

< 기술논문 >

가정용 냉장고의 에너지 노즈부 열전달 특성에 관한 연구

이무연* · 이동연* · 김용찬†
(2007년 3월 23일 접수, 2007년 5월 10일 심사완료)

A Study on the Heat Transfer Performance of an Energy-Nose Section in a Household Refrigerator-Freezer

Lee Moo-Yeon, Lee Dong-Yeon and Kim Yong-Chan

Key Words : Household Refrigerator-Freezer (냉장고), Mullion (물리온), Energy Nose(에너지 노즈), Gasket (가스켓), Refrigerator Compartment(냉장실), Freezer Compartment(냉동실)

Abstract

The objective of this article is to present an analysis of all heat transfer paths through the energy nose under closed door conditions when refrigeration system of household refrigerator-freezer is operating on. Both experimental and numerical methods are suggested as a means of determining the overall energy nose load amount as well as the load due to each pathway such as mullion section and F and R sides of the household refrigerator-freezer. In other words, all loads determined in this article are just energy nose and not the loads seen by the refrigeration system. We suggest good ideas for improving the heat transfer losses such as conduction and convection through the energy nose. As we can be known from the experimental test results, it is effective to prevent the heat loss of a mullion section. And energy efficiency is also decreased approximately 6% compared to that of a baseline sample test result. As we can be known from the Ansys 8.1 analysis, it is shown the steady state temperature distribution in figures from 6 to 8. And the direction of the heat flow through the energy nose section is also easily seen from that. In conclusion, the article is focused on an energy nose section in household refrigerator-freezer for practical purposes which is the energy saving in a household refrigerator-freezer. And the method suggested may be applied to any make or model to aid in the search for high efficient energy nose section of household side by side refrigerator-freezer as well as top mounted refrigerator-freezer, commercial refrigerator and so on.

기호설명

E/N : 에너지 노즈
q : 열전달(W)
F : 냉동실
R : 냉장실
Duct : 냉기흐름 배관
Fan : 증발기 팬

d : 냉장고 도어
gasket : 냉장고 가스켓
mul : 물리온
on : 압축기 작동
off : 압축기 정지
sec : 부분

하첨자

K : 열전도율(w/m-K)
w : 냉장고 벽면

1. 서론

가정용 냉장고는 크게 캐비닛이라고 불리는 냉장고 몸체, 도어 그리고 냉동사이클로 구성된다. 냉장고에서 캐비닛과 도어는 외부의 열이 냉장고 내부로 침입하는 것을 차단하기 위한 고성능 단열재로 구성되어 있고, 내부의 열을 외부로 효과적으로 방출하기 위한 냉동사이클로 구성되어 있다.

† 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과
E-mail : yongckim@korea.ac.kr
TEL : (02) 3290-3366 FAX : (02) 921-5946

* 회원, 한국전기연구원 산업전기연구단

냉장고를 구성하고 있는 냉동사이클은 크게 압축기, 응축기, 팽창 장치, Hot-line 그리고 증발기 및 Fan 과 Duct로 이루어진 유로로 구성되어 있다. 캐비닛과 도어는 가스켓 (Gasket)을 통하여 접촉하고 있으며 고내의 냉기 누설 및 외부의 열 침입을 막는 역할을 한다. 일반적으로 냉장고 에너지 효율은 단일 부하 (Thermal load)와 냉동 사이클 효율에 의해 좌우 되며, 에너지 효율은 단일부하에 비해 냉동사이클의 효율에 반비례한다. 즉 냉장고에서 에너지 효율을 향상시키기 위해서는 단일 성능을 향상시키고, 냉동사이클 효율을 극대화시키는 것이 중요하다.⁽¹⁻³⁾ 냉장고의 단일 부하의 대부분을 차지하는 냉장실과 냉동실의 부하에 대해서는 Park et al.⁽¹⁾에 의해 연구가 행해졌으며 진공 단열재와 같은 우수한 단열재의 개발로 상당부분 성능이 개선되었다. 그러나 물리온 (Mullion) 과 캐비닛 양 사이드의 가스켓과 접하는 부분으로 구성된 에너지 노즈부 (Energy nose) 단일 부하에 대한 연구는 미비한 실정이다. 본 연구에서는 에너지 노즈부의 열전달 메커니즘을 분석하고 Ansys 8.1 을 이용한 전산 해석을 통해 열의 흐름 및 분포를 파악하고자 하며, 에너지 노즈부를 구성하는 부분의 열손실 비율을 고려하여, 이를 최소화하기 위한 아이디어를 도출하고, 이것을 실제 냉장고에 적용하여 개선 효과를 파악하고, 궁극적으로 냉장고의 에너지 효율을 향상시키는데 목적이 있다.

