

## 냉장고 역열손실 방법의 수치해석적 분석에 관한 연구

하지수<sup>†</sup> · 심재성

계명대학교 에너지환경과학과

(2011년 8월 16일 접수, 2011년 12월 5일 수정, 2011년 12월 5일 채택)

### A Numerical Analysis of the Reverse Heat Loss Method for a Refrigerator

Ji Soo Ha<sup>†</sup> and Jae Sung Shim

Department of Energy&Environmental Science, Keimyung University

Ref. R&D Lab, LG Electronics Inc.

(Received 16 August 2011, Revised 5 December 2011, Accepted 5 December 2011)

#### 요 약

본 연구는 냉장고의 열전달 특성을 예측하기 위하여 냉장고를 가동하지 않은 상태에서 역열손실 방법에 대한 수치해석과 실험을 수행하였다. 측정된 온도와 투입한 열량의 관계로부터 투입한 열량은 거의 선형적으로 냉장고 내외부 온도차와 비례함을 알 수 있었다. 냉장고 문과 본체사이의 가스켓 영역에서 열손실에 관한 열전도율은 실험과 수치해석의 비교를 통해 도출하였다. 수치해석을 통해 구한 열손실은 실험을 통한 열손실과 비교할 때 오차 범위 1.8% 이하의 정확도로 예측되었다. 이러한 정확도의 수치해석 방법으로 냉장고 진공단열재의 열전도도 변화에 대한 열손실 저감 효과를 살펴보았다.

**주요어** : 냉장고, 역열손실, 열전도율, 진공단열재

**Abstract**— The present study has been carried out to predict the heat transfer characteristics of reverse heat loss method for a residential refrigerator by using numerical analysis and corresponding experiment. From the measured values of temperature and heat input, one can conclude that, the temperature inside the refrigerator has a nearly linear relationship with heat input. The effect of gasket heat loss was examined with the change of thermal conductivity of gasket region. The appropriate thermal conductivity of gasket region was acquired from the comparison of heat losses with the experimental result and numerical analysis. The result of calculated heat losses had accuracy within 1.8% error with the experimental result. With the selected thermal conductivity of gasket region, the effectiveness of reverse heat loss method was examined with the change of thermal conductivity of vacuum insulation panel.

**Key words** : Refrigerator, Reverse heat loss, Thermal conductivity, Vacuum insulation panel

#### 1. 서 론

전 세계 가정용 냉장고 생산량은 2009년의 경우 8,000만 대이었고 매년 증가 추세에 있다. 냉장고는

고장이 나지 않는 한 하루 24시간, 일 년 365일 계속 가동되고 있다. 가정 내에서 이렇게 지속적으로 가동되고 있는 기기는 없다. 이것으로 판단할 때 냉장고의 소비전력, 즉 열손실을 줄이는 것이 전 세계 에너지 소비를 줄이는 가장 직접적인 역할을 할 것으로 판단한다. 냉장고의 열손실은 바로 소비전력으로 나타나므로 냉장고의 열손실을 줄이는 연구와 냉장고 내부

<sup>†</sup>To whom corresponding should be addressed.  
Department of Energy&Environmental Science, Keimyung University 1095 Dalgubeoldaero, Dalseo-Gu, Daegu, Korea 704-701  
Tel : 053-580-5919; E-mail : jisooaha@kmu.ac.kr

의 열전달에 관하여 많은 연구가 수행되어 왔다 [1-6].

냉장고의 열손실을 줄이기 위해 냉장고 단열재의 전도열전달율을 개선하거나 진공단열재를 사용하기도 한다. 이렇게 냉장고 단열재를 변경 개선할 경우 냉장고의 열손실 저감 효과가 어떻게 되는지를 일반적인 냉장고 성능 평가 방법인 항온항습실 내에서 평가를 하게 되면 변경개선한 단열재의 효과만 나타나는 것이 아니라 압축기, 증발기, 가스켓 열손실 등 냉장고 전체의 성능이 함께 나타나게 되므로 단열재 변경에 따른 효과만을 분석하고자 할 때 어려움이 있다. 냉장고의 단열 성능만을 파악하고자 할 때는 냉장고 역열손실 방법을 이용하여 평가하는 것이 가장 효과적이다. 이러한 역열손실을 이용해서 냉장고에서 진공 단열재 단열 성능 평가에 관한 연구들이 이루어지고 있다 [7,8].

