

가정용 냉장고의 불응축 가스량에 따른 소비 전력 특성

김 두 현*, 황 유 진*, 박 재 홍*, 정 성 일*, 정 영 만*, 구 본 철*, 이 재 근*†, 안 영 철**, 방 선 욱***, 김 석 로***

*부산대학교 기계공학과, **부산대학교 건축학부, ***LG전자(주) 디지털어플라이언스 사업본부

Characteristics of Energy Consumption for a Household Refrigerator under Influence of Non-condensable Gases

Doohyun Kim*, Yujin Hwang*, Jae-Hong Park*, Seong-Ir Chung*, Young-Man Jeong*, Bon-Cheol Ku*, Jae-Keun Lee*†, Young-Chull Ahn**, Sunwook Bang***, Seok-Ro Kim***

*Department of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

**School of Architecture, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

***Digital Appliance Research Laboratory, LG Electronics Inc, Changwon, 641-711, Korea

(Received December 26, 2007; revision received May 6, 2008)

ABSTRACT: The presence of non-condensable gases as an additional thermal resistance inside a refrigerating circuit has been found for a general refrigerator. The effect of non-condensable gases was varied by controlling the injection amount of dry air into the refrigerating circuit to increase a thermal resistance. Energy consumption tests for the refrigerator were conducted under the various amounts of non-condensable gases. The tested refrigerating circuit was the household refrigerator. As the molar fraction of non-condensable gases was increased from 0% to 1.46%, the amount of energy consumption was found to increase up to 25%. The increase of the amount of non-condensable gases in refrigerating circuit was found to result in increasing the condensation temperature at the condenser and decreasing the evaporation temperature at the evaporator, which were presumably caused by the low specific heat and increased partial pressure of non-condensable gas.

Key words: Refrigerator(냉장고), Non-condensable gas(불응축가스), Energy consumption(에너지 소비), Vacuum(진공)

기 호 설 명

P : 냉동사이클 압력 [torr]
 V : 냉동사이클 내부 체적 [m^3]
 W : 소비 전력량 [kWh]

1. 서 론

지구온난화에 따른 지구환경 보호가 세계적인 과제로 대두되면서, 가전제품의 에너지 소비 효율 규제가 본격화 되고 있다. 가전제품 중에서도 냉장고는 설치된 후 상시 가동되기 때문에 가정에서 소비되는 전력분포에서 큰 비중을 차지하는 기기이다. 따라서, 냉장고 및 냉동 시스템의 에너지 효율을 증가시키기 위한 많은 연구가 진행되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 냉장고를 비롯한 냉동 시스템에서 효율을

† Corresponding author

Tel.: +82-51-510-2455; fax: +82-51-582-6368

E-mail address: jklee@pusan.ac.kr

저하시키는 원인중 하나는 냉동사이클 내에 존재하는 냉매외의 이물질인 불응축 가스나 수분이다. 이론적인 냉동사이클은 냉매만 존재할 때 최대의 효율을 나타내지만 실제 냉동사이클에 냉매만 존재하기 위해서는 냉동 시스템 내부가 절대 진공인 상태에서 냉매가 주입되어야 하므로 현실적 실현이 어렵다. 또한, 냉동 시스템을 구성하는 재료의 물질 투과율을 고려할 경우, 시스템내 불응축 가스의 존재는 불가피하다. 불응축 가스는 적은 양 일지라도 냉동 시스템 내부에 일정하게 분포되지 않는다. 이러한, 냉동 시스템내의 불응축 가스는 진공도를 저하시키고, 냉동사이클의 순환에도 관여하여 응축 표면에 집중되어 확산 과정을 통해 열저항으로 작용하여 시스템 에너지 효율을 감소시킨다. 그러나, 불응축 가스의 시스템에 대한 영향은 주로 큰 용량의 원통 다관식 응축기(shell and tube type condenser)와 같은 산업용 열교환기 시스템에서만 연구되어 왔으며, 소형 혹은 가정용 기기에서의 연구는 매우 제한적이다. 가정에서 사용되는 냉동 시스템의 경우 시스템 내부 체적이 작으므로 불응축 가스의 에너지 효율에 대한 영향이 상대적으로 더 크게 나타난다.⁽⁴⁻⁶⁾ 또한, 가정용 기기에서의 불응축 가스의 존재는 응축 압력을 증가시키고 증발 온도를 감소시켜 에너지 효율을 저하시킨다고 보고되고 있다.⁽⁷⁻⁸⁾

본 연구에서는 냉동 시스템에서의 초기 진공도에 따른 평형 상태에서의 진공압을 분석하고, 불응축 가스 투입에 의해 조절된 진공도에 따라 가정용 냉장고의 소비 전력 분석을 통하여, 불응축 가스와 진공도간의 상관관계를 파악하고 냉동사이클에서의 진공도 변화와 시스템 성능에 미치는 영향을 정량적으로 파악하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 가정용 냉장고