2. E/N 이론적 해석 및 분석

2.1 에너지 노즈부 분석 I: 이론적 해석

냉장고의 부하는 크게 두 가지로 이다. 냉장고 몸체인 캐비닛 부하와 냉동시스템의 부하로 나누어 생각할 수 있다. 특히, 캐비닛 단일 부하는 다음의 3가지로 구성된다. 첫째, 캐비닛의 벽면과 도어를 통한 열전달이다. 이것은 1차원 열전달 모델로 해석할 수 있으며, Park⁽¹⁾의 의해 열전달 모델이 제시되었다. 캐비닛의 단일 부하는 근래에 들어진공 단열재와 같은 우수한 단열재를 이용하거나 단열 두께를 변경하면, 비교적 쉽게 단일 성능을 개선할 수 있다.^(4,5) 둘째, 캐비닛 몸체와 도어 사이의 에너지 노즈부의 Edge effects를 통한 열전달 부하 (Edge load)이다. 특히, Boughton⁽⁶⁾의 연구 결과에 의하면, 에너지 노즈부의 단일부하는 냉장고 전체 단일 부하를 100%로 보았을 때, 30 ~ 38% 정도 차지하는 부하로 냉장고 단일 성능 향상 시 무시하지 못할 부하이다. 셋째, 냉장실 모터, 제상

센서와 같은 기타 부하로 구분할 수 있다. 이러한 부하는 정량적인 측정이 가능한 부하로 본 연구에서는 고려하지 않도록 하겠다. 본 연구에서는 냉장고 캐비닛 부하 중 그 중요도 및 비중에 비해 연구가 미비했던 에너지 노즈부의 열전달 메커니즘에 대한 이론 분석과 Ansys 8.1해석 그리고 실험을 통한 검증 과 냉장고에서 에너지 효율 향상 등에 고찰하고자 한다.

에너지 노즈부는 Fig. 1과 같고, 에너지 노즈부에서 열전달 메커니즘은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 첫째, 캐비닛과 도어가 접해있는 Steel flange 부분의 열 침입 둘째, 가스켓 부분에서의 열전도 셋째, 물리온부를 타고 들어오는 열전도 넷째, Hot-line에 의한 사이클 On/Off 시 고내로 들어가는 열 침입(전도) 등으로 구분되며, Fig. 2에 열 흐름에 대한 모형을 제시하였다. 에너지 노즈부에서의 열전달량은 Table 1에 각 값들의 총괄 열전달계수를 구하고 식 (2)를 이용하여 계산한다.

$$q_{E/N} = q_w + q_d + q_{gasket} + q_{mul,on} + q_{mul,off} \quad (1)$$

$$q = UA\Delta T \quad (2)$$

2.2 에너지 노즈부 분석 II: 열전달 해석

Fig. 3 과 Fig. 4에서 보는 것 처럼, 에너지 노즈부의 단면 도면을 이용하여 Ansys 8.1를 이용하여 열전달 해석을 수행하였다. 해석 시 고려한 에너지 노즈부 경계 조건과 냉장고 온도 조건들은 Table 1과 Table 2에 나타내었다. Table 1에 Air (modified)의 열전도 값은 Air의 열전도 값과 물리온부 내부와 접해있는 Hot line부의 온도를 고려한 값이다. 먼저, 경계 조건들은 냉장고에 사용되는 있는 재료들의 열전도 값을 입력 조건으로 하고, 냉장고 온도 조건은 KS C9305에 의거한 표준 시험 조건인 항온·항습 챔버 온도 $30 \pm 1^\circ\text{C}$, 냉장고의 냉동실 (F) 과 냉장실 (R) 기준 온도인 $-18 \pm 0.5^\circ\text{C}$, $3 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 설정 하였다.⁽⁷⁾ 에너지 노즈부 전면에 접해있는 Hot line, 즉 이슬점 방지 배관의 온도는 실험을 통해 얻은 온도의 평균 값인, 38°C 설정 하였다. 이론 해석 결과는 Fig. 5 에서 Fig. 7에 나타내었으며, 물리온부 그리고 냉동실과 냉장실 측면부의 열전달량을 계산하였다.

