of an aspect ratio on the thermal load.

가하게 된다. 또한 냉장실 단열부하와 냉동실 단열부하를 합친 총단열부하량은 냉동실 두께가 증가함에 따라 감소하다가 다시 증가하는 경향을 나타낸다.

Fig. 4 및 Fig. 5는 Case 3에 대한 전산해석 결과를 나타낸 것으로, 외부용적을 동일하게 유지시킨 상태에서 기존 냉장고의 폭과 높이를 각각  $\pm 50\%$ ,  $\pm 25\%$ 로 변화시켰을 때의 단열부하량의 변화를 보여주고 있다.

Fig. 4에 나타난 바와 같이  $W/D$ 가 1에 가까울수록, 즉 폭과 깊이가 같아질수록 단열부하가 최소로 되며, Fig. 5와 같이  $H/D$ 가 1.5~2에서 단열부하가 최소로 된다. 여기서  $W/D=1$ ,  $H/D=1.5$ 로 하여 Case 2와 같은 전산해석을 수행하면 Table 3과 같은 결과가 얻어진다.

이상의 결과로부터 두께 및 형상 최적화를 통

Table 3 Simulation results for Case 3

	$q_{total}$ (W)	$q_f$ (W)	$q_r$ (W)	$T_f$ (mm)	$T_r$ (mm)
Case 3	39.4	19.9	19.5	88	67

하여 약 14%의 단열부하 저감이 가능하다는 것을 알 수 있다.

## 5. 결 론

지금까지 가정용 냉장고의 단열 최적화를 위한 이론 및 실험적인 고찰을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 가정용 냉장고의 단열부하량은 단열벽의 전도열전달에 의해 지배되므로(conduction dominant) 단열부하를 최소화하기 위해서는 단열 두께를 최적화하여야 한다.

(2) 냉장 또는 냉동전용고의 경우, 주어진 단열재량으로 단열부하량을 최소화하기 위해서는 모든 단열벽에 대하여 단열 두께를 균일하게 분포시켜야 한다. 또한, 외부형상은 정육면체 형상인 경우에 단열면적이 최소로 되어 단열부하 또한 최소가 된다.

(3) 냉동냉장고의 경우, 단열부하량에 대한 실험결과와 전산해석결과의 차이는 2% 이내이며, 냉장실과 냉동실의 단열 두께를 최적화했을 때 약 7%의 단열부하량을 줄일 수 있다.

(4) 냉동냉장고는 냉장실과 냉동실의 고내온도차 때문에 냉장실과 냉동실의 최적 단열 두께가 서로 다르며, 최적의 단열 두께 조합이 존재한다.

(5) 냉동냉장고의 형상은 형상비가  $W/D=1$ ,  $H/D=1.5$ 일 때 최소단열부하량을 얻을 수 있다.

## 참고문헌

- Nakatani, K., Matsuo, M., Yoshida, Y., Kuwara, Y. and Yamada, H., 1995, Simulation for Refrigerators Using HFC134a, National Technical Report, Vol. 41, No. 3, Jun, pp. 56-62.
- Satomura, M., Minato, K. and Kitabayashi, S., 1992, Dynamic Thermal Analysis for Household Refrigerator, Sharp Technical Journal, Vol. 54, pp. 15-18.
- Sunahara, Y., Ohse, N. and Kawamura, T., 1987, On a Total electric Power Evaluation for a Refrigerator System with Respect to the Ambient Temperature Variations, Transactions of the Japan Society of Mechanical engineers (Series C), Vol. 53, No. 492, pp. 1800-1805.
- Smith, L. K. and Potter, T. F., 1990, Assessment of the cost-effective energy conservation potential of advanced refrigerator insulation, ASHRAE Trans., Vol. 90, pp. 1341-1348.
- Griffith, B. T. and Arasteh, D., 1992, Advanced Insulations for Refrigerator/Freezers: The Potential for New Shell Designs Incorporating Polymer Barrier Construction, Lawrence Berkeley Laboratory-33376, Berkeley, CA, Nov.
- Wang, H. and Touber, S., 1990, Distributed dynamic modelling of a refrigerated room, Int. J. Refrig., Vol. 13, July, pp. 214-222.
- Ploug-Sorensen, L., Fredsted, J. P. and Willatzen, M., 1997, Improvements in the Modeling and Simulation of Refrigeration Systems: Aerospace Tools Applied to a Domestic Refrigerator, HVAC&R Research, Vol. 3, No. 4, October, pp. 387-403.
- Xu, X. and Clodic, D., 1996, Dynamic Simulation Model of a Vapor Compression Domestic Refrigerator Running with R134a, Proceedings of the 1996 International Refrigeration Conference at Purdue, pp. 489-494.
- Boughton, B. E., Clausing, A. M. and Newell T. A., 1996, An Investigation of Household Refrigerator Cabinet Thermal Loads, HVAC&R Research, Vol. 2, No. 2, pp. 135-148.
- Marques, M. E., 1996, Thermal load optimization of a two door refrigerator freezer, Proceedings of 47th International Appliance Technical Conference, pp. 83-90.
- Christensen, L. B., 1981, The insulation of freezers and refrigerators-how thick should it be?, Int. J. Refrig., Vol. 4, No. 2, March, pp. 73-76.