본 연구에서는 760 L급 양문형 가정용 냉장고(side by side refrigerator)를 실험대상으로 사용하였다. 냉장고의 응축기는 길이 18 m, 내용적 156.5 cm³으로 구리 튜브 및 알루미늄 흰으로 제작되었으며, 냉동실 내부 뒷벽면에 장착된 증발기는 길이 10.4 m, 내용적 471.7 cm³이다. 또한, 증발기에서 압축기로의 흡입라인(suction line)과 모세관(capil-

lary tube)을 접합시켜, 증발기 출구에서의 저온 증기 냉매를 이용하여 응축기 출구의 냉매를 과냉시켜 시스템 효율을 증가시키는 액체-흡입 열교환기(liquid suction heat exchanger)가 장착된 상태로 운전하였다. 압축기는 냉장고 온도조절 장치에 의해 on/off 작동을 하며 리니어 압축기가 사용되었다. 리니어 압축기는 미네랄 오일을 사용하고 무극성인 R600a (isobutane) 냉매로 작동되며, 해당 냉장고 최적 냉매 충전량인 82 g의 냉매를 충전하였다.

2.2 온도 및 압력 측정

Table 1에는 성능 시험시 온도 측정을 위해 부착한 열전대(t-type, OMEGA)의 위치를 나타내었다. 사용한 열전대의 부착은 각 측정부위에 열전대를 밀착시키고 외부 유동의 영향을 최소화하기 위하여 고무테이프를 감아 고정하였다. 냉동실(frozen room) 및 냉장실(refrigeration room)내 온도측정은 냉기류의 영향을 최소화하기 위해 동구의 홀에 열전대를 삽입 후 각 선반의 밑면으로부터 1/3 높이에 동구를 설치하여 측정하였다.

압력측정은 압축기의 흡입(suction) 및 토출(discharge)측에 Tee를 용접하고 Pirani 게이지(WSA-P200A, WOOSUNG AUTOMA)로 진공압을 측정하였다.

2.3 진공도 및 불응축 가스량 조절

가정용 냉장고의 냉매 주입 작업은 사이클 내부의 불응축 가스를 제거하는 일정 시간 동안 진공배기 작업 후, 사이클을 정적 상태에서 24시간 동

Table 1 Thermocouple location

Components	Location
Ambient	Front
Refrigeration room	Up, middle, down
Frozen room	Up, middle, down
Compressor	Suction, dome, discharge
Evaporator	Inlet, outlet
Condenser	Center, outlet
Dryer	Inlet

Table 2 Vacuum rates on injecting air amounts

Injecting air(cc)	0	46	122	210	315	420	527
Vacuum pressure(torr)	1	10	25	42.5	63	83	104
Dry air molar fraction(%)	0.00	0.10	0.29	0.59	0.86	1.17	1.46

안 방치하여 평형에 이르는 사이클 진공도를 확인하여 최종 진공도를 평가하고 기준에 만족할 경우 냉매의 주입 및 봉입작업을 완료하게 된다. 본 연구에서는 24시간 방치 후의 평형압을 사이클 진공도로 설정하고 냉매를 주입하여 불응축 가스가 혼입되지 않은 상태에서의 냉장고 성능을 파악한 이후, 일정량의 불응축 가스를 변수로 사이클 내에 주입하여 불응축 가스량에 따른 가정용 냉장고의 소비 전력 특성을 분석하였다. 본 연구에서의 불응축 가스량 변수 산출은 일본 Matsushita사에서 관리하고 있는 불응축 가스량 '100cc(본 연구의 molar fraction 환산시 약 0.2%)이하'를 기준으로 성능 이상을 일으키지 않는 최대 불응축 가스량까지 변수로 설정하였다.

냉동 시스템에서의 진공배기 시간에 따른 진공도와 초기 최고 진공도에 따른 평형 상태에서의 진공압 측정을 위하여 본 연구에서는 진공 펌프(TRP-36, WOOSUNG VACUUM)로 압축기 봉입구(service pipe) 및 드라이어 봉입구를 통하여 진공배기 작업을 수행하였다. Fig. 1은 초기 진공작업 및 평형압 시험을 위한 실험 장치도를 나타내었다. 진공 펌프와 각 봉입구간 연결은 고압진공 호스를 사용하여 누설을 최소화 하고, 압축기 흡입 및 토출측에 설치된 진공게이지로 저압부와 고압부의 진공도를 측정하였다. 여기서, 고압부는 압축기 토출부에서 응축기 출구까지, 저압부는 증발기 입구에서 압축기 흡입부까지를 의미한다. 진공배기 작업은 일정 시간 동안 진공펌프로 냉동시스템 내부 공기를 배기시키고 펌프 체결을 분리하여 24시간 경과 후 평형에 도달한 진공압력을 진공작업에 따른 평형압으로 설정하였다. 또한, 불응축 가스량에 따른 냉동 시스템의 성능 분석을 위하여 본 연구에서는 건공기를 냉동 시스템에 주입하는 방법으로 불응축 가스량을 조절하였다. 건공기 주입이전 냉동 시스템의 진공도를 설정하고, 드라이어를 거친 건공기를 주입하여 불응축 가스량을 조절하였다. 불응축 가스의 주입부는 압축기 봉입구에 직경 5mm의 구멍을 뚫은 후, 실리콘 튜브로

실링하고 10 cc 용량의 시린지(syringe)로 정량의 건공기를 주입한 후 재봉입하는 방법으로 시스템에 투입하였다. 가스량과 진공압의 관계는 식(1)과 같은 이상기체 상태방정식에 의해 나타낼 수 있다.

$$PV = mRT \tag{1}$$

여기서, P 는 압력, V 는 체적, m 은 질량, R 은 기체상수, T 는 절대 온도를 나타낸다. 냉동 시스템 내부의 온도가 일정하다고 가정하면 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \tag{2}$$

여기서, P_1 은 대기압으로 760 torr, V_1 은 냉동사이클 내부의 불응축 가스량, P_2 는 냉동사이클 내부 진공도, V_2 는 냉동사이클 내부 체적을 나타낸

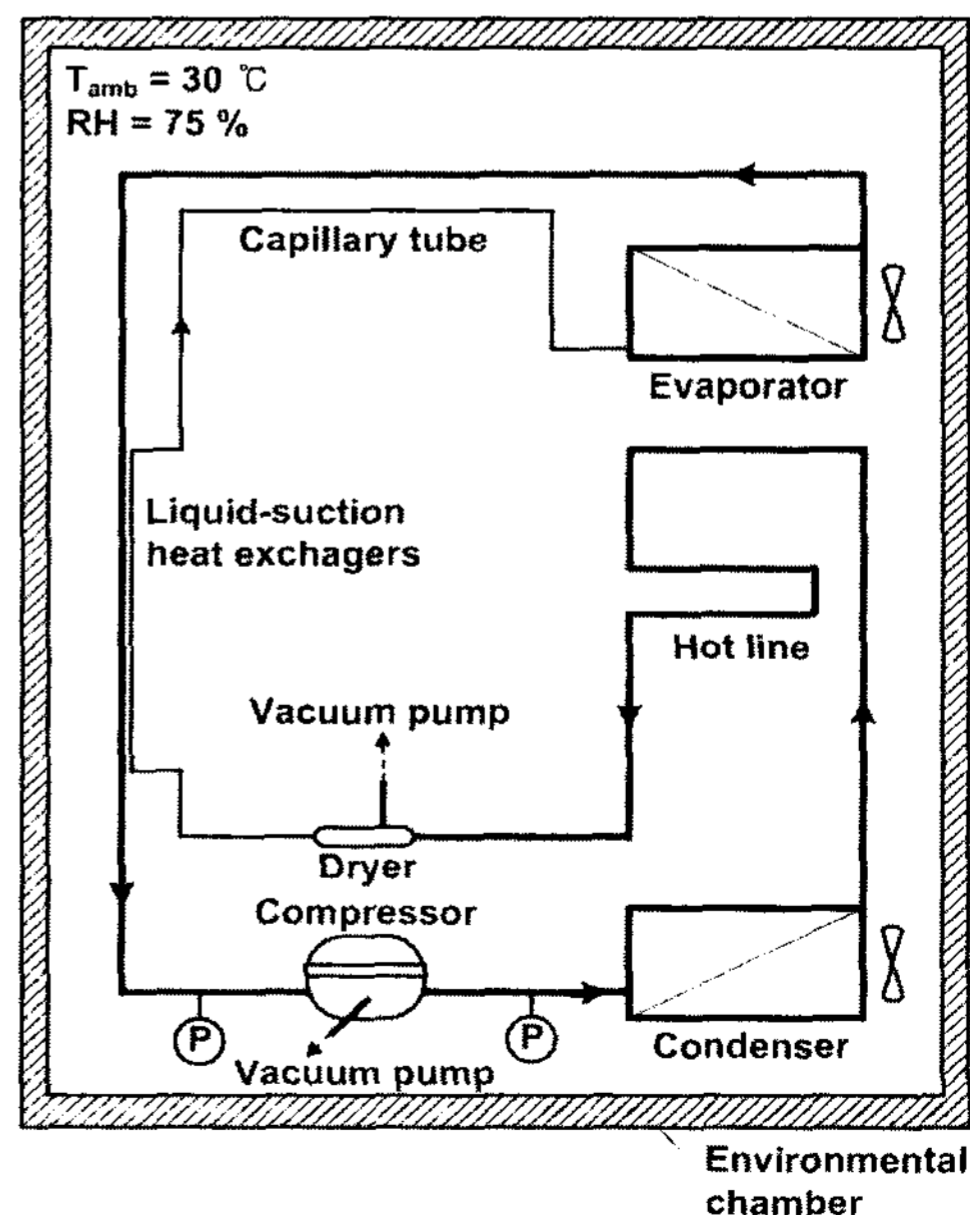


Fig. 1 Experimental apparatus for vacuum pressure measurements.

다. 식(2)에 의해 불응축 가스 투입량에 따른 초기 냉동사이클 내부의 진공도(1 torr) 및 냉동사이클 내부 체적(3.4L)으로 산출한 진공도를 Table 2에 나타내었다.

2.4 소비 전력 시험(Energy consumption test)

가정용 냉장고의 성능시험은 냉장고 표준시험인 KS C9305에 의거하여 항온항습 챔버(environmental chamber) 내부 온도 $30 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, 습도 $75 \pm 5 \%$ 조건에서 수행하였으며, Fig. 2에 시험장치도를, Table 3에는 시험조건을 나타내었다. 소비 전력 시험시 냉장고는 냉장고 뒷면과 시험 챔버 벽면 사이 거리를 120 mm로 설치하고, 무부하 조건에서 시험 냉장고의 냉동실 및 냉장실 온도를 각각 $-18 \text{ }^\circ\text{C}$, $3 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지하여 열전대로 냉동실, 냉장실 및 각 측정부의 온도를 측정하였다. 소비 전력 시험시 전력량은, 시험 냉장고에 일정하게 공급되는 전력을 측정하기 위해 정전압계(AVR)의 출구단과 데이터 로거(data logger)에 직접 연결하여 전력량을 계측하였다. Fig. 3은 소비 전력 시험 시간에 따른 압축기 on/off시 제상과 다음 제상사이의 안정구간을 나타내었다. KS C9305에 의거하여 소비 전력 측정 시간은 24시간을 원칙으로 하고 성에 제거가 24시간 내에 자연적으로 발생하는 성에 제거 완료의 경우는, 측정 시간을 24시간으로 하였다. 또한, 24시간 내에 자연 발생

성에 제거가 없을 경우 48시간을 측정하고, 24시간 이후 자연적 발생 성에 제거가 있을 때는 48시간에 종료하고, 48시간 내에 자연 발생 성에 제거가 없을 경우 72시간에 시험을 종료하였다. 여기서, 자연적 발생 성에 제거 완료 시점은 냉동실 온도가 $-18 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 를 만족하는 시점으로 하였다. 냉동실내 증발기의 경우 증발 성능 확보를 위하여 제상 히터에 의해 주기적으로 성에 제거 작동을 하며, 전체 에너지 소비 전력 계산시 제외되었다. 소비 전력 계산은 제상작동 이후 안정 구간내의 5~6사이클을 추출하여 산출하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 진공 시간에 따른 평형압

냉동 시스템의 초기 성능을 결정하는 진공도는 완전 진공인 상태가 이상적이거나 용접 불량, 커플러 불량, 부품 자체 누설등에 의한 외부 공기 유입에 의한 직접 누설이나, 진공 배기 이후의 사이클 내부에 존재하는 수분등의 증발로 기체의 양이 증가하여 진공도가 상승하게 된다. 가정용 냉장고의 진공도 평가는 진공 배기 작업 이후 24

Table 3 Experimental conditions

Chamber condition	Temperature	$30 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$
	Humidity	$75 \pm 5 \%$
Vacuum condition	Static pressure	1~104 torr
	Non-condensable gas	0~527 cc

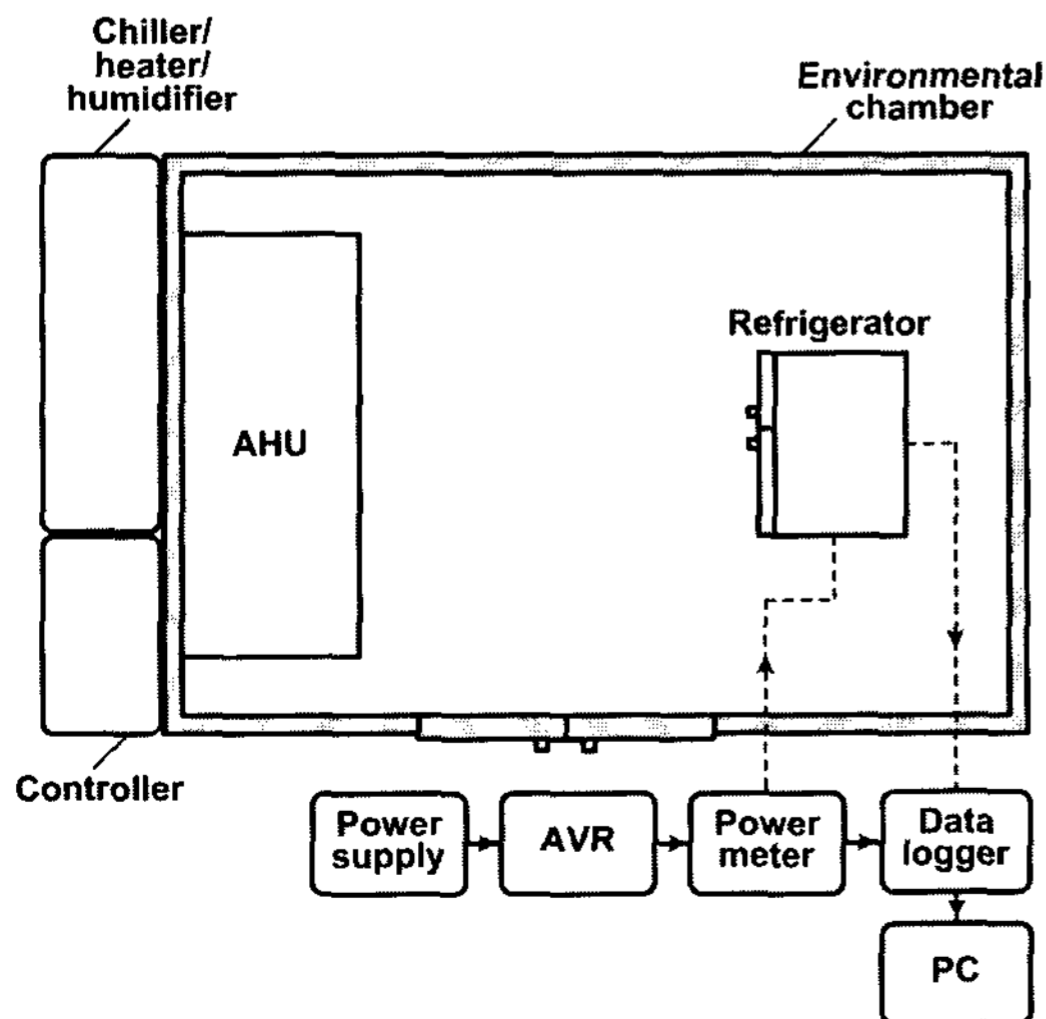


Fig. 2 The measurement system for the refrigerator performance test.

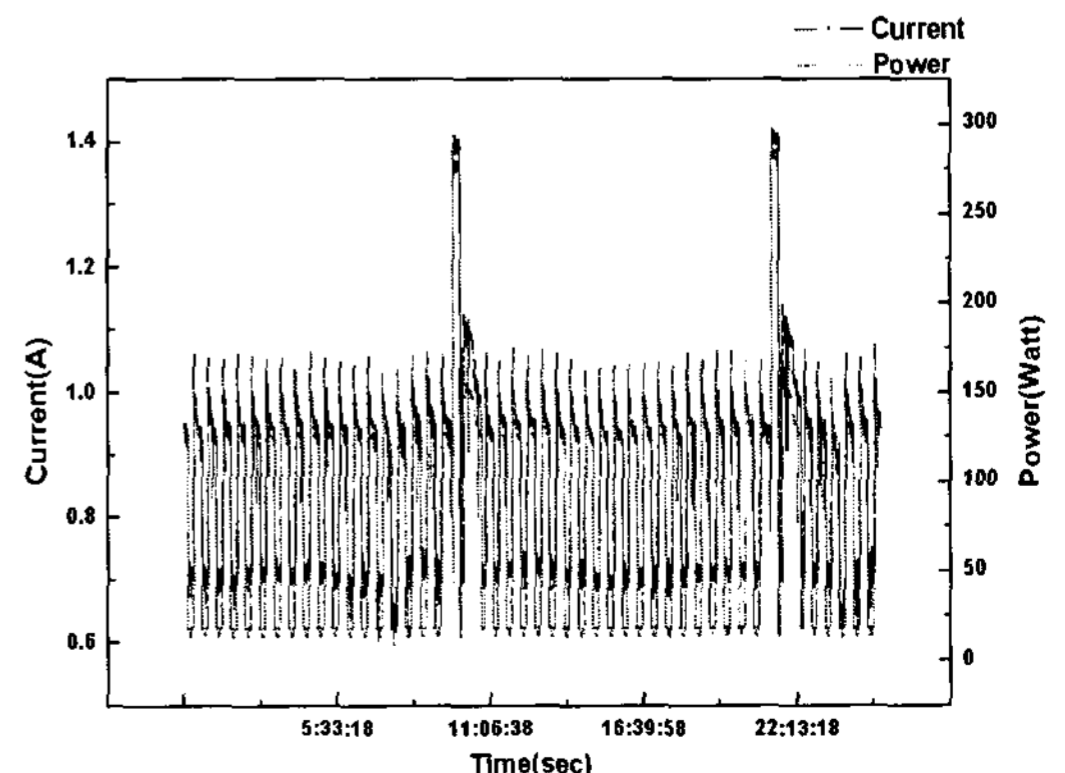


Fig. 3 Stabilization period of on-off defrosting cycle.

시간 평형압 조건 10 torr이하를 기준으로 불만족 시 불량 판정하며 대량 생산이 필요한 가전업체에서는 진공작업시의 최고 진공도를 기준으로 제품 진공도를 관리하고 있다. 업계에서 제시하고 있는 진공도 관리기준의 경우, 최고 진공도 기준으로 0.5~2.5 torr로 관리하고 있으며 본 연구에서는 최고 수준인 0.5 torr이하를 최고 진공도 기준으로 설정하였다. Fig. 4는 진공 배기에 따른 압축기 흡입 및 토출측 초기 최고 진공압력 및 진공 배기 후 24시간 이후의 평형압을 나타내었다. 진공 배기 시간 40분일 때 압축기 흡입측 최고 진공도는 0.08 torr이고, 압축기 토출측 최고 진공도는 0.4 torr이다.

진공 배기 작업중 흡입측 진공압은 진공 배기 시간 2분일 때 기준치인 0.5 torr이하로 떨어지고 토출측 진공압은 진공시간 32분일 때 0.5 torr이하로 떨어졌다. 진공 배기 작업 이후 24시간 평형압은 압축기 흡입 및 토출측 모두 1 torr이하로 기준치에 만족하였다. 냉동 시스템의 내부 진공도는 모세관의 직경이 매우 작기 때문에 모세관 기준으로 압축기 흡입부와 흡입관 및 증발기를 저압부로, 응축기와 핫라인, 드라이어를 고압부로 나누게 되며, 고압부와 저압부에서의 진공도 차이는 관내의 평균 직경이 고압부보다 저압부에서 더 크며 저압부의 진공도가 더 높게 된다. 그러므로, 압축기 흡입부에서의 측정 진공압력의 경우 저압부 진공압력에 해당하며 저압부 배관등 직경이 고압부보다 상대적으로 크기 때문에 진공 배기시 저압부가 고압부보다 빠른 시간내에 높은 진공도에 도달하게 되며, 고압부는 상대적으로 긴 진공 배기 시간 이후

해당 진공도에 도달하게 된다. 그리고, 압축기의 흡입과 토출측은 압축기 내부의 실린더에 의하여 구분되기 때문에, 상기 진공 배기 작업 동안 압축기 흡입측을 통한 배기는 저압부측의 잔류 가스를, 압축기 토출측을 통한 배기는 고압부측의 잔류 가스를 배기시키게 된다. 또한, 진공 배기 시간이 증가 할수록 진공 펌프의 배기율이 감소하며 진공압의 감소폭이 줄어들고, 진공 후 평형압까지는 고압부와 저압부의 압력차 및 관내에서의 가스 누출등으로 압력이 상승하여 평형을 이루게 된다.

3.2 소비 전력 시험

Table 4는 진공도에 따른 냉장고 소비 전력 시험 결과이며, 진공도별 냉장고내 온도 및 사이클 온도 및 소비 전력을 나타내었다. 사이클 내부의 불응축 가스량을 ~1.46%까지 증가시킴에 따라 냉동 시스템의 진공도가 낮아지며 압축일도 증가하게 되어, 압축기측 온도가 상승하게 된다. 그리고, 불응축 가스가 증가하게 되면 불응축 가스의 분압으로 인해 응축기에서의 전체 압력이 상승하여 응축 온도도 높아지게 되며, 진공도가 낮아짐에 따라 24시간당 소비하는 전력량은 증가한다.

Fig. 5는 진공도에 따른 압축기의 운전률(run time rate)과 소비 전력량을 나타내었다. 불응축 가스는 열교환기 내에서 열저항으로 작용하여 열교환 효율을 떨어뜨리고, 진공도가 낮아짐에 따라 불응축 가스의 증가로 증발기에서 냉동 효율이 감소하게 되어 압축기의 운전율이 52%에서 57%로 증가하였다. 여기서 운전율은 사이클당 1

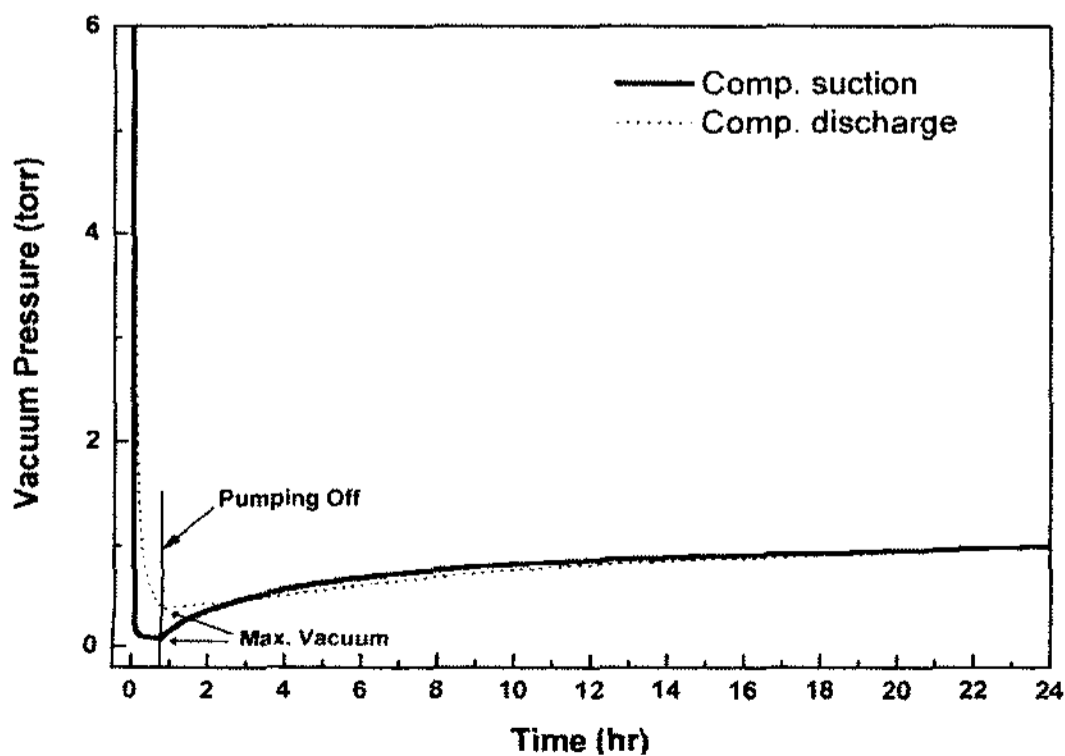


Fig. 4 Variation of vacuum pressure as a function of time.

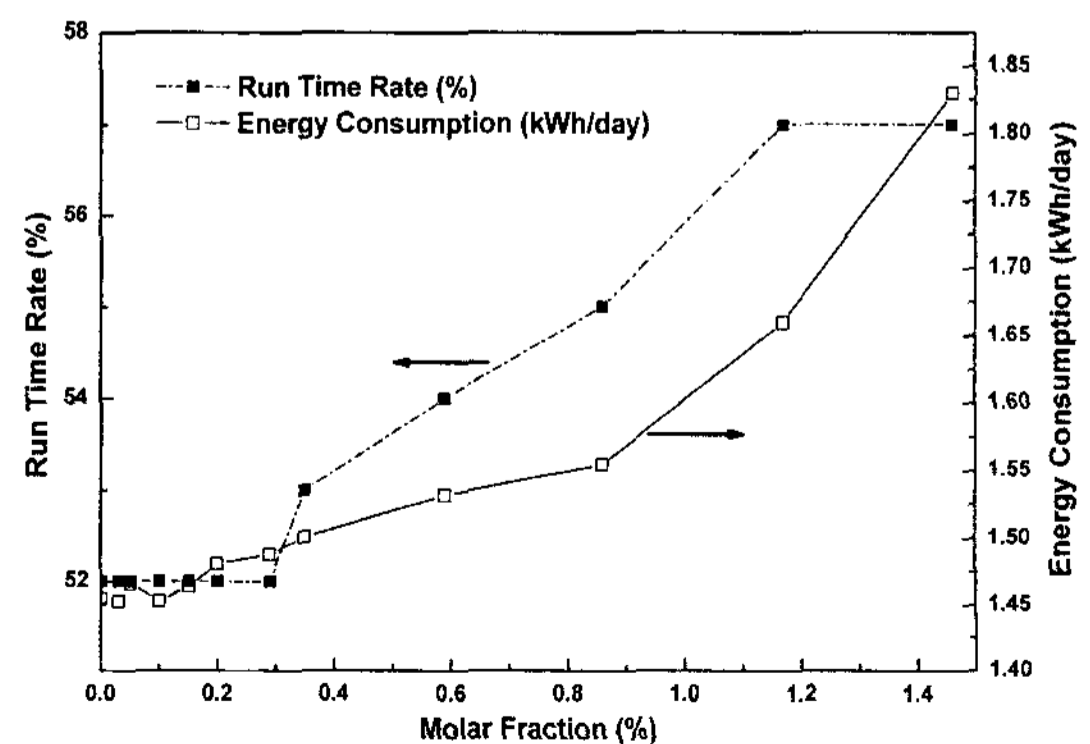


Fig. 5 Energy consumption and run time rate as a function of molar fraction of dry air.