2.3 에너지 노즈부 분석 III: 열전달 해석 결과

Table 3의 분석 결과에서 알 수 있듯이, 에너지 노즈부 중 물리온부가 차지하는 단일 부하는 전체의 34%를 차지하고, 냉동실과 냉장실 사이드 Steel flange 에서의 단일 부하는 64%를 차지한다. 특히, 냉동실 측면과 물리온부에 고온의 열들이

집중적으로 분포하여 이 부분에서 외부와의 열전달량이 많음을 확인할 수 있다. Side sec.(Modified) 값은 Air(modified) 값을 사용했을 때의 결과값이다. 에너지 노즈부에 발생하는 열 흐름 및 온도 분포는 Fig. 5 ~ Fig. 7에 나타내었다. Ansys 8.1 해석 결과로부터, 물리온부 그리고 냉동실과 냉장실 사이드를 통한 열의 흐름 (Heat paths & distributions)을 알 수 있었고, 냉동실 측면 및 물리온부에서 고온의 열이 비교적 넓은 범위에 분포함을 알 수 있었다. 이는 에너지 노즈부 중 물리온부 및 냉동실 측면부가 단열 부하에 있어 취약한 부분임을 의미한다. 이러한 이유로는, 냉동실이 냉장실에 비해 고내 설정 온도가 낮고, 물리온부는 Hot line, 즉 고온의 이슬 방지 배관 두 개가 삽입되어 물리온 주변부 온도가 높기 때문이다. 이러한 해석 결과는 에너지 노즈부를 구성하고 있는 물리온부의 취약 부분을 개선하는데 있어 유용한 자료로 사용되었다.

Table 1 Boundary conditions of an E/N section

Materials	K(w/m-K)
Steel	55
Magnet	10
Gasket	0.33
ABS	0.191
Insulation foam	0.025
Air	0.0245
Air (modified)	0.085

Table 2 Test temperature conditions

	Temperature[°C]
F/R inner case	-18/3
Hot line [mullion section]	38
Outside	30

Table 3 Theoretical analysis results of an E/N section

Heat transfer [W]	F	R	Total	Ratio (%)
Mullion sec.	8.00	4.90	12.80	34.0
Side sec.	5.45	3.60	9.00	-
Side sec.(Modified)	15.00	9.90	25.00	66.0

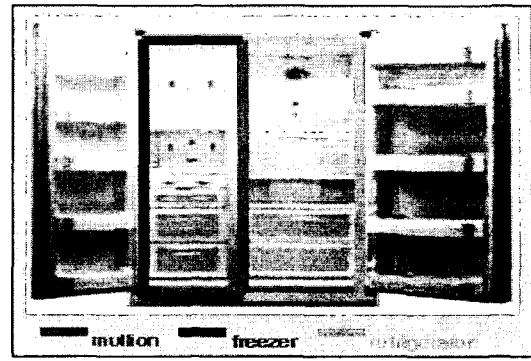


Fig. 1 Configuration and parts terminology of energy nose for a household refrigerator-freezer [side by side refrigerator]

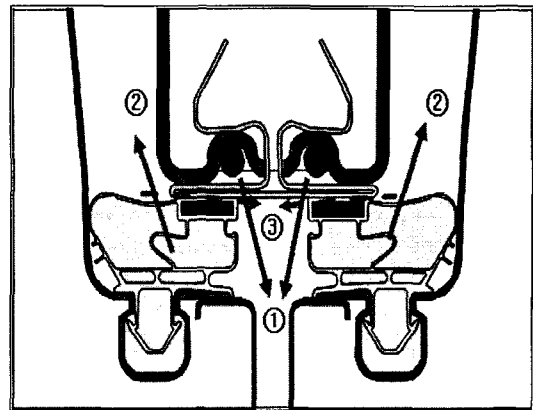


Fig. 2 The theoretical heat transfer model of energy nose [heat flow paths and cross sectional drawing of the door seal area of the test model examined to determine heat transfer rate of a door, gasket, mullion]