본 연구에서는 냉장고의 역열손실 방법으로 냉장고의 단열성능을 평가할 때 단열재의 전도열전달율의 변화에 따른 단열 성능 개선 정도를 이러한 방법으로 할 경우 평가 가능한가를 실험과 수치해석적 방법으로 진단하고, 또한 수치해석적 방법을 사용할 경우 수치해석에 필히 고려해야 할 것에 대한 분석을 통해 냉장고 단열성능 평가 방법인 역열손실 방법의 타당성과 역열손실의 수치해석적 방법의 정립을 제시하는 것을 목적으로 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용한 실험 장치는 항온항습챔버, 진공단열재 내장 냉장고 시료, 냉장고 내부 가열시스템, 온도 및 가열전력량 측정 시스템으로 구성되어 있으며 Fig. 1에 개략도를 나타내었다.

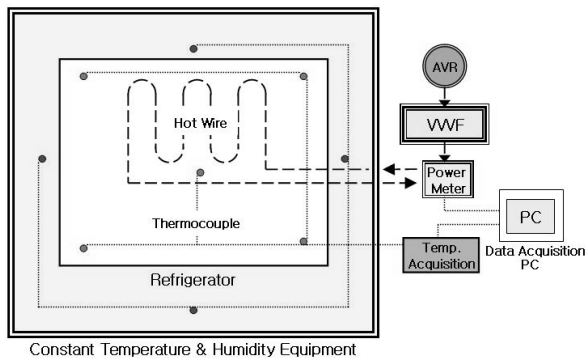


Fig. 1. Schematic diagram of heater, thermocouples and data acquisition system.

실험에 사용한 냉장고 시료는 상부가 냉장실이고 하부가 냉동실로 구성되어 있다. 냉장고의 용량은 760 liter이다. 역열손실 방법으로 냉장고의 단열성능을 시험하기 위해 냉장고의 압축기를 비롯한 증발기 등의 주요 장치들을 가동하지 않고 냉장실과 냉동실 내에 Fig. 2와 같이 가열시스템을 설치하였다.

또한, 내부의 온도 균일화를 위해 순환팬을 냉장실과 냉동실 각각 2개씩 설치하였다.

냉장고의 성능시험을 위해 일반적으로 외부온도를 32℃, 냉동실을 -16℃, 냉장실을 6℃로 유지하면서 시험한다. 본 연구에서의 역열손실 방법으로 단열성능을 시험하기 위해서 각 부분의 온도차를 일치시키기 위해 냉장고 외부의 온도를 -16℃, 냉장실을 32℃, 냉동실을 10℃로 유지하면서 시험하였다. 이러한 온도 조건을 유지하면서 냉장실과 냉동실 내에 설치한 가열시스템으로 가열한 경우 온도가 정상상태로 도달하기까지 걸리는 시간을 측정한 결과 약 20시간 이후에 냉장고 내부의 온도가 거의 변하지 않는 정상상태에 도달하였다. 따라서 본 연구에서도 항온항습챔버 내에서 역열손실 방법으로 시험할 때 20시간 이후에서 1시간 동안 측정한 온도와 가열에 사용한 소비전력을 측정하여 평균값을 측정값으로 하였다.

본 연구에서 수치해석을 통한 열전달율 계산을 위해 Fig. 2에서 볼 수 있는 것과 같이 냉장실과 냉동실

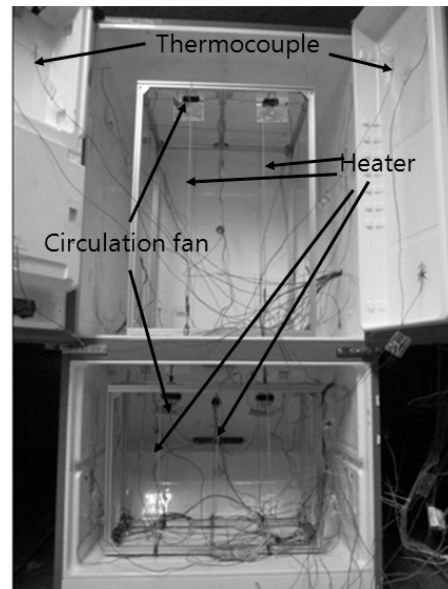


Fig. 2. Photograph of electric heating system and thermocouples installed inside the refrigerator side and freezer side.