## Appendix

```

c.....common statement
  common/fil/vf, vr, w, h, d, hm, dm1, dm2, dm, dtf, dtr
  common/thic/tdf, tdr, tb, tgril, tgask
  common/alp/ df, dr, wf, wr, hf, hr, rk
  common/qfc/ qtf, qdf, qbf, qsf, qbaf
  common/afc/ atf, adf, abf, asf, abaf
  common/qrc/ qdr, qbr, qsr, qmr, qlr
  common/arc/ adr, abr, asr, amr, alr
c.....open file
  open(1, file='load.xls')
  open(2, file='loadqf.xls')
  open(3, file='loadaf.xls')
  open(4, file='loadqr.xls')
  open(6, file='loadar.xls')
  open(7, file='loadqa.xls')
  open(5, file='load.txt')
c.....read
  read(5, *) vf, vr
  read(5, *) w, h, d, hm, dm1, dm2
  read(5, *) tdf, tdr, tb, rk, tgril, tgask, dtf, dtr
  dm=(dm1+dm2)/2.
c.....write
  write(1,400) vf*1000, vr*1000
  write(1,500) w*1000, h*1000, d*1000
  write(1,600) w*1000, hm*1000, dm*1000
  write(1,700) tb*1000
  write(1,800) tdf*1000, tdr*1000
  write(1,300)
  write(1,200)
  write(1,300)
c.....
  do 10 i=1, 2000
  t1=0.000001
  t2=w/2.
  tf=0.001*I
  do 20 j=1,10000
  if(abs(t1-t2).lt.0.00001) then
  go to 30
  endif
  tm=(t1+t2)/2.
  x1=trc(tf, t1)
  x2=trc(tf, tm)
  if(x1*x2.lt.0) then
  t2=tm
  else
  t1=tm
  end if
20  continue
30  tr=t1
  h1=tf+hf+tb+hr+tr
  if(abs(h1-h).gt.0.01) then
  go to 40
  endif
  write(*,*) i, j
  call heat(tf, tr, qf, qr, qt, af, ar, at)
  write(1,100) tf*1000, tr*1000, wf, hf, df, wr, hr, dr, h1
c  write(1,900) (h-hr-tr/2.-tb/2.)*1000
  write(2,100) tf*1000, tr*1000, qtf, qdf, qbf, qsf, qbaf, qf
c  write(2,900) tf*1000
  write(3,100) tf*1000, tr*1000, atf, adf, abf, asf, abaf, af
c  write(3,900) tr*1000
  write(4,100) tf*1000, tr*1000, qdr, qbr, qsr, qmr, qlr, qr
c  write(4,900) qf
  write(6,100) tf*1000, tr*1000, adr, abr, asr, amr, alr, ar
c  write(6,900) qr
  write(7,100) tf*1000, tr*1000, qf, qr, qt, af, ar, at
10  continue
40  write(6,300)
100  format(2(f6.2, 1x), 7(f6.3, 1x))
200  format(3x, 'tf', 4x, 'tr', 5x, 'wf', 4x, 'hf', 6x, 'df', 5x,
*      'wr', 4x, 'hr', 4x, 'dr', 5x, 'h1', 4x, 'gf', 4x, 'qr',
*      5x, 'qt')
300  format(72('-'))
400  format('internal volume : FZ=', f6.1, 3x, 'FF=', f6.1)
500  format('outer dimension : WxHxD=', 2(f6.1, ' x'), f6.1)
600  format('machine room : WxHxD=', 2(f6.1, ' x'), f6.1)
700  format('barrier thickness :', 3x, f6.1)
800  format('door thickness : FZ=', f6.1, 3x, 'FF=', f6.1)
900  format(f8.3)
  stop
  end
c.....
  function trc(tf, tr)
  common/fil/vf, vr, w, h, d, hm, dm1, dm2, dm, dtf, dtr
  common/thic/tdf, tdr, tb, tgril, tgask
  common/alp/ df, dr, wf, wr, hf, hr, rk
  df=d-tf-tdf-tgril
  dr=d-tr-tdr
  wf=w-2*tf
  wr=w-2*tr
  hf=wf/wf/df
  wrdr=wr*dr
  hr=(vr+dm*hm*wr+0.004)/wrdr
  trc=wf*df*(h-tf-tb-tr-hr)-vf
  return
  end
c.....
  subroutine heat(tf, tr, qf, qr, qt, af, ar, at)
  common/fil/vf, vr, w, h, d, hm, dm1, dm2, dm, dtf, dtr
  common/thic/tdf, tdr, tb, tgril, tgask
  common/alp/ df, dr, wf, wr, hf, hr, rk
  common/qfc/ qtf, qdf, qbf, qsf, qbaf
  common/afc/ atf, adf, abf, asf, abaf
  common/qrc/ qdr, qbr, qsr, qmr, qlr
  common/arc/ adr, abr, asr, amr, alr
c.....freezer
c.....top
  ai=wf*(df+tgril-tgask)
  ao=(d-tgask)*w
  atf=al(ai, ao)
  qtf=dtf*rk*atf/tf
c.....front
  ai=hf*wf
  ao=(hf+tf+tb/2)*w
  adf=al(ai, ao)
  qdf=dtf*rk*adf/tdf
c.....rear
  abf=adf
  qbf=dtf*rk*abf/tf
c.....side
  ai=hf*(df-tgask)

```

```

    ao=(hf+tf+tb/2)*(d-tgask)
    asf=al(ai, ao)
    qsf=dtf*rk*asf/tf
c.....barrier
    ai=wf*(df+tgri1-tgask)
    ao=wr*(dr-tgask)
    abaf=al(ai, ao)
    qbaf=(dtf-dtr)*rk*abaf/tb
c.....sum
    qf=qtf+qdf+qbf+2.*qsf+qbaf
    af=atf+adf+abf+2.*asf+abaf
c-----
c    fresh food
c-----
c.....front
    ai=hr*wr
    ao=(hr+tb/2.+tr)*w
    adr=al(ai, ao)
    qdr=dtr*rk*adr/tdr
c.....rear
    ai=(hr-hm)*wr
    ao=(hr-hm+tr+tb/2.)*w
    abr=al(ai, ao)
    qbr=dtr*rk*abr/tr
c.....side
    ai=(dr-tgask)*hr-hm*dm

```

```

    ao=(d-tgask)*(hr+tb/2.+tr)-hm*dm
    asr=al(ai, ao)
    qsr=dtr*rk*asr/tr
c.....machine room
    ai=(sqrt(hm**2+(dm2-dm1)**2)+dm1)*wr
    ao=(sqrt(hm**2+(dm2-dm1)**2)+dm1)*w
    amr=al(ai, ao)
    qmr=dtr*rk*amr/tr
c.....bottom
    ai=(d-tgask-tdr-tr-dm2)*wr
    ao=(d-tgask-dm2)*w
    alr=al(ai, ao)
    qlr=dtr*rk*alr/tr
c.....sum
    qr=qdr+qbr+2.*qsr+qmr+qlr-qbaf
    ar=adr+abr+2.*asr+amr+alr-abaf
    qt=qr+qf
    at=ar+af
    return
end
c.....logarithmic area
function al(ai, ao)
    al =(ao-ai)/alog(ao/ai)
    return
end

```