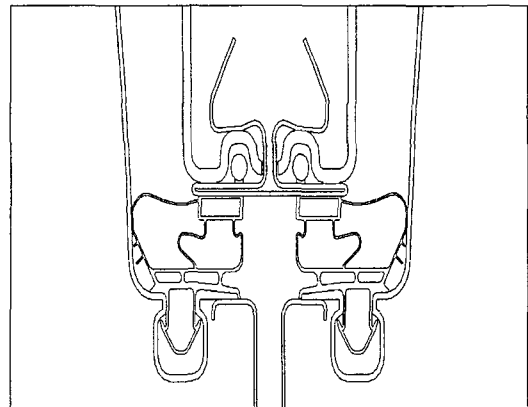


Fig. 3 Cross section of mullion section for Ansys 8.1 analysis

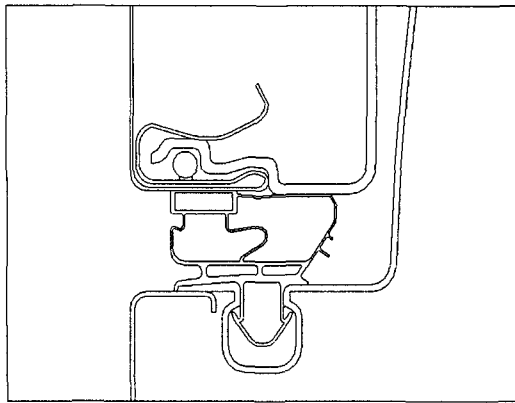


Fig. 4 Cross section of R/F sides sections for Ansys 8.1 analysis

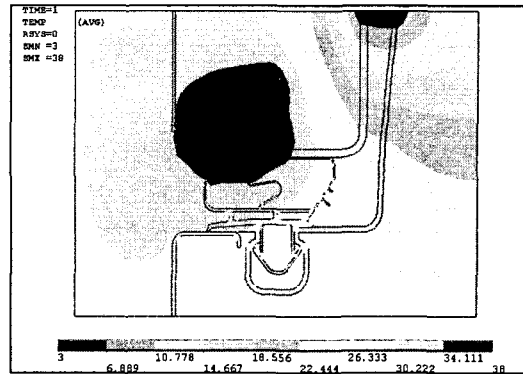


Fig. 7 Heat and temperature distribution in R side section including anti sweat tube [refrigerator compartment]

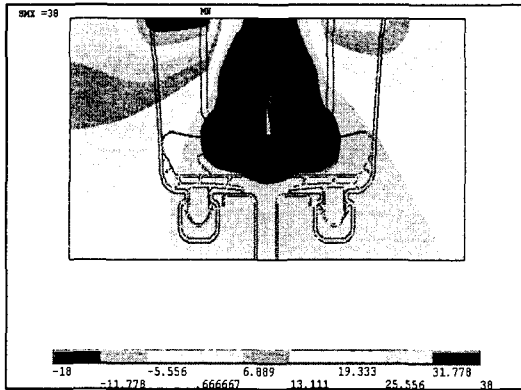


Fig. 5 Heat and temperature distribution in the mullion section including anti sweat tube

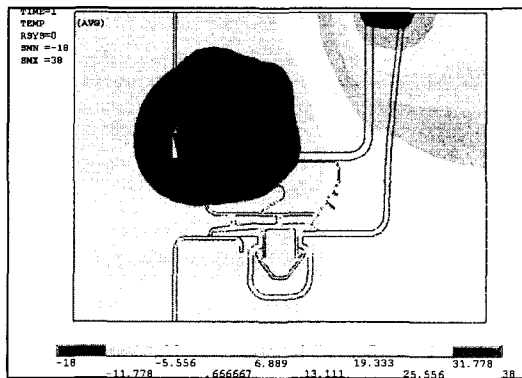


Fig. 6 Heat and temperature distribution in F side section including warm anti sweat tube [freezer compartment]