내부 벽면과 이에 해당하는 외부 벽면에 열전대를 부착하여 온도를 측정하였으며 이렇게 측정한 온도 값을 수치해석시의 온도 경계조건으로 이용하였다. 온도 측정 데이터 개수는 냉장실의 경우 좌우 벽면, 뒷 벽면, 앞문에 각각 4개씩의 온도 측정을 하였고 상부와 바닥 면에는 2개씩의 온도를 측정 하였다. 냉동실의 경우는 냉장실 보다 작아서 좌우 벽면, 뒷 벽면, 앞문에 각각 3개씩의 온도를, 상부, 바닥 면은 2개씩의 온도를 측정하였다. 냉장고 외부에는 같은 위치에 같은 개수로 온도를 측정하였다. 수치해석에 사용할 경계조건을 위해 측정한 온도 측정점의 개수는 총 44 개를 사용하였다.

### 3. 수치해석방법

#### 3-1. 냉장고 형상 모델링

본 연구에 사용한 냉장고 시료는 진공단열재를 사용한 냉장고이다. Fig. 3에 본 연구에 사용한 냉장고의 형상을 나타내었다. 상부는 냉장실이고 하부는 냉동실이다. 그리고 각 벽면에 단열성능 향상을 위해 진공단열재를 사용하였다. 냉장고 내부와 문 사이에 냉기 차단을 위한 가스켓 영역이 존재한다. 냉장고의 벽면 성분은 PU Foam이 대부분을 차지하고 있으며 냉장고 외부와 내부에 PU Foam을 고정하는 ABS 재질이 얇은 두께로 감싸고 있다. ABS의 열전도율이 0.19 W/mK이고 두께가 5 mm이며 PU Foam의 열전도율이 0.026 W/mK이고 두께가 평균 50 mm이므로 열저항 측면에서 ABS의 역할이 작기 때문에 본 연구에서는 PU Foam과 진공단열재만을 수치계산에 포함하여 계

산을 수행하였다. 진공단열재의 열전도율은 0.0032 W/mK이다.

#### 3-2. 지배방정식 및 전산해석 모델링

냉장고의 역열손실 방법에 관한 열전달 수치해석을 위해 Fig. 3에서 살펴보았듯이 냉장고 형상에 대한 모델링을 하였으며 이러한 형상에 대한 열전달 해석을 하는 방법은 냉장고 외부와 내부 공간에서 온도를 측정하고 벽면부분에서의 대류열전달 계수를 가정하여 열전달량을 계산할 수도 있다. 그러나 이러한 방법은 대류열전달계수를 선정할 때 오차를 수반하기 때문에 본 연구에서는 냉장고 내 외부의 벽면온도를 측정하여 이렇게 측정한 온도를 경계조건으로 이용하여 전도열전달 해석을 수행하여 실제 열전달량과 오차를 줄여서 보다 정확한 열전달량을 예측 가능하도록 하였다.

위와 같은 열전달 해석에 적용한 지배방정식은 정상상태 3차원 열전도 방정식을 이용하였다.

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

식 (1)에서 x, y, z는 Fig. 3에 나타난 바와 같은 좌표축을 나타내고 k는 열전도율, T는 온도를 나타낸다.

본 연구에서 열전달 해석에 사용한 전산해석 소프트웨어는 열유체 전산해석에 널리 사용되고 있는 상용코드인 Fluent 소프트웨어를 사용하였다. 격자의 개수는 약 82만개를 사용하였다.

## 4. 결과 및 고찰

#### 4.1. 열선 가열열량에 따른 냉장고 내부 온도 변화 특성

역열손실 방법으로 냉장고를 시험하기 위한 온도 조건이 냉장고 외부 -16℃, 냉동실 32℃, 냉장실 10℃로 정하였다. 냉장고 외부온도는 변화시키지 않고 냉장고의 냉장실과 냉동실의 가열 열량을 변화하면서 냉장고 내부의 온도가 어떻게 변하는지를 Fig. 4에 나타내었다. 본 연구의 실험에서는 같은 모델 냉장고 2대에 대하여 재현성 실험을 병행하였으며 그림에서 보는 바와 같이 두 시료의 실험 재현성은 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다. 또한 냉장실과 냉동실의 내부 온도는 가열열량에 따라 거의 선형적으로 변함을 알 수 있다. 이는 전도 열전달율은 내외부 온도차에 선형

