

< 기술논문 >

프로판/이소부탄(R-290/R-600a) 혼합 냉매를 적용한 가정용 소형 멀티 냉동시스템의 성능특성에 관한 연구

이 무 연[†] · 김 상 욱^{*}

(2004년 8월 17일 접수, 2004년 11월 25일 심사완료)

A Study on Performance Characteristics of Propane/Isobutane Refrigerant Mixtures in a Domestic Small Multi-Refrigeration System

MooYeon Lee and Sanguk Kim

Key Words : NR System(프로판/이소부탄 혼합 냉매 적용시스템), Power Consumption(소비전력), Small Multi-Refrigeration System(소형 멀티 냉동시스템)

Abstract

In this paper, the performance of Kim-chi refrigerator with three evaporator and one compressor was investigated in employing 55% propane and 45% isobutane (R290/R600a) refrigerant mixture as an alternative refrigerant of R134a. The drop-in test was performed by varying both refrigerant charge and capillary tube length in order to find both the performance and reliability of a small multi-refrigeration system. Results show that the power consumption is decreased by about 15% and COP is increased by about 10%, respectively as compared to the baseline system using R-134a. In addition, the propane/isobutane refrigerant mixture system took advantage of the minimization of modification and redesigning of system components because thermodynamic properties such as saturation pressure, temperature, normal boiling point(NBP) characteristics are similar to those of R134a. The reduction of sales cost is caused by the decrease of refrigerant cost per unit mass and refrigerant charge amount necessary for the refrigeration system.

기호설명

T : 온도 [K], [°C]
Inc : 인케이스, 콕
Sol : 솔레노이드 밸브
capi : 모세관[ID:0.74mm]
comp : 압축기
press : 압력[kgf/cm²]
cond : 응축기
dis : 압축기 토출
suc : 압축기 입구
ref : 냉매
evap : 증발기
NR : 프로판/이소부탄 혼합냉매 시스템

1. 서론

환경문제의 규제가 강화되면서 현재의 냉동시스템에 대한 각종 규제들이 생겨나고 있다. 특히 몬트리올 의정서와 교토 의정서에 의한 오존층 파괴물질의 규제선언 이후 기존의 CFC 및 HCFC 계열의 냉매가 점차 HFC 계열의 냉매로 대체되어가고 있으며 현재의 많은 냉동시스템에 적용되고 있다.⁽¹⁾ HFC 계열 냉매의 경우 오존층 파괴지수(ODP)가 0 이기는 하지만 지구 온난화 지수(GWP)가 높아 환경적 측면에서 사용은 바람직하지 않다. 이러한 환경적 문제의 대안으로 물, 이산화탄소, 암모니아, 탄화수소 등의 천연냉매가 대안으로 제시되고 있는데, 이러한 냉매 중 기존 냉동시스템에 적용 가능성이 높게 평가되고 있는 것은 탄화수소 계열의 냉매이다.⁽²⁾ 탄화 수소계열의 냉매는 환경친화성, 화학적 안정성 등 냉매로서의 구비조건을 모두 갖추고 있지만 가연성이 문제점으로 제

[†] 책임저자, 회원, 위니아 연구소
 E-mail : S10669@winiamando.com
 TEL : (041)530-6544 FAX : (041)530-3378
^{*} 위니아 연구소

기되고 있다.^(3,4)

그러나 가연성은 냉매 충전량이 큰 대형시스템에서는 중요한 요소로 고려되지만, 냉매 충전량이 작은(100g 이하) 소형 멀티 냉동시스템에서는 거의 문제가 되지 않는 것으로 알려져 있다.^(4,5) Table 1에서 보면, 기존의 소형 냉동시스템에 주로 사용되고 있는 R-12의 대체냉매로 사용되고 있는 R-134a 냉매와 유사한 열역학적 특성을 가지는 탄화수소계열 냉매는 존재하지 않는다. 따라서 기존 냉동시스템의 설계를 크게 변경시키지 않고 R-134a 대체냉매로 탄화수소계 냉매를 적용하고자 한다면 혼합냉매의 사용은 불가피하다.⁽⁶⁾ 새로운 작동유체를 시스템에 적용할 경우 기존 냉동시스템의 교체 및 설계 변경이 요구되어 필연적으로 시설 투자비용과 시설 교체비용이 요구되므로 탄화수소 계열의 냉매를 본 시스템의 대체냉매로 적용할 때 드랍-인 가능성을 타진해 봐야 한다. 즉, 기존 냉동시스템에서 사용하고 있는 압축기와 열교환기를 교체하지 않고 기존 냉매와 열역학적 물성이 동일하거나 더 높은 성능계수를 얻을 수 있는 냉매를 선정하는 일은 매우 중요하다. 기존 냉매와 유사한 조건의 탄화수소계열의 냉매를 혼합함에 있어 고려해야 할 선결 문제는 적절한 혼합물질의 선택과 혼합비를 결정하는 것이며 현재 김치냉장고에 적용되고 있는 R-134a의 대체냉매로 가장 관심을 끌고 있는 혼합 냉매는 R-290(프로판)과 R-600a(이소부탄)의 탄화수소계열 냉매이다. R-290(프로판)과 R-600a(이소부탄)은 탄화수소계열 냉매 중 R-C270을 제외하고 R-134a를 사이에 두고 가장 적은 비등점의 차이를 나타내며 그 혼합비에 따라 R-134a와 유사한 열역학적 물성을 가지게 만들 수 있다.⁽⁴⁾ 이러한 특징은 기존 시스템의 열교환기를 그대로 적용할 수 있게 하고 충전상의 문제나 냉매의 누설에 의한 혼합 성분비 변화의 문제를 최소화 할 수 있다.⁽⁴⁻⁶⁾ 프로판/이소부탄(R-290/R-600a) 혼합 냉매에 대한 연구는 주로 열펌프 및 가정용 냉장고를 대상으로 진행되어 왔는데, 가정용 냉장고에 적절하게 적용할 수 있는 프로판/이소부탄(R-290/R-600a) 혼합 냉매의 성분비는 작동 온도 및 부하 조건 등 시스템 특성에 따라 다소 차이가 있으나 열역학적 물성치 측면에서 본다면 혼합 냉매의 질량성분비가 50:50, 40:60인 경우가 R-12 또는 R-134a와 가장 유사한 체적 냉동용량(VCR) 및 포화온도-압력 특성을 나타내는 것으로 알려져 있다.⁽⁴⁻⁷⁾ 따라서 R-134a를 사용하고 있는 김치냉장고의 대체냉매로 프로판/이소부탄(R-290/R-600a) 혼합 냉매의 혼합비를 기존 연

구 결과를 바탕으로 55:45% 선정하였고, 다양한 조건에서 드랍-인 실험을 진행하였다. 본 연구에서 사용한 혼합냉매는 온도 기울기가 7~9℃ 정도로 높아서 장기간 사용하는데 신뢰성에 문제가 있을 수 있다. 특히 김치냉장고에 사용되고 있는 시스템은 소형이고, 한 개의 압축기에 2,3 개의 증발기가 장착된 소형 멀티 냉동시스템 이므로 대체냉매를 적용할 때 사이클 최적화, 시스템 신뢰성 그리고 드랍-인 가능성 등에 관한 체계적인 연구가 필요하다. 본 연구의 목적은 소형 멀티 냉동시스템인 김치냉장고에 프로판/이소부탄(R-290/R-600a) 혼합 냉매를 대체냉매로 적용하여 기존 시스템과의 성능특성을 비교하였고 드랍-인 테스트를 통하여 기존 제품의 설계 변경 없이 적용이 가능한지를 타진 하였다. 이를 위하여 기존 김치냉장고의 성능특성과 프로판/이소부탄(R-290/R-600a) 혼합냉매를 적용한 시스템의 성능 특성을 실험적으로 규명하였으며 이론적 해석을 통해 최적의 냉동시스템을 구현하였다. 또한 혼합 냉매를 가정용 소형 멀티 냉동시스템에 적용시 냉매 봉입량 감소, 우수한 열전달 특성, 단위 질량 당 단가의 감소는 원가절감 효과를 가져와 시장에서 경쟁력 우위를 확보 할 수 있을 것으로 생각된다.

2. 실험 방법

2.1 실험 목적

R134a가 R12 대체냉매로 김치냉장고에 본격적으로 적용된지는 3~5년 정도 밖에 되지 않지만 R12 비해 오존층 파괴지수가 없고 지구온난화 지수가 상대적으로 낮다는 장점이 있어 많이 사용되고 있다. 하지만 열전달 계수가 R12에 비해 약 3~10% 정도 낮아 전체적인 냉동시스템 효율은 R12를 냉매로 사용하는 시스템 보다 나빠서 소비전력의 증가를 초래한다. 또한 지구 온난화 등 환경문제를 야기할 수 있는 가능성이 있어 장기적으로는 사용이 제한 될 수 있다. 본 연구에서는 지구 온난화지수가 거의 없는 탄화수소계열 냉매인 프로판/이소부탄(R-290/R-600a) 혼합 냉매를 김치냉장고에 적용하여 소비전력(에너지 소비효율), 냉각속도, 냉동용량을 고려한 기존 시스템과의 성능특성을 비교하고자 하며 냉매량과 모세관 길이를 변경하여 최적의 냉동시스템을 구현 하고자 한다. 또한, 프로판/이소부탄(R-290/R-600a) 혼합 냉매의 구성 성분인 프로판(R-290)과 이소부탄(R-600a)은 증발잠열이 R-134a 보다 우수하고, 액체 밀도가

Table 1 Properties of hydrocarbons refrigerants

Refrigerant	Name	NBP[°C]	P _c [Mpa]	T _c [°C]
R-170	Ethane	-84.0		32.15
R-1270	Propylene	-47.7	4.67	92.4
R-290	Propane	-42.1	4.25	96.8
RC-270	Cyclopropane	-33.5	5.58	125.2
R-12	-	-29.8	4.14	112.0
R-134a	-	-26.1	4.06	101.1
R-600a	Isobutane	-11.6	3.64	134.7
R-600	n-Butane	-0.5	3.80	152.0

Table 2 Specifications of a refrigeration system

Component	Specification
Compressor	Reciprocating Comp. <scotch yoke type>
Condenser	Wire_Fin HX.
Evaporator	Cu,Tube_Plate HX.
Capillary tube	Id 0.74*L 3500, 2EA Id 0.74*L 6000, 1EA

Table 5 The comparison of system specifications between baseline and NR system

Compressor	Baseline	NR system
Oil	POE	Mineral/alky benzene
Oil charge[cc]	(Freola) 220	220
Power input[W]	142	142
COP[EER]	1.45(4.7)	1.45
Displacement[cm ³]	5.71	5.71

Table 3 Power consumption variation with refrigerant charge and power consumption rate [Baseline]

Refrigerant charge [g]	Capillary Length [mm]	Power Consumption [kWh/month]
95	3000/3000/6000	18.63
100	3000/3000/6000	18.17
105	3500/3500/6500	20.49

Table 4 The comparison of performance data of baseline and NR system

System	Ref.	charge amount [g]	Capi. Length [mm]	Energy consumption [kWh/month]
Base_line	R134a	100	3000/3000/6000	18.17
NR_1	R290/R600a	60	3000/3000/6000	18.12
NR_2	R290/R600a	60	3500/3500/6500	16.97
NR_3	R290/R600a	55	3500/3500/6500	16.23
NR_4	R290/R600a	50	3500/3500/6500	15.92
NR_5	R290/R600a	45	3500/3500/6500	17.92
NR_6	R290/R600a	40	3500/3500/6500	19.99
NR_7	R290/R600a	50	3500/3500/7000	19.83

R-134a 보다 작기 때문에 시스템에서 열전달 성능을 향상 시켜 에너지 소비를 줄일 수 있으며, 시스템의 냉매 봉입량을 줄여 원가절감을 가능하게 할 수 있다는 장점이 있다.

2.2 실험 장치 및 구성

기존의 연구에 의하면 프로판과 이소부탄의 혼합비가 50/50 또는 40/60 일 때 R-12, R-134a 의 포화온도, 압력과 유사하다고 한다.^(4,6) 본 연구에서는 기존의 연구결과를 바탕으로 프로판/이소부탄(R-290/R-600a) 혼합 냉매의 혼합비를 55/45 로 선정하여 R-134a 를 대체하여 실험을 수행하였다.

압축기, 응축기, 증발기, 모세관, 팬 모터로 구성된 김치냉장고를 온도와 습도를 제어할 수 있는 항온/항습 챔버에 넣고 온도, 압력, 소비전력 등을 측정하였다. Baseline system 은 220 리터 용량에 고내가 3 개 장착된 제품으로 1 개의 압축기, 3 개의 증발기, 3 개의 슬레노이드 밸브, 응축기 그리고 팽창 장치로 구성되었으며, Fig. 1 에 나타내었다. Base line system 에 사용된 압축기는 운전률, COP, 자체 소비전력 등을 고려하여 선정하였고 냉매량 및 모세관 설계는 월간 소비 전력량, 냉방용량, 각 고내(Incase1/2)가 안정화 되는 시간 등을 고려하여최적의 시스템을 구성하였다. 프로판/이소부탄(R-290/R

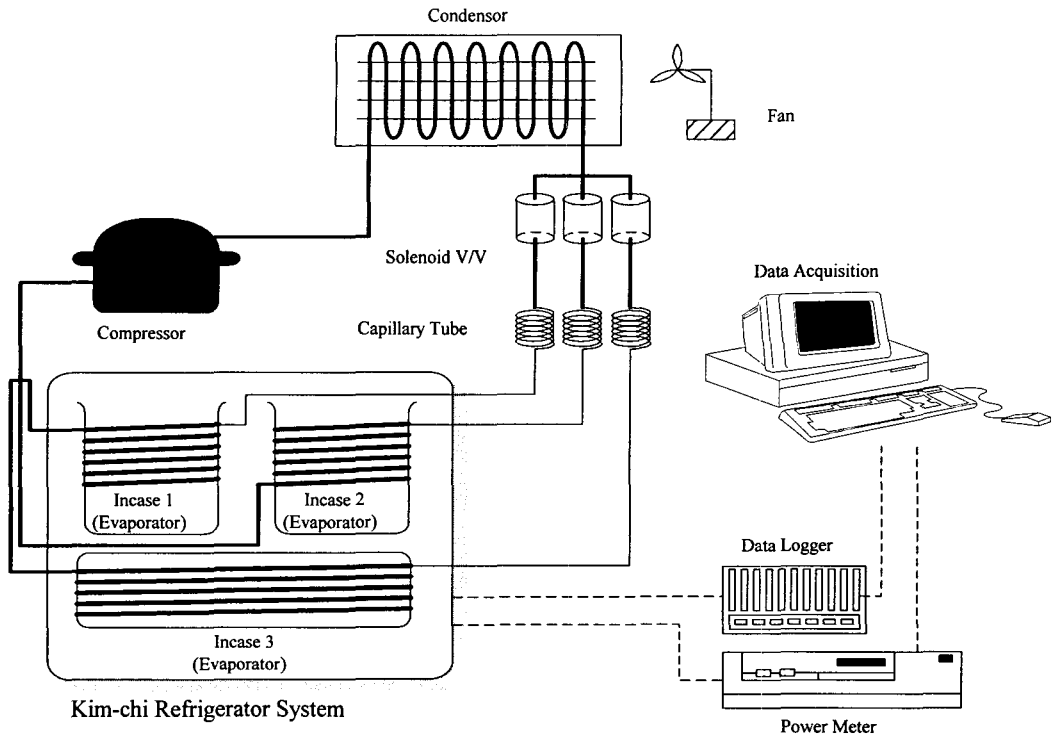


Fig. 1 schematic of the test set-up

-600a) 혼합 냉매는 Baseline system 을 기준으로 설계하였으며 압축기 오일을 POE 에서 미네랄 오일로 교체하여 실험을 진행하였다. 압축기에 사용된 오일을 제외한 모든 부품은 동일하게 구성하였다. Baseline system 과 NR system 에 사용된 압축기 사양은 Table 5 에 나타내었고, 압축기를 제외한 모든 사양은 Table 2 에 나타내었다. Fig. 1 에서 보면, 각 고내는 스틸 재질로 되어 있고 그 주변을 동관이 일정한 간격으로 둘러싸고 있는데, 그 이유는 시스템을 순환하는 냉매가 증발 과정 동안 고내의 온도를 일정하게 유지하고 각고내의 상하 온도 편차를 줄이기 위하여 동관이 각고내를 일정한 간격으로 둘러싸고 있는 것이다. 또한 동관과 접촉면의 열전달 특성을 좋게 하기 위하여 동관을 각고내에 납작하게 밀착시켰다. 이러한 증발기 구조는 도어를 자주 열고 닫는 김치냉장고의 특성상 냉기의 이탈과 손실을 저감시킬 수 있으며 자연대류로 인한 에어 커튼을 형성하여 냉기를 장기간 보존할 수 있으며 일반 냉장고와 구별되는 김치냉장고만의 증발기 특성이기도 하다.⁽¹²⁾

2.3 실험 방법

본 연구에서는 R134a 의 지구 온난화 지수가 높아

환경문제를 야기할 수 있는 소지가 있어 지구온난화 지수가 거의 없는 탄화수소 계열인 프로판/이소부탄(R-290/R-600a) 혼합 냉매를 김치냉장고에 적용하여 실험을 진행하였다. 먼저 Baseline system 은 냉매량과 모세관을 변화시켜 가면서 각고내의 냉각속도, 냉각성능, 에너지 소비효율 등을 고찰하였고, 프로판/이소부탄(R-290/R-600a) 혼합 냉매 적용한 시스템(NR system)은 Baseline system 을 기준으로 모세관 길이와 냉매량을 변경하면서 실험을 진행하였다. 프로판/이소부탄(R-290/R-600a) 혼합 냉매의 비체적이 R-134a 보다 크기때문에 냉매량을 R134a 대비 45~60% 까지 변경하면서 실험을 진행하였고, 모세관 길이는 유동 안정성, suction 파이프의 과냉, 압력 강하, 시스템 소비전력량 등을 고려하여 기존 대비 약 20~40% 까지 변경 하면서 실험을 진행하였다. 실험은 에너지 소비량과 냉각속도 및 냉동성능을 측정하는 실험으로 나눠서 진행 하였으며, 각고내의 온도를 일정하게 유지하면서 전력 사용량을 측정하는 에너지 소비실험과 냉매의 냉각속도를 측정하는 무부하 연속운전 실험을 통해 소형 멀티 냉동시스템의 최적의 사이클을 구성하였다. 각고내 온도, 기계실 온도, 증발 압력, 응축 압력,

Table 6 The comparison of pulldown test results between baseline and NR system [40℃,60%]

Chamber Condition [40℃, 60%]	Charge Amount[g]	Suction Pressure[kPa]	Discharge Pressure[kPa]	Compressor Top Temperature[℃]
NR_4 (R290/R600a)	50	78.5	1304.3	89.5
NR_3 (R290/R600a)	55	88.3	1323.9	88
Baseline Model (R_134a)	100	49.0	1245.4	90.5

Table 7 The comparison of pulldown test results, compressor operating time between baseline and NR system [40℃,60%]

Chamber Condition [40℃, 60%]	Compressor On_Time [Min]	Compressor Off_Time [Min]	Temperature [℃]	Room_middle_1 [min]	Room_Middle_2 [min]
NR_4 (R290/R600a)	33 (23/ 48h)	170	0	85	90
			-5	112	121
			-10	153	174
			-15	272	291
			-20		
NR_3 (R290/R600a)	32.3 (24/ 48)	171	0	84	90
			-5	120	125
			-10	160	183
			-15	338	329
			-20		
Baseline Model (R_134a)	42.5 (21/ 48)	172	0	98	97
			-5	128	123
			-10	213	194
			-15	382	368
			-20		

소비 전력량을 측정하기 위하여 압축기 입구/출구, 응축기 입구/출구, 모세관 입구/출구, 각고내를 상부/중부/하부로 나누어 열전대(thermocouple)를 부착하여 냉동용량을 측정하는 에너지 소비실험과 냉매의 냉각속도를 측정하는 무부하 연속운전 실험을 통해 소형 멀티 냉동시스템의 최적의 사이클을 구성하였다. 실험 장치에 들어간 열전대 및 압력게이지의 위치는 다음과 같다. 각고내 온도, 기계실 온도, 압력, 소비전력량을 측정하기,

위하여 압축기 입구/출구, 응축기 입구/출구, 모세관 입구/출구, 고내를 상부/중부/하부로 나누어 열전대(thermocouple)를 부착하여 각 부의 온도를 20 초 간격으로 측정하였고, 시스템의 응축압력 및 증발압력은 Setra C206 압력게이지를 이용하여 측정하였다. 제품의 에너지 소비등급 및 효율을 판단 할 수 있는 소비전력량은 항온항습 챔버에 장착되어 있는 Yokogawa DR 240 Data logger 에서 실시간으로 측정하였다.

2.3.1 풀다운 시험(No load pulldown test)

본 연구에서 풀다운 시험은 김치냉장고 각 고내의 온도 제어센서를 제거하여 압축기를 연속 운전 상태로 만든 후 시스템을 무부하 상태로 가동시켜 고내(INCASE)의 냉각속도를 측정하였다. 풀다운 시험은 시스템 가동 조건인 항온/항습 챔버 조건 40℃, 60% 상태에서 고내의 온도를 챔버 온도로 안정화 시킨 뒤 시스템을 가동시키는 것이다. Baseline system 과 프로판/이소부탄(R-290/R-600a) 혼합 냉매를 적용한 모델의 각 고내 온도 변화를 시간에 따라 측정하였다. 각 고내의 평균온도가 -5 도, -10 도, -15 도, -20 도에 도달하는 시간을 기록하여 냉각속도 및 냉동성능을 계산하였고, Table 7 에 나타내었다.

2.3.2 냉동성능 및 에너지 소비효율 등급 실험

Baseline system 의 시작품으로 제작한 김치냉장고를 항온/항습 챔버 25 ± 1 ℃, 50 ± 5% 조건에서 48 시간 동안 실험하였다. 냉동성능 및 에너지 소비효율 측정은 KS 실험 규격인 KS C 9321 과 KS C 9321 부속서에 의거하여 실험을 수행하였다. 온도 및 압력 측정값은 Yokogawa DR 240 Data logger 에서 PC 와 20 초 간격으로 실시간으로 저장되었다. 에너지 소비량은 DT1010 Digital power meter 를 이용하여 측정하였고, 총 48 시간 동안 측정된 소비전력량의 평균치를 가지고 월간 소비 전력량을 계산하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

본 연구에서는 김치냉장고의 성능과 드랍-인 적용 가능성 판단을 위해 혼합 냉매의 냉매량과 모세관 길이를 변경하면서 실험을 진행하였고, 측정된 실험 자료들을 가지고 압축기 운전률, 에너지 소비효율 등급을 판단 할 수 있는 월간 소비전력량, 시스템의 냉동성능을 판단 할 수 있는 고내의 냉각속도 실험 등을 진행하여 Baseline system 실험 결과와 비교하였다. 본 연구에서의 오차 범위는 60Hz 에서 전력은 ± 0.009W, 온도 ± 0.15℃, 압력 ± 0.02 kPa 이다.

3.1 냉동사이클의 최적화

본 실험에서 사용한 Baseline system 냉동사이클의 최적화를 위하여 냉매량과 모세관 길이를 변경하면서 실험을 진행하였다. 모세관 길이와 냉매량은 시스템의 성능과 밀접한 관련이 있으

며, 두 가지 중 어느 하나가 비정상적으로 설계 되면 소음, 냉동성능 저하, 그리고 과도한 월간 소비전력 발생의 원인이 된다. 본 연구에서는 소형 멀티 냉동시스템의 성능계산에 관한 정형화된 수치적 계산방법이 없어 실험을 통해 모세관 길이와 냉매량을 선정하였고, Table 3 에 냉매량과 모세관 길이 변경에 따른 냉동성능 및 월간 소비전력의 변화를 나타내었다. 모세관 내경 0.74mm 로 고정하고 Baseline system 의 고내 1, 2 와 연결된 모세관 길이 3000~3500mm, 고내 3 와 연결된 모세관 길이 6000~6500mm, 냉매량 95~110g 로 변경하면서 실험을 수행하였다.

Baseline system 은 모세관 길이 3000/3000/6000 mm, 냉매량 100g 일 때 냉동성능 및 월간 소비전력이 가장 적게 나오는 것으로 확인되었고, 이 때를 설계점(design point)으로 결정하였다. 프로판/이소부탄(R-290/R-600a) 혼합 냉매 적용 모델은 기존 모델의 드랍-인(drop-in test) 가능성을 평가하기 위하여 압축기를 제외한 모든 구성 요소들은 기존모델과 동일하게 구성하여 냉매량과 모세관 길이를 변경하면서 비교 실험을 진행하였다. 프로판/이소부탄(R-290/R-600a) 혼합 냉매를 기존모델에 적용 시 압축기에 사용된 POE 오일을 미네랄 오일로 교체하여 실험을 진행하였고, 그 결과 Baseline system 과 대등하거나 더 우수한 냉각성능 및 냉동효율을 나타낼 수 있는 것으로 확인되었다. 프로판/이소부탄(R-290/R-600a) 혼합 냉매를 적용한 냉동시스템은 냉매량 45g, 모세관 3500/3500/6500mm 조건에서 냉동성능 및 월간 소비전력이 가장 적게 나오는 것으로 확인되었고, 이 때를 NR system 의 설계점(design point)으로 결정하였다. NR system 의 모세관길이가 Baseline system 에 비해 길어졌는데, 그 이유로는 R-134a 에 비해 프로판/이소부탄(R-290/R-600a) 혼합 냉매의 증발 잠열이 우수하여 동일한 냉동능력을 내기 위해서 질량 유량이 감소해야 하므로 모세관 길이가 증가하였다. NR system 의 냉매 봉입량이 Base-line system 에 비해 감소하는데, 그 이유로는 프로판/이소부탄(R-290/R-600a) 혼합 냉매의 비체적이 R-134a 보다 크기 때문에 baseline system 과 비슷한 냉매의 질량 유량을 가지기 위해서는 냉매 봉입량을 줄여야 한다.

3.2 풀다운 및 냉각속도실험 결과

Baseline system 과 혼합 냉매를 적용한 모델의 고내 온도가 0, -5, -10, -15, -20℃에 도달하는 시

간 등을 고려하여 분석한 결과가 Table 7에 나타나 있다. Table 7에서 보면, 혼합 냉매 적용모델이 Baseline system 보다 -5°C 도달하는 냉각시간이 약 15% 정도 향상되었고, -5°C 이후에서도 약 5% 정도 향상된 냉각기울기를 가지는 것으로 나타난다. 따라서 프로판/이소부탄(R-290/R-600a) 혼합 냉매를 시스템에 적용할 경우 시스템 효율이 향상될 수 있음을 확인할 수 있었고, 프로판/이소부탄(R-290/R-600a) 혼합 냉매의 열전달 능력이 R-134a 보다 우수하여 냉각속도와 냉동능력이 우수하다는 것을 의미한다.⁽⁹⁾ Table 6에서 보면 압축기 토출측 압력은 약 4~7% 정도 증가한 반면, 압축기 상부측 온도는 약 $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ 정도 감소하였다. 이는 동일한 압축기를 사용할 경우 프로판/이소부탄(R-290/R-600a) 혼합 냉매를 사용하는 것이 압축기의 수명 측면에서는 유리할 수 있다. 단, 압축기 입구측 압력이 Baseline system 대비 약간 높긴 하지만 압력 차이는 미비하기 때문에 시스템에서 성능에 미치는 영향은 적다고 볼 수 있다.