3. 실험

3.1 실험 장치 및 방법

Fig. 8은 본 연구에서 사용한 실험 장치의 개략도이다. 향온·향습 챔버는 내부의 온도와 습도를 조절할 수 있고, 시험 시료의 온도, 압력, 전압 및 소비 전력 등을 측정할 수 있도록 Data logger 및 전력계(Power meter)와 연결되어 있다. 향온·향습 챔버 및 측정 기기의 사양은 Table 4에 나타내었다. 에너지 노즈부 실험 방법은 실 사용 조건하에서 냉장고 표준 시험 조건인 KS C9305에 의거하여, 향온·향습 챔버의 내부 온도와 습도를 $30 \pm 1^\circ\text{C}$, $75 \pm 5\%$ 범위 내로 설정하고 냉장고의 냉동실과 냉장실 고내 1/3h 위치의 온도를 $-18 \pm 0.5^\circ\text{C}$, $3 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지하도록 하고, T-Type 열전대(Thermocouple)을 이용하여 냉장고 기계실 및 고내 온도를 측정하였다. 냉장고 소비 전력 측정 시 계측 장비의 신뢰성을 검증하기 위하여 6σ 통계 기법을 이용하여, Gage R&R을 실시하여 계측장비의 신뢰성을 확보하였다. Gage R&R은 One-sample T 방법을 이용하여 동일 시료에 대해 한 계측자가 5번 연속 실험하여 통계를 낸 후, 확률값을 계산하였다. 본 연구에서는 확률값이 0.621로 (확률값이 0.5 이상이면 계측 장비의 신뢰성에 문제 없다), 신뢰성 확보에 문제가 없음을 확인하였다. 결과는 Table 5에 나타내었다.

3.2 에너지 노즈부 실험

Table 3에서 보는 것처럼, 이론 해석 결과 에너지 노즈부의 단열 부하량은 냉장고에 있어 큰 비

중을 차지하는 부분이다. 에너지 노즈부의 물리온부 형상 개선 및 기밀(Seal)을 보완하기 위한 Gasket 개선 아이디어를 제시하여 실험을 통해 검증하였다.

3.2.1 에너지 노즈부 개선 아이디어 도출

Ansys 8.1 해석을 바탕으로 하여 도출된, 물리온부 개선 아이디어와 냉장고에 장착된 형상을 Fig. 9 과 Fig. 10 에 제시하였다. 물리온부는 이슬 방지 용도인 Hot line 과 접촉해 있고, 도어 가스켓과 접촉하는 부분으로 압축기 가동 시 Hot line를 타고 고내로 들어가는 전도에 의한 열전달이 많은 부분이다. 이론 해석 결과에서도 알 수 있듯이, 물리온부는 에너지 노즈부를 구성하는 전체 사이즈 중 25% 정도를 차지 하지만, 열전달량은 34%를 차지하는 부분으로 그 동안 비효율적으로 설계된 부분이다. 따라서 물리온부와 접촉해 있는 Hot line 에 의한 냉동실과 냉장실 고내로 전도되는 열전달량을 최소화 하고, 도어와 물리온부 사이의 열손실을 최소화 해야 한다. 이렇게 하기 위해서는 도어와 물리온부 사이의 갭을 최소화 하면서 고내로 열 전도되는 거리를 길게 하여 열저항을 크게해야 한다. 이러한 개선 아이디어를 Fig. 9에 나타내었다. 물리온부에 부착 할 Adding sheet (단열재와 ABS로 구성)를 2/4/6/8mm두께 별로 좌우 각각 2개씩 제작하여 물리온부 양측면에 부착하였다.

3.3 E/N 개선 실험 및 결과

Table 6 에서 보는 것처럼, 물리온부 좌우 측면에 Adding sheet 를 두께를 증가시켜가면서 총 6 번 실험을 진행하였다. 물리온부 두께 변경에 따른 효과를 파악하기 위한 핵심 인자로 냉장고 사이클 운전률과 에너지 효율 두 가지를 고려하였다. 물리온부 개선 전 냉장고의 에너지 효율 시험 (Baseline test)과 물리온부 두께별 변경 시험을 진행하여, Fig. 10 및 Fig. 11 와 같은 결과를 얻었다. 실험 결과에 의하면, 물리온부 형상 및 두께 변경만으로도 냉장고 에너지 효율은 최대 6.4%, 운전률은 최대 6.2%을 개선할 수 있었다. 이것은 물리온부 두께 증가가 Hot-line 에서 물리온부를 거쳐 고내로 전도 되는 열전달량을 차단하는데 효과적이었음을 입증하는 결과이고, 도어 가스켓과 물리온부 사이의 유격이 줄어들어 들어 기밀 성능(Sealing)이 좋아져 고내의 냉기 손실 저감에 의한 효과로 해석 할 수 있다. 또한, Fig. 10 및 Fig. 11 에서 보면, 냉장고의 운전율과 에너지 소비율은 물리온부의 두께 증가에 따라서 거의 선형적으로 감소하였다. 냉장고의 에너지 효율은 냉장고 성능 판단의

기준이 되는 에너지 소비량을 의미하며, WT-210 Digital power meter 를 이용하여 측정하였고, 총 72 시간 동안 측정된 소비전력량의 평균치를 가지고 월간 소비전력량을 계산하였다. 또한, 운전율은 72 시간 동안 압축기 on-time 에 해당하는 시간을 의미한다.

Table 4 The specification of the measurement system

Specifications	
Chamber temp. And humidity	30±1℃, 75±5%
Power supply	220V/60Hz
Data logger	DA100/YOKOGAWA
Power meter	WT-210/YOKOGAWA

Table 5 The gage R&R test result of the power meter at 95-percent confidence

Specifications	
Test Sample	Side by side refrigerator
Energy Efficiency [kWh/月]	37.1/36.7/37.0/37.4/37.1
Room Temperature [F/R, ℃]	-18/3
P-Value (One Sample-T)	0.621 (95% Confidence)

Table 6 Test cases of mullion section thickness

	#1	#2	#3	#4	#5	#6
F[mm]		2	4	6	6	8
R[mm]	base line	2	4	4	6	6
Total [mm]		4	8	10	12	14

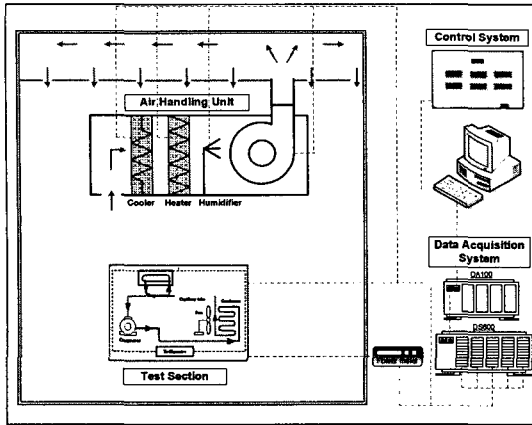


Fig. 8 Test chamber equipments

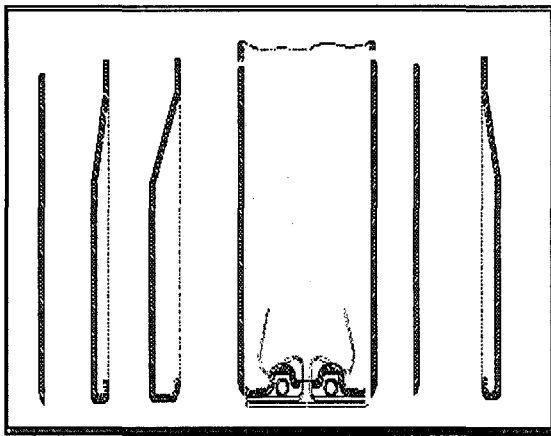


Fig. 9 Innovative ideas of a mullion section [Adding sheets are composed of ABS & insulation foam]

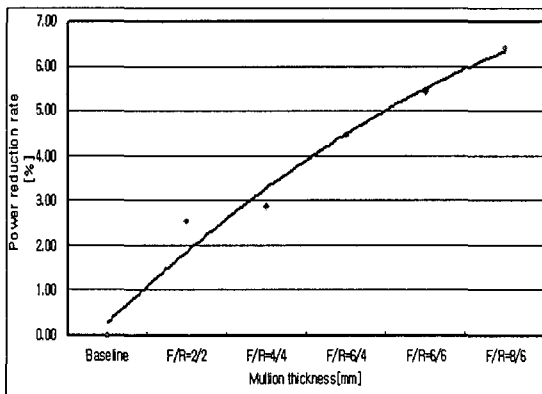


Fig. 10 Power reduction rate test results with the mullion section thickness variation [Improvements of an energy efficiency in the household refrigerator-freezer with adding sheet thickness increases of mullion section]