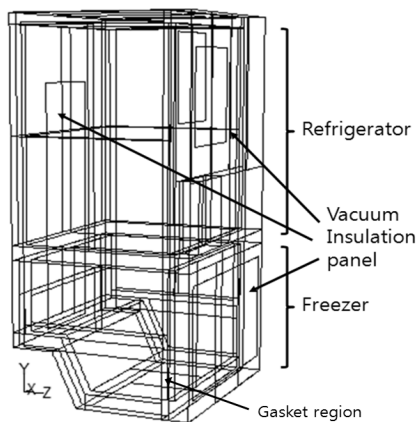


Fig. 3. Computational modeling of the present refrigerator with vacuum insulation panels.

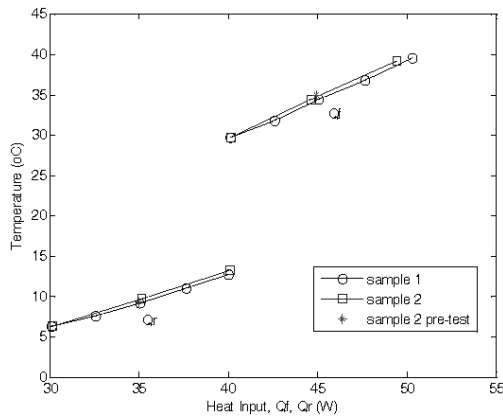


Fig. 4. The variations of temperature with the change of electric heat input.

적으로 비례한다는 전도열전달의 기본 이론인 Fourier 전도 열전달을 공식에서 예측 가능한데 본 연구 결과에서도 이미 예측된 결과를 도출하였다. 이러한 가열 열량에 대한 실험결과는 다음절에서 수치해석을 통한 해석 결과의 비교 자료로 활용하였다. Fig. 4에서 나타난 첫 번째 시료의 실험에서 낮은 가열열량에서부터 높은 가열열량을 가면서의 실험 경우를 각각 Case1, Case2, Case 3, Case4, Case 5로 하여 비교하였다. Case3의 경우가 역열손실 방법에서 설명한 정격 냉장고 시험조건과 유사한 경우이다.

#### 4.2. 가스켓 열손실 고려 여부에 따른 열손실 해석 결과 분석

냉장고가 가동될 때 열손실은 냉장고 벽면을 통하여 나가는 열손실과 냉장고 개폐에 따른 열손실, 냉장고 문과 냉장고 본체 사이의 밀폐를 위한 가스켓에서의 열손실 등 여러 가지가 있다. 지금까지의 많은 연구를 통해 냉장고 가스켓으로 빠져 나가는 열손실이 냉장고 단열 열손실의 10~30%를 차지한다고 알려져 있다. 본 연구에서 역열손실에 관한 수치해석을 수행 할 때 어느 정도의 열손실을 고려해야 하는지를 실험결과와 비교하면서 분석하였다.

우선 가스켓에서의 열손실을 고려한 두 경우의 냉장고 벽면의 온도 분포 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 해석 조건은 Case 3의 경우인데 이 경우가 정격운전 조건과 거의 유사한 경우이다. Fig. 5에서 (a)는 가스켓의 열전도율을 PU Foam과 같이 0.026 W/mK로 한 경우이고 (b)는 0.35 W/mK로 한 경우이다. Fig. 5에서 살펴보면 두 가지 경우 모두 주어진 온도 조건

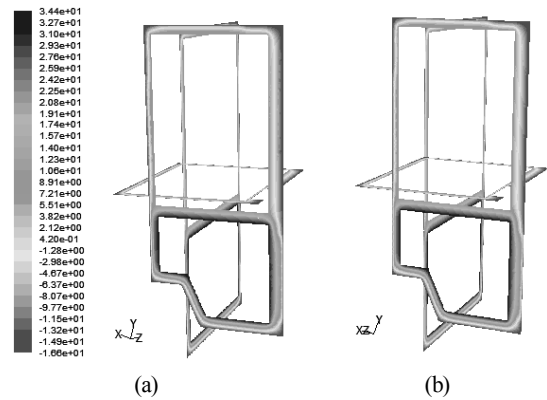


Fig. 5. Temperature contour result at several sections for Case 3 without the effect of gasket heat loss.