Table 4 Results of energy consumption tests for the refrigerator according to the molar fraction of dry air

Air molar fraction	[%]	0	0.10	0.29	0.59	0.86	1.17	1.46
Evaporator inlet temperature.	[°C]	-25.3	-25.0	-26.7	-26.9	-28.0	-28.3	-29.4
Evaporator outlet temperature	[°C]	-24.7	-24.0	-23.7	-23.4	-23.8	-23.1	-23.2
Frozen room temperature	[°C]	-18.8	-19.2	-19.2	-19.0	-19.1	-18.9	-19.0
Refrigeration room temperature	[°C]	4.6	4.7	4.5	4.6	4.7	4.6	4.0
Compressor discharge temperature	[°C]	56.4	57.1	58.5	59.6	60.5	62.1	65.1
Condenser center temperature	[°C]	34.9	37.8	41.1	41.7	41.7	39.5	36.6
Condenser outlet temperature	[°C]	36.9	37.6	33.9	33.0	32.8	32.7	32.9
Dryer temperature	[°C]	33.4	32.7	28.5	28.9	28.7	28.8	28.7
Suction pipe temperature	[°C]	30.2	30.1	29.9	30.0	31.1	31.9	32.3
Input power on time	[watt]	110.3	110.4	113.9	113.9	113.6	116.9	130.0
Input power off time	[watt]	6.89	6.92	6.88	6.18	6.08	5.80	6.12
Energy consumption	[kWh/day]	1.455	1.453	1.488	1.532	1.555	1.660	1.830
Energy consumption variation	[%]	-	-0.1	2.3	5.3	6.9	14.1	25.8

시간에 작동하는 압축기의 운전시간을 의미한다. 또한, 불응축 가스량 증가에 따라 소비 전력량도 1.46 kWh/day에서 1.83 kWh/day로 25% 증가하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 가정용 냉장고의 냉동 시스템에서 초기 진공도에 따른 24시간 후의 평형압을 분석하고 건공기를 불응축 가스로 하여 냉동 시스템에서의 불응축 가스 투입에 의해 조절된 진공도에 따라 냉장고 소비 전력 시험을 수행하였다.

냉동 시스템내의 초기 진공도는 진공 작업시간에 따라 높아지며 시간에 따라 진공 펌프에서의 배기율도 낮아져 진공 압력의 감소폭이 줄어든다. 또한, 초기 진공 후 냉동 시스템내의 진공압은 고압부와 저압부의 압력차와 관내 가스 누출에 의해 상승한다.

불응축 가스량을 물 분을 기준 1.46%까지 냉동 시스템에 투입하였을 경우, 압축일이 증가하여 압축기의 운전률이 52%에서 57%로 증가하였으며, 소비 전력량도 1.46 kWh/day에서 1.83 kWh/day로 25% 증가하였다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

1. Radermacher, R. and Kim, K., 1996, Domestic-refrigerators: recent developments, International Journal of Refrigeration, Vol. 19, No. 1, pp. 61-69.
2. Sekhar, S. J., Lal, D. M. and Renganarayanan, S., 2004, Improved energy efficiency for CFC domestic refrigerators retrofitted with ozone-friendly HFC134a/HC refrigerant mixture, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 43, No. 3, pp. 307-314.
3. Björk, E. and Palm, B., 2006, Performance of a domestic refrigerator under influence of varied expansion device capacity, refrigerant charge and ambient temperature, International Journal of Refrigeration, Vol. 29, No. 5, pp. 789-798.

4. Jensen, M. K., 1988, Heat transfer equipment design, Hemisphere Publishing Corp., New York, pp. 497-512.
5. Burghardt, A., 1993, VDI Heat Atlas, Condensation of multicomponent mixture, VDI Verlag GmbH, Dusseldorf, Sect. Jbb.
6. Webb, D. R., 1995, Heat Exchanger Design Handbook, Begell House Inc., New York, Section 2.6.3.
7. Cecchinato, L., Dell'Eva, M., Fornasieri, E., Marcer, M., Monego, O. and Zilio, C., 2004, The effects of non-condensable gases in household refrigerators, Proceedings 10th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, pp. (R109)1-8.
8. Cecchinato, L., Dell'Eva, M., Fornasieri, E., Marcer, M., Monego, O. and Zilio, C., 2006, The effects of non-condensable gases in domestic appliances, International Journal of Refrigeration, Vol. 30, No. 1, pp. 19-27.