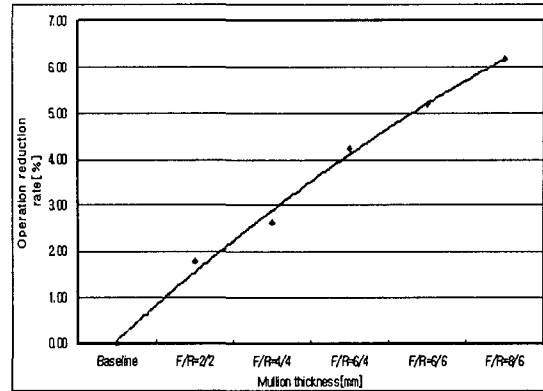


Fig. 11 Decreases of the operation rate during compressor on time with mullion thickness increases

4. 결론

가정용 냉장고의 에너지 효율을 높이기 위한 방안으로 그 동안 연구가 미진했던 에너지 노즈 부에 대한 열전달 메커니즘을 열전달 이론과 전산 해석을 통하여 분석하였고, 에너지 노즈부의 열손실을 개선할 수 있는 아이디어를 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 에너지 노즈부를 구성하고 있는 폴리온부 그리고 F실과 R실 측면부에서 열 및 온도 흐름을 Ansys 8.1를 통해 분석하였다.

(2) 에너지 노즈부가 냉장고에서 차지하는 단열 부하 중 폴리온부가 차지하는 열손실량이 전체 에너지 노즈부 부하의 34%를 차지함을 알 수 있었으며, 폴리온부가 에너지 노즈부의 열손실에 있어 취약한 부분임을 알 수 있었다.

(3) 에너지 노즈부 중 폴리온부의 취약한 열전달 구조를 개선할 수 있는 아이디어를 제시하였다.

(4) 냉장고의 폴리온부 개선 만으로 냉장고 에너지 효율은 최대 6.4%, 운전률은 최대 6.2%를 각각 개선 하였다.

위와 같은 결과는 냉동시스템 기술이 상당 수준 발전하여 냉장고 효율을 더 이상 높이기 힘든 현 기술 수준에서 냉장고 에너지 효율을 높일 수 있는 방법으로 에너지 노즈부에 대한 지속적이면서도 체계적인 연구가 필요함을 제시하였다. 또한, 가정용 냉장고와 같이 에너지 노즈부를 갖는 모든 냉동시스템, 예를 들면 김치냉장고⁽⁸⁾, 음료수 저장고, 냉동 전용 냉장고 등과 같은 제품에 있어 에너지 노즈 부의 개선으로도 에너지 효율을 개선할 수 있음을 제시하는 연구 결과이다.

참고문헌

- (1) Park, J. K., 2003, "Optimization of Heat Insulation System for a Household Refrigerator," *Trans. of the Sarek*, Vol. 15, No. 2, pp. 95~102.
- (2) Lee, M. Y. and Kim, S. U., 2005, "A study on Performance Characteristics of Propane/Isobutane Refrigerant Mixtures in a Domestic Small Multi-Refrigeration System," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 29, No. 2, pp. 271~278.
- (3) Lee, M. Y., Choi, S. J. and Kim, S. U., 2003, "Evaluation on the Cycle and Adiabatic Performance of a Small Multi-Refrigeration System," *Proceeding of the KSME, Autumn Annual Conference* pp. 769~774.
- (4) Christensen, L. B., 1981, "The Insulation of Freezers and Refrigerators- How Thick Should It be?" *Int. J Rerig*, Vol. 4, No. 2, pp. 73~76.
- (5) Hong, J. K., 1996, "The Numerical Analysis on Insulation Performance with Respect to the Envelope Geometries and Array of Evacuated Powder Panel in Rigid Foam/Evacuated Powder Composite Panels," *Trans. of the Sarek*, Vol. 8, No. 4, pp. 497~509.
- (6) Boughton, B. E., Clausing, A. M. and Newell, T. A., 1992, "An Investigation of Household Refrigerator Cabinet Loads," ACRC TR-21.
- (7) Hwang, T. G., 2005, "Power Savings of a Refrigerator with 3-PTV Measurements," *Trans. of the Sarek*, Vol. 17, No. 12, pp. 1145~1153.
- (8) Yun, J. W., 2003, "A Numerical Study on the Flow and Heat Transfer Characteristics in a Kimchi," *Trans. of the Sarek*, Vol. 15, No. 12, pp. 1078~1087.