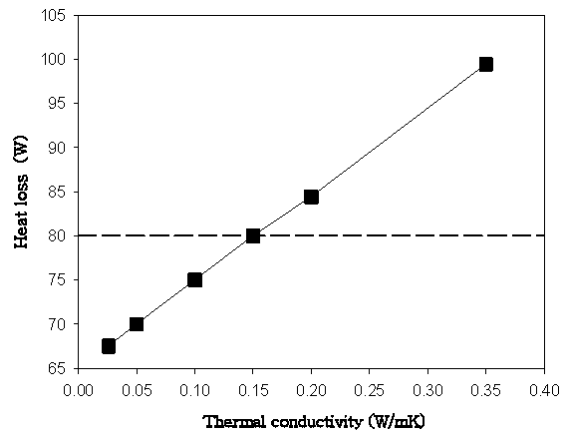


Fig. 6. The heat loss result with the variation of gasket thermal conductivity.

과 같이 냉동실에서 온도가 가장 높게 나타나고 있으며 외부 벽면으로 갈수록 온도가 낮아짐을 알 수 있다. 그러나 Fig. 5에서의 온도 분포에서는 어느 경우가 실험 결과와 잘 일치하는지 구분을 할 수 없다. 온도 분포에서는 냉장고 전체의 온도 분포 경향을 파악하는 것으로 활용하기로 한다.

가스켓은 문과 냉장고 본체사이에 30 mm 두께로 영역을 설정하였으며 가스켓 효과를 고려하지 않은 경우에는 열전도율을 PU Foam 과 같은 0.026 W/mK로 하였고 가스켓의 열전도율을 변화시켜서 실험에서 나온 가열 전력량과 같은 열손실량이 되는 가스켓 열전도율을 도출하여 가스켓에서의 열손실 효과를 모사하는 것으로 하였다. 가스켓의 열전도율 변화는 0.026에서 0.35 W/mK까지 변화시켰으며 열손실량은 냉장고 외부 벽면에서의 열전달량들의 합으로 계산하였다. 그 결과는 Fig. 6에서 관찰할 수 있다.

**Table 1.** Comparison of heat losses between experimental result and numerical calculation result.

Case No.	Heat loss (W)		
	Exp.	Cal.	error (%)
1	70.10	71.42	1.8
2	75.09	75.34	0.3
3	80.01	80.00	0.1
4	85.19	84.65	0.7
5	90.20	89.29	1.1

가스켓 효과를 고려하지 않고 가스켓의 열전도율을 PU Foam과 같은 0.026 W/mK를 사용한 경우에는 냉장고를 통해 나가는 열손실이 67.51 W로 나타났으며 실험 결과는 80.01 W로 15.6% 적게 계산되었다. 가스켓의 열전도율을 변화시켜 실험결과와 거의 일치하는 열전도율은 0.15 W/mK로 나타났다.

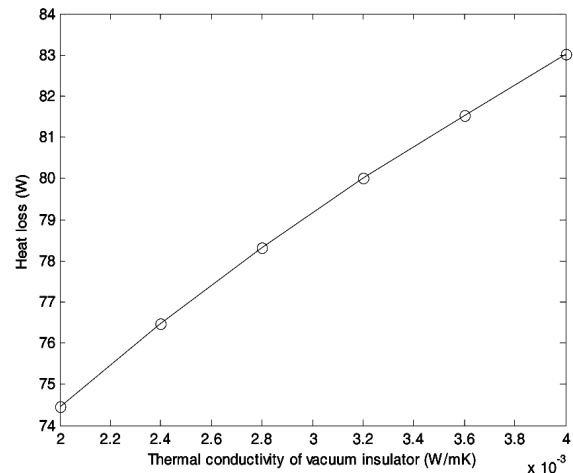
이 결과로부터 선정된 가스켓의 열전도율을 이용하여 4.1 절에서 나타낸 5 가지의 Case에 대하여 열손실을 해석한 결과와 실험 결과를 Table 1에 비교하였다.

Table 1에서 알 수 있듯이 Case3의 조건으로 선정된 가스켓에 대한 열전도율은 다른 조건의 경우에도 최대 1.8% 범위 내에서 실험과 계산이 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 특히 정격운전 조건 부근에서는 1% 내에서 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이것으로부터 역열손실 방법에 대한 열전달 수치해석시에는 가스켓의 열손실을 실험과 일치 되도록 고려해 주어야 하는 것을 알 수 있다.

#### 4.3. 진공단열재 열전도율 변화에 따른 열손실 변화 특성

4-2절에서 고찰한대로 가스켓 부분의 열전도율을 실제 실험을 통한 열손실량에 적합하도록 보정한 값인 0.15 W/mK를 사용하여 진공단열재의 열전도율을 변화하였을 때 역열손실 방법으로 단열 성능을 측정하였을 때의 열손실 특성을 살펴보기로 한다.

진공단열재 기준 열전도율은 0.0032 W/mK이다. 이것을 기준으로 0.002 W/mK(-37.5%)에서부터 0.004 W/mK(25%)까지 열전도율을 변화하였을 때의 열손실량의 변화 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 이렇게 열전도율을 변화시키면 열손실은 거의 선형적으로 변하는데 그 변화 범위는 74.45 W에서 83.01 W로 변한다. 이러한 결과는 현재 진공 단열재에서의 열손실량인 80.01 W



**Fig. 7.** The characteristics of heat loss with the variation of the thermal conductivity of vacuum insulator.

를 기준으로 하였을 때 -6.95%에서 3.75%의 범위임을 알 수 있다. 따라서 진공단열재의 단열성능을 향상 시키거나 진공단열재를 적용한 냉장고 벽면 면적을 넓히면 냉장고의 열손실을 효과적으로 줄일 수 있음을 확인할 수 있다. 또한 이번 연구를 통해 진공단열재 열전도율 변화에 따른 열손실 저감 특성을 역열손실 방법을 통하여 규명할 수 있고 최적의 진공단열재 선정에 기여할 수 있음을 알 수 있었다.

### 5. 결론

지금까지의 실험과 수치해석을 통하여 역열손실 방법에 대한 수치해석을 통한 예측 방법을 검토하였고 냉장고의 진공 단열재에 대한 단열성능 시험이 역열손실 방법으로 분석 가능함을 알아보았으며 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

- 1) 역열손실 방법으로 두 대의 같은 모델 진공단열재를 사용한 냉장고의 단열성능을 시험한 결과, 실험의 재현성을 확인 하였으며 냉장고 내부의 가열량에 따라 냉장고 내부 온도는 냉장실과 냉동실 모두 거의 선형적으로 변화하였다.
- 2) 가스켓의 물성치를 단열재인 PU Foam과 같다고 한 경우에 대한 열손실 수치해석 결과는 실험 결과와 15.6% 작게 나타났다. 따라서 가스켓을 통한 열손실을 그 부분의 열전도율을 변화하여 0.15W/mK로 할 경우 정격운전 조건에서는 실험결과와 0.1% 오차이었고 정격운전 조건

부근에서는 1% 내의 정밀도를 가지는 결과를 가져왔다.

- 3) 가스켓의 열손실을 고려하여 가스켓 부분의 열전도율을 0.15W/mK로 하고 진공단열재의 열전도율 변화를 살펴 본 결과 진공단열재 열전도율에 따라 열손실이 거의 선형적으로 변함을 알 수 있었고 또한 진공단열재의 단열성능을 평가할 때 역열손실 방법을 사용할 경우 단열성능을 측정 평가하는데 효과적임을 알 수 있었다.

### 참고문헌

1. Park, J. K.: "Optimization of heat insulation system for a household refrigerator", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 15, No. 2, 95-102(2003).
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, 88-94(1993).
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, 769-774(2003).
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, 393-398(2003).
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 Refrigeration Engineering, Vol. 21, No. 5, 305-310(2009).
6. Yun, J. W.: "A numerical study on the flow and heat transfer characteristics in a kimchi refrigerator", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 15, No. 12, 1078-1087(2003).
7. E. Vineyard, T. K. Stovall, K. E. Wilkes and K. W. Childs: "Superinsulation in refrigerator and freezers, for the recent developments in refrigerator and freezers", ASHRAE Seminar, 1-22(1998).
8. Wei-Han Tao, Chao\_Ming Huang, Chuan-Liang Hsu and Jian-Yuan Lin: "Performance study of an energy-efficient display case refrigerator", Chemical Engineering Communication, Vol. 191, 550-565(2004).