

증발기와 응축기 온도변화에 따른 R22 대체냉매 R290 및 R1270의 성능평가

백 인철, 박 기 정, 심 윤 보, 정 동 수*

인하대학교 대학원 기계공학과, *인하대학교 기계공학과

Performance of R290 and R1270 as Alternative Refrigerants of R22 According to Temperature Variations of Evaporator and Condenser

In-Cheol Baek, Ki-Jung Park, Yun-Bo Shim, Dongsoo Jung*

Graduate School, Inha University, Incheon 402-751, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received March 31, 2006; revision received August 5, 2006)

ABSTRACT: In this study, performance of 2 pure hydrocarbons R290 and R1270 was measured in an attempt to substitute R22 under 3 different temperature conditions. They were tested in a refrigerating bench tester with a hermetic rotary compressor. The test bench provided about 3.5kW capacity and water and water/glycol mixture were employed as the secondary heat transfer fluids. All tests were conducted under the same external conditions resulting in the average saturation temperatures of 7/45°C and -7/41°C and -21/28°C in the evaporator and condenser, respectively. Test results show that the coefficient of performance (COP) of these refrigerants is up to 11.54% higher than that of R22 in all temperature conditions. Compressor discharge temperatures were reduced by 14~31°C with these fluids. There was no problem with mineral oil since the mixtures were mainly composed of hydrocarbons. The amount of charge was reduced up to 58% as compared to R22. Overall, these fluids provide good performance with reasonable energy savings without any environmental problem and thus can be used as long term alternatives for residential air-conditioning and heat pumping application.

Key words: Alternative refrigerant(대체냉매), COP(성능계수), Evaporator(증발기), Condenser(응축기), Heat pump(열펌프), Air-conditioning(공조기), Discharge temperature(압축기 토출온도)

기 호 설 명

COP : 성능계수

GWP : 지구온난화 지수

\dot{m} : 질량유량 [g/s]

ODP : 오존층 파괴지수

P : 압력 [MPa]

Q : 냉동능력 [W]

T : 온도 [°C]

† Corresponding author

Tel.: +82-32-860-7320; fax: +82-32-868-1716

E-mail address: dsjung@inha.ac.kr

하첨자

- avg.* : 평균값
c : 응축기
dis. : 압축기 토출부분
e : 증발기
w : 2차 유체

1. 서 론

지난 반세기 동안 R22는 우수한 열역학적, 화학적 성질들과 높은 안정성 때문에 냉동공조 분야에서 널리 사용되어 왔다. 그러나 1970년대 중반에 CFC들이 대기권에서 분해되지 않고 성층권의 오존층을 파괴한다는 사실이 알려지면서 미국을 비롯한 여러 선진국들은 CFC 및 HCFC 계열의 냉매들을 대체하기 위한 노력을 하기 시작했다. 이에 선진국들은 몬트리올의정서에 의거하여 1996년 1월 1일부터 HCFC 사용량을 동결하게 되었고 2019년말까지는 전폐시키기로 합의하였다.⁽¹⁾ 또한 R22는 지구온난화의 원인이 되는 물질 중의 하나이기 때문에 최근 심각하게 문제가 되고 있는 환경문제를 해결하기 위해서는 R22의 대체 냉매 개발이 시급하다. 이에 따라 R22를 대체할 가능성이 있는 물질들에 대한 여러 연구가 이미 발표되었다.⁽²⁻⁴⁾

한편 최근에는 오존층을 파괴하지 않는 HFC 역시 지구온난화를 유발한다는 사실이 밝혀짐에 따라 교토의정서에 의거하여 HFC 사용 또한 규제토록 제안되었다.⁽⁵⁾ 따라서 많은 EU 국가들은 공기조화기와 히트펌프 등에서 HFC의 사용을 금지토록 하는 것을 고려하고 있다.⁽⁶⁾