3.3 에너지 소비효율 등급 실험 결과

에너지 소비효율 등급시험은 KS 실험 규격인 KS C 9321 과 KS C 9321 부속서에 의거하여 실험을 수행하였고, 소비전력 실험 시 각고내 조건은 위의 실험 규격에 의거하여 무부하(No load) 상태로 하였다. 실험은 챔버 온도 25°C , 60% 조건에서 Baseline system 과 NR system 간의 시간당 소비 전력량과 월간 소비전력을 측정하였고, Table 4에 나타내었다. 먼저, Baseline system 은 냉매량 100g, 3000/3000/6000mm 에서 19.07kWh/month , NR system 은 45g, 3500/3500/6500 mm 조건에서 16.92kWh/month 나왔다. 프로판/이소부탄(R-290/R-600a) 혼합 냉매 적용모델의 냉매량은 Baseline system 대비 약 55% 정도 감소하였고, 모세관은 500mm 정도 증가하였다. 프로판/이소부탄(R-290/R-600a) 혼합 냉매의 비체적이 R134a에 비해 크기 때문에 최적 냉매 충전량이 감소한 것으로 보이고, 모세관 길이의 증가는 상대적인 질량 유량의 감소와 혼합 냉매의 증발 잠열이 크기 때문인 것으로 생각된다.^(4,9) NR system 에너지 소비량은 Baseline system 대비 약 13% 정도 감소하였다. 기존의 연구 결과에서도 프로판/이소부탄(R-290/R-600a) 혼합 냉매가 R-22 또는 R-134a에 비해 열전달 계수가 약 30% 정도 큰 것으로 나타났는데,⁽¹⁰⁾ 이는 본 연구의 결과에서도 동일한 작동조건에서 소비전력의 감소로 확

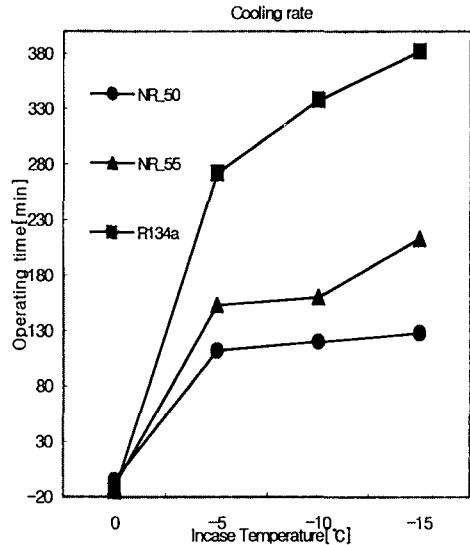


Fig. 2 Schematic of the test set-up

인되었다. 즉 냉동시스템의 모든 작동 조건이 같다면 프로판/이소부탄(R290/R600a) 혼합 냉매를 적용한 NR system 이 R-134a 를 적용한 Baseline system 보다 효율이 우수하고 열교환기를 컴팩트하게 설계할 수 있다는 장점을 가진다. 또한, 압축기 운전률을 향상시켜 에너지 소비량을 줄이는 효과를 가져온다. 소비전력 측정시 압축기 운전 횟수가 NR system 이 Baseline system 보다 소비전력 시험중인 48 시간 동안 3~4 회 더 가동되지만 압축기 1 회 운전 시간이 약 9~11 분 정도 단축되어 결과적으로 압축기 운전률을 감소시키는 결과를 가져온다. 따라서 프로판/이소부탄(R-290/R-600a) 혼합 냉매를 적용한 시스템의 냉동능력과 열전달 특성이 Baseline system 에 비해 우수하여 월간 소비전력을 약 10% 정도 절감하는 결과를 가져왔다.

4. 결론

기존 김치냉장고의 냉매로 사용되고 있는 R-314a 대체냉매로 탄화수소 계열인 프로판/이소부탄(R290/R600a, 혼합비 55:45) 혼합 냉매를 드랍-인 적용하여 시스템의 최적화, 에너지 소비 실험, 무부하 풀다운 테스트 및 냉각속도 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에서 사용한 Baseline system 의 냉매량은 100g, 모세관 길이는 3000/3000/6000mm 일

때 최적의 냉동시스템을 구성하였고, 냉동사이클의 최적화를 통해 기존 시스템의 소비전력 대비 10% 이상을 절감시켰다. NR system 은 냉매량 45~55g, 모세관 길이 3500/3500/6500mm 일 때, 최적의 냉동시스템을 구성하였다. Baseline system 대비 약 9~13% 이상의 소비전력 절감효과를 가져왔다. 이러한 결과는 프로판/이소부탄(R-290/R-600a) 혼합 냉매의 열전달 특성이 R-134a 보다 우수하기 때문이다.

(2) 풀다운 테스트 결과 NR system 이 Baseline system 대비 약 5~15% 정도의 냉각속도 향상과 냉동능력 향상으로 월간 소비전력이 감소하는 효과를 가져왔다. 또한 드랍-인 테스트를 통해 기존 시스템에서 압축기 오일의 교체만으로도 시스템의 큰 설계 변경 없이 혼합 냉매의 적용이 가능함으로 R-134a 를 대체할 수 있을 것으로 판단된다.

(3) 프로판/이소부탄(R-290/R-600a) 혼합 냉매는 R-134a 대비 열전달 특성, 냉각속도가 우수할 뿐만 아니라 단위 질량당 가격의 감소, 시스템 냉매 봉입량 감소 등으로 제품의 원가절감 효과를 기대할 수 있어 시장에서 가격 경쟁력 우위를 가져올 수 있을 것으로 기대된다.

이상에서와 같이 가정용 소형 멀티 냉동시스템인 김치냉장고에 냉매 변경에 따른 드랍-인 가능성과 냉동성능에 초점을 맞추어 냉매 변경에 따른 시스템 성능 특성 변화를 평가해 보았으며, 압축기 오일의 교체를 제외하고는 시스템의 큰 설계 변경 및 설비 투자비가 요구되지 않고 열전달 성능, 냉동성능, 압축기 운전률, 에너지 소비 효율 등이 향상되었다. 그러나 프로판/이소부탄 혼합 냉매 공급 장치를 실제로 양산 모델에 적용하기 위해서는 공장 라인에 냉매 공급장치에 대한 방폭, 안전 설비를 설치해야 할 것으로 사료된다.

참고 문헌

- (1) UNEP, 1987, Montreal Protocol on Substances That Depletes The Ozone Layer.
- (2) Jang, Y. S., 1997, "Performance and Heat Transfer Characteristics of a Heat Pump System Using Hydrocarbon Refrigerant Mixtures," Ph.D. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.
- (3) Richardson, R. N. and Butterworth, J. S., 1995, "The Performance of Propane/Isobutane Mixtures in a Vapour-Compression Refrigeration System," *Int. J. Refrigeration*, Vol. 18, No. 1, pp. 58~62.
- (4) Yoon, W. J. and Kim, W. C., 2002, "Performance Characteristics of Propane/Isobutene Mixtures in a Small Refrigeration System," *Sarek*. Vol. 14, No. 1, pp. 73~82.
- (5) Baskin, E. and Perry, R. B., 1994, "The Performance of Hydrocarbons in a Household Refrigerator/Freezer," *Proceedings of the International Refrigeration Conference at Purdue*, U.S.A, pp. 237~244.
- (6) Richardson, R. N. and Butterworth, J. S., 1995, "The Performance of Propane/Isobutane Mixtures in a Vapour-Compression Refrigeration System," *Int. J. Refrigeration*, Vol. 18, No. 1, pp. 58~62.
- (7) Jung, D. S., Kim, C. B., Song, K. H. and Park, B. J., 2000, "Testing of Propane/Isobutene Mixtures in Domestic Refrigerators," *Int. J. Refrigeration*, Vol. 23, pp. 517~527.
- (8) Didion, D. A. and Bivens, D. B., 1990, "Role of Refrigerant Mixtures as Alternatives to CFCs," *Int. J. of Refrig*, Vol. 12, pp. 163~175.
- (9) Lim, B. H., Park, Y. B., Yoo, H. K., Jung, D. S. and Park, B. J., 1995, "Performance Evaluation of Propane/Isobutene Mixtures as a Substitute for CFC12 in Domestic Refrigerators," *Sarek*, Vol. 7, No. 2, pp. 249~265.
- (10) Shin, J. Y., Kim, M. S. and Ro, S. T., 1996, "Experimental Study on Convective Boiling Heat Transfer for Pure Refrigerants and Refrigerant Mixtures in a Horizontal Tube," *Trans. of the KSME*, Vol. 20, No. 2, pp. 730~740.
- (11) Kim, M. S., Mulroy, W. J. and Didion, D. A., 1994, "Performance Evaluation of Two Azeotropic Refrigerant Mixtures of HFC-134a with R-290 and R-600a," *J. Energy Resources Technology*, Vol. 116, pp. 148~154.
- (12) Lee, M. Y., Choi, S. J. and Kim, S. O., 2003, "Evaluation on the Cyclic and Adiabatic Performance of a Small Multi-Refrigeration System," *Proceeding of the KSME, Autumn Annual Conference*, pp. 769~774.

(1) UNEP, 1987, Montreal Protocol on Substances