HFC 사용규제로 인한 문제들을 해결하기 위한 방법 중의 하나는 탄화수소와 같은 자연냉매를 대신 사용하는 것이다. 많은 탄화수소들이 냉매로서 여러 가지 장점들을 갖고 있음에도 불구하고 가연성 문제 때문에 유럽을 제외한 미국 등 다른 선진국에서는 사용이 거의 무시되어 왔다. 그러나 최근에 환경보호에 대한 관심이 증대되면서 친환경적인 탄화수소 계열 냉매의 사용이 적극 검토되고 있다. 그 결과 탄화수소에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있으며, 몇몇 탄화수소 계열 냉매들이 냉동공조 분야에 적용되었다.⁽⁷⁻¹⁰⁾

현재 EU 국가들과 일본, 한국, 중국, 인도 등에

서는 탄화수소 중 하나인 R600a(Isobutane)를 가정용 냉동/냉장고에 사용하고 있고 유럽에서는 가정용 에어컨, 히트펌프, 상업용 자판기 등에 R290(Propane)과 R1270(Propylene)을 사용하고 있다. 탄화수소 계열의 냉매들은 가격이 저렴하며, 냉동장치에 쓰이는 물질들과 호환성이 좋고, 기존의 미네랄 오일을 그대로 사용할 수 있으며, 친환경적인 냉매이기 때문이다.

이에 본 연구에서는 ODP가 0이고 GWP가 3 이하인 2개의 순수 탄화수소 냉매 R290(Propane), R1270(Propylene)의 성능을 증발기와 응축기 내 냉매의 포화온도를 7°C/45°C, -7°C/41°C, -21°C/28°C로 변화시켜 가며 R22와 비교하여 대체냉매로서의 가능성을 예측해 보았다.

2. 실험장치

2.1 벤치 테스터 설계 및 제작

위의 연구목표를 달성하기 위해 본 연구에서는 냉매와 물이 대향류를 이루며 흐르면서 외부조건을 균일하게 맞추어 줄 수 있는 벤치 테스터 장비를 설계하고 제작하여 여러 가지 대체냉매의 냉동용량, 성능계수, 압축기 토출온도 등을 측정하고 비교, 분석하였다. Fig. 1은 대체 혼합냉매를 실험하기 위해 Mulroy et al.⁽¹¹⁾이 사용한 것과 비슷하게 설계한 벤치 테스터를 개략적으로 보여준다. 본 실험에서는 증기 압축식 냉동기의 중요 요소인 압축기, 응축기, 팽창밸브, 증발기를 조합하여 3~3.5 kW의 냉동용량의 벤치 테스터를 설계, 제작하였다.

본 실험에서 증발기로 사용한 열교환기는 내경 19.0 mm, 외경 25.4 mm, 길이 740 mm의 이중관 형태의 동관을 8개씩 직렬로 연결하여 만들었다. Fig. 2는 열교환기의 연결부를 자세히 보여준다. 증발기와 응축기의 총 길이는 각각 5.92 m이며 내벽면을 기준으로 한 열교환기의 면적은 각각 0.3536 m²이다. 사용된 이중관 열교환기의 내관으로 2차 유체가 흐르도록 하였으며, 냉매는 내관과 외관 사이의 환상공간으로 흐르게 하였고, 열교환을 극대화시키기 위하여 대향류가 되도록 제작하였다. 냉동사이클의 특성상 응축기 압력은 20~25기압까지 올라갈 수 있기 때문에 이 같은 고압에서도 시스템이 견딜 수 있도록 하기 위해 모든 접합부

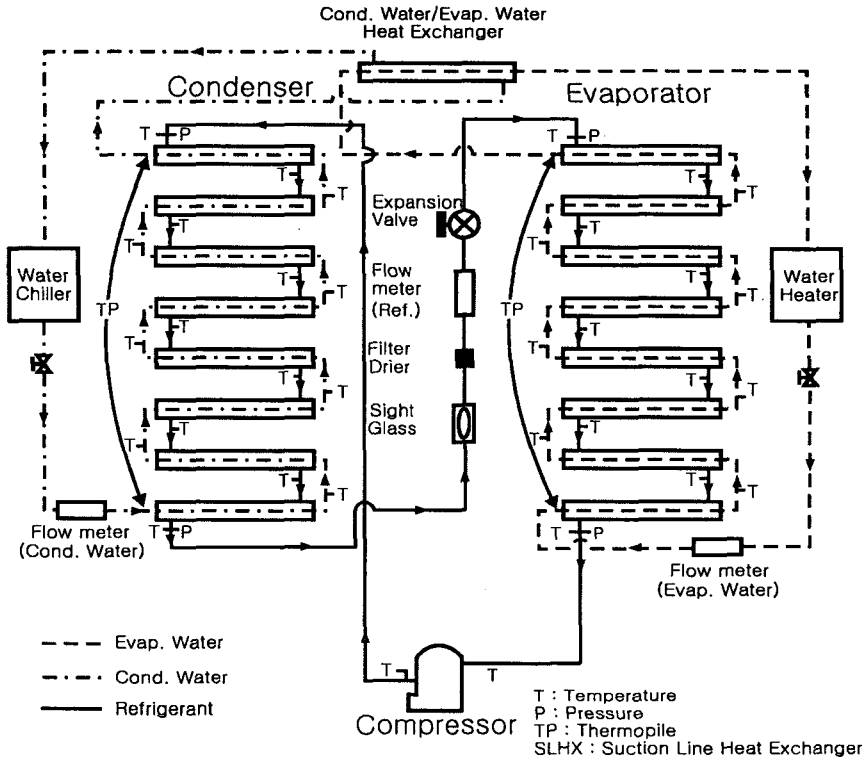


Fig. 1 Schematic diagram of the breadboard heat pump.

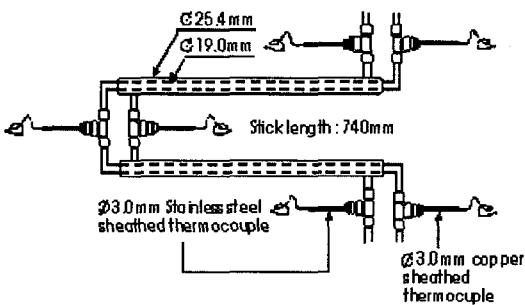


Fig. 2 Details of evaporator connection.

는 은납을 사용하여 용접하였다. 한편 응축기는 상용 열교환기인 FW 1(미국 Doucette industries 사 제작)을 사용하였다.

압축기는 흡입측에 어큐뮬레이터가 부착되어 있는 R22용으로 제작되어진 밀폐형 로타리식 압축기(QK191KAC LG 사 제작)를 사용하였으며, 이 압축기는 냉방능력이 3,928 W이다. 응축기를 통과한 냉매가 완전히 과냉되었는지 확인하기 위해 유리로 된 가시화 장치(sight glass)를 설치하였

으며 팽창밸브 전에 필터 드라이어를 설치하여 냉매 속에 있을지도 모르는 불순물이나 수분 등을 제거하였다. 그리고 미세조절이 가능한 수동식 팽창밸브를 사용하여 증발기로 들어가는 냉매의 양과 압력을 조절하였다.

증발기의 2차 유체로는 에틸렌글리콜이 질량비로 40% 혼합된 물-에틸렌글리콜 혼합물을 사용하였고, 응축기에는 물을 사용하였다. 물의 온도를 일정하게 맞추기 위해 응축기에는 칠러를 사용하였으며, 증발기에는 히터를 사용하였다. 그리고 열교환기의 물측 입구에는 필터를 설치하여 물속에 섞여 있을지도 모르는 불순물을 제거하였다. 또한 칠러와 히터의 부하를 최소화하기 위해 응축기에서 나오는 뜨거운 물과 증발기에서 나오는 차가운 물을 열교환시켜 각각의 용량을 줄였다. 본 실험에서는 열손실을 최소화하기 위해 열교환기 외벽에 3mm 두께의 스펀지 테이프를 두겹으로 감고, 그 위에 25mm 두께의 단열 폼을 덮었으며 그 뒤 열교환기 전체를 50mm 두께의 유리섬유로 덮었다.

2.2 데이터 측정

증발기 내에서 냉매 및 물의 온도를 측정하기 위해 각각 20개 이상의 T-type 열전대를 열교환기 연결 부위의 냉매 및 물이 흐르는 관 속에 삽입하였고, 모든 열전대들은 사용에 앞서 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 의 정밀온도계로 보정하였다. 응축기의 냉매와 물의 온도를 측정하기 위해서는 T-type 열전대를 열교환기 표면에 부착하였다. 증발기 및 응축기의 용량을 결정하기 위해서는 각 열교환기로 흐르는 2차 유체측의 온도차를 정확히 측정해야 한다. 2차 유체측의 온도차를 정확히 측정하기 위해 6개의 열전대를 연결하여 Thermopile을 제작하였고 이 역시 정밀온도계로 보정한 뒤 물측 입출구에 삽입하여 직접 온도차를 측정하였다. 압축기의 흡입온도와 토출온도도 측정하여 압축기의 안정성과 냉매의 혼합비에 따른 변화도 살펴보았다.

한편 증발기와 응축기의 입출구에는 모세관을 삽입하여 압력 측정포트를 만들었고 정도가 $\pm 0.1\%$ 미만인 정밀 압력 변환계를 이용하여 냉매측 압력을 측정하였다. 한편 압축기의 소요동력은 정도가 $\pm 0.5\%$ 미만인 정밀 와트미터를 이용하여 측정하였다. 냉동기의 용량을 정확히 결정하기 위해서는 증발기측 2차 유체의 질량유량을 정확하게 측정해야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 점도나 밀도 등 유체의 물성치에 영향을 받지 않고 $\pm 0.2\%$ 의 고정도를 갖는 질량유량계를 이용하여 증발기측 2차 유체의 유량을 정확하게 측정하였다. 끝으로 온도, 압력, 유량 등의 데이터는 PC와 데이터 로깅 시스템(HP3852A)을 상호 연결하여 수집하였으며, 이렇게 수집한 데이터는 PC의 하드디스크에 저장하여 추후에 데이터 해석을 위한 프로그램을 이용하여 분석하였다.

2.3 실험조건 및 방법

냉매의 성능들을 공정하게 비교하기 위해서는 실험을 동일한 조건 하에서 데이터를 취해야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 R22를 대체하기 위해 선정된 탄화수소 계열 냉매들이 냉방조건 외에 난방조건에서도 R22를 대체하는 것이 적절한지 알아보기 위해 기존의 냉방온도조건인 $7^\circ\text{C}/45^\circ\text{C}$ 와 실제로 난방조건으로 적용되고 있는 $-21^\circ\text{C}/$

Table 1 Test conditions in this study

Test condition No.	$T_{e,w}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{c,w}$ ($^\circ\text{C}$)	$\dot{m}_{e,w}$ (g/s)	$\dot{m}_{c,w}$ (g/s)
1	26	30	90	100
2	9	30.5	90	100
3	-5.6	21	90	100

28°C , 그리고 그 중간온도인 $-7^\circ\text{C}/41^\circ\text{C}$ 의 3가지 온도조건에서 R22의 성능을 테스트하였다. 그리고 R22가 이러한 3가지 온도를 나타낼 때 2차 유체의 부하조건을 R1270과 R290에 적용하여 R22와 그 성능을 비교하였다.

Table 1은 본 연구에서 적용된 2차 유체의 입구온도와 유량조건을 나타낸다. 외부유체의 입구온도와 유량을 고정하였으므로 실험냉매들의 포화온도는 열전달계수 등에 따라 조금씩 다르며 이렇게 실험데이터를 구해야 공정한 비교와 평가를 할 수 있다. 한편 본 실험에서 증발기 출구의 과열도와 응축기 출구의 과냉도를 각각 5°C 로, 그리고 그 편차는 $\pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지했다.

실험방법은 다음과 같다.

(1) 먼저 냉매 주입구와 압축기 흡입구에 진공 펌프를 연결하여 작동시키고 게이지의 압력이 더 이상 떨어지지 않는 것을 확인한 뒤 약 2시간 가량 계속해서 작동시켜 시스템의 내부를 완전히 진공(2kPa 이하)으로 만든다.

(2) 칠러와 히터를 작동시킨 상태에서 0.1g 의 정도를 지닌 전자저울로 냉매의 양을 측정해 가면서 조금씩 냉매를 주입한다.

(3) 팽창밸브를 조절하여 과열도를 5°C 로 맞추고 과냉도는 냉매를 충전량을 증가시켜서 5°C 를 유지하게 한다.

(4) 위에서 언급한 2차 유체 부하조건에 맞추어 실험을 수행한다.

(5) 시스템이 60분 이상 정상상태를 유지할 때 30초 간격으로 30분 이상 데이터를 취한다.

2.4 실험냉매 및 윤향유 선정

본 연구에서는 R22를 효과적으로 대체하고 외부유체 온도변화에 따른 성능비교를 위해 R22를 기준으로 하여 증기압이 비슷한 탄화수소계열 자연냉매인 R290(Propane)과 R1270(Propylene)의 성

능실험을 수행하였다.

압축기에 들어가는 윤활유는 냉매와 혼합되어 시스템 내부에서 순환하기 때문에 대체냉매의 성능평가시 올바른 윤활유를 선정하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 가능한 한 기존의 압축기나 윤활유를 바꾸지 않아도 되는 냉매를 선정하는데 초점을 맞추었으므로 기존에 R22 시스템에 사용되어 온 미네랄 오일을 그대로 사용했다.

3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 밀폐형 로타리식 압축기를 사용하는 수냉식 벤치 테스트에서 R22와 탄화수소 순수냉매인 R290 및 R1270의 성능을 2차 유체의

여러 가지 부하조건에 따라 측정하였다. 모든 냉매에 대해 최소한 2번씩 반복 실험을 수행해서 각각의 편차가 1% 미만인 것을 확인하여 데이터로 간주했다. Table 2는 본 연구에서 사용한 냉매들의 각종 측정지수들을 보여준다. 증발기와 응축기 내에서 냉매들의 포화온도는 냉매들의 열전달 특성이 다르므로 조금씩 차이를 보였다.

3.1 성능계수

Fig. 3은 본 연구에서 사용한 냉매들의 3가지 2차 유체 온도 및 유량 조건에서의 성능계수와 R22와 비교한 성능계수를 보여준다. 이 그림들에서 볼 수 있듯이 R290은 6.1~11.5% 정도의 성능

Table 2 Summary of test results for various refrigerants

Test condition No.	Refrigerant	COP	Diff. (%)	Q_e (W)	Diff. (%)	T_{dis} (°C)	Charge (g)
1	R22	3.41		3734		84.8	1300
	R290 (Propane)	3.80	11.54	3427	-8.22	62.3	550
	R1270 (Propylene)	3.41	0.09	3811	2.08	70.7	580
2	R22	2.42		2282		94.1	1350
	R290 (Propane)	2.57	6.13	2149	-5.83	63.2	580
	R1270 (Propylene)	2.45	1.47	2489	9.06	75.4	600
3	R22	2.05		1432		93.8	1350
	R290 (Propane)	2.28	11.11	1508	5.32	65.8	620
	R1270 (Propylene)	2.08	1.18	1591	11.10	75.2	650

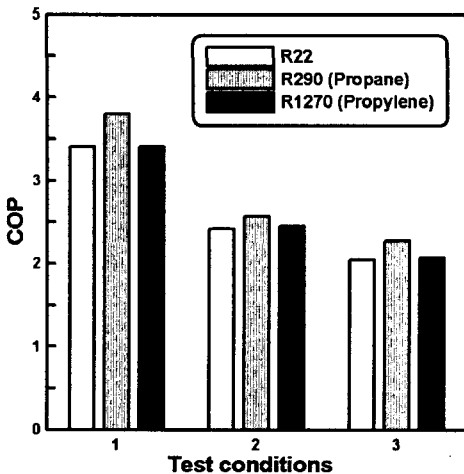


Fig. 3 COP of various refrigerants for each test condition.

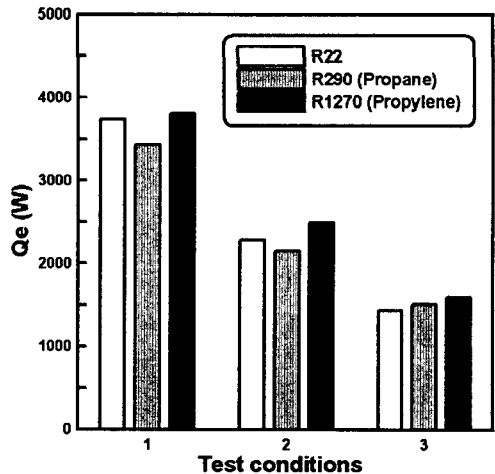


Fig. 4 Refrigerating capacity of various refrigerants for each test condition.

계수 증대를 보였다. 한편 R1270의 경우는 R22와 비교적 비슷한 성능계수를 보였다. 이는 R1270의 냉동능력이 R22보다 크지만 소요동력이 이보다 더 증가하기 때문이다.

3.2 냉동용량

냉동용량은 냉동에서 성능계수만큼 중요하게 여겨진다. 만약 대체냉매의 용량이 기준유체의 용량과 많은 차이를 보인다면, 압축기를 완전히 다르게 설계해야 하므로 설비 제조업체들의 제조비용이 증가할 것이다.

Fig. 4는 동일한 압축기를 사용하여 각각의 2차 유체 조건에서 얻은 실험냉매들의 냉동용량을 보여준다. 그림들에서 볼 수 있듯이 R290은 저온 조건인 세번째 온도조건을 제외하고 나머지 2가지 온도조건에서는 R22에 비해 5.8~8.2%까지 냉동용량이 감소하였다. R1270의 경우는 모든 온도조건에서 2.1~11.1%의 냉동용량 향상을 보였다.

이처럼 R290과 R1270이 성능계수와 냉동용량에서 서로 다른 경향을 보이고 있으므로 앞으로의 연구에서는 이들의 혼합물로 이루어진 대체냉매에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.

3.3 압축기 토출온도

대체냉매를 적용하려 할 때 시스템의 수명이나 윤활유 및 냉매의 안정성 등을 반드시 고려해야

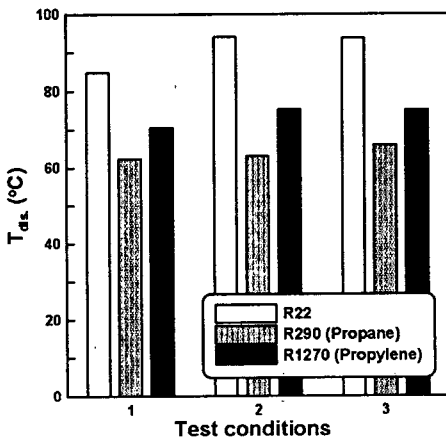


Fig. 5 Discharge temperature of various refrigerants for each test condition.

하는데 압축기의 토출온도는 간접적으로 이런 특성을 알려 주는 지표가 된다. Fig. 5는 실험에 사용된 냉매들의 3가지 온도조건에 따른 압축기 토출온도를 보여준다. 그림을 통해 알 수 있듯이 실험에 사용된 냉매들의 압축기 토출온도는 모든 온도조건에서 R22와 비교하여 14.1~30.9°C 만큼 감소하였다. 이 결과로 미루어 볼 때 실험한 냉매들은 윤활유 및 냉매의 안정성에 관해 큰 문제점이 없을 것으로 사료된다.

3.4 냉매충전량

대부분의 탄화수소는 할로카본 냉매들에 비해 액체의 밀도가 현저히 작기 때문에 충전량이 작다.⁽¹²⁾ 실제로 Table 2에서 볼 수 있듯이 실험냉매들은 냉매충전량이 55% 이상 감소하고, 지구온난화 지수가 3 이하인 탄화수소 이므로 지구온난화 문제해결에도 큰 기여를 할 것이라 판단된다. 또한 각각의 실험조건에 대하여 과냉도가 5°C로 되는 냉매의 충전량을 적정 충전량으로 결정하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 R22를 대체하기 위한 두 종류의 탄화수소 자연냉매 R290(Propane)과 R1270(Propylene)의 성능을 측정하였다. 이를 위해 밀폐형 로타리식 압축기가 장착된 수냉식 벤치 테스트를 설계·제작하였다. 그리고 기준이 되는 냉매인 R22의 증발기와 응축기 내 냉매의 포화온도가 7°C/45°C와 -7°C/41°C, 그리고 -21°C/28°C가 되는 3가지 2차 유체의 입구온도 및 유량조건 하에서 실험냉매들의 성능을 측정하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) R290은 저온조건인 세번째 온도조건에서 제외하고 나머지 2가지 온도조건에서는 R22에 비해 5.8~8.2% 냉동용량이 감소하였으나 소요동력이 현저히 작아서 성능계수는 오히려 6.1~11.5% 향상되었다.

(2) R1270은 모든 온도조건에서 R22에 비해 2.1~11.1%의 냉동용량 향상을 보였지만, 소요동력이 더 증가하여 성능계수는 비슷하거나 소폭 상승하였다.

(3) 본 연구에서 사용한 냉매들의 압축기 토출

온도는 R22에 비해 14.1~30.9℃ 정도 낮으므로 시스템의 안정성과 신뢰성에 큰 문제가 없을 것으로 사료된다.

(4) 본 연구에서 사용한 냉매들의 충전량은 탄화수소 특유의 저밀도 액체 특성에 의거하여 R22에 비해 최대 58%까지 감소되었다.

(5) 본 연구에서 사용된 냉매들은 오존층 붕괴를 일으키지 않고 지구온난화 지수가 3 이하로 친환경적이며 저온영역에서도 적용이 가능한 장기적 대체냉매라 할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국정밀화학공업진흥회의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Montreal Protocol on Substances That Deplete the Ozone Layer, 1989, Final Act, United Nations Environment Programme.
2. Jung, D., Song, Y. and Park, B., 2000, Performance of alternative refrigerant mixtures, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 23, No. 6, pp. 466-474.
3. Calm, J.M. and Domanski, P. A., 2004, R-22 replacement status, *ASHRAE Journal*, August, pp. 29-39.
4. Domanski, P. A. and Didion, D. A., 1993, Thermodynamic evaluation of R-22 alternative refrigerants and refrigerant mixtures, *ASHRAE Transactions*, Vol. 99, Part 2, pp. 636-648.
5. Global Environmental Change Report, 1997, A brief analysis of the Kyoto protocol, Vol. IX, No. 24, December.
6. Cox, N., 2004, Energy comparison of a ground source heat pump using hydrocarbon refrigerants, *Prod. of the 6th IIR Gustav Lorentzen Natural Working Fluids Conference*, Glasgow, UK.
7. Kruse, H., 1996, The state of the art of the hydrocarbon technology in household refrigeration, *Proc. of the Int. Conferences on Ozone Protection Technologies*, Washington, DC, pp. 179-188.
8. Jung, D., Song, Y. and Park, B., 2000, Testing of propane/isobutane mixture in domestic refrigerators, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 23, No. 7, pp. 517-527.
9. Granryd, E., 2001, Hydrocarbons as refrigerants-an overview, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 24, pp. 15-24.
10. Primal, WDF., Palm, B. and Lundqvist, P., 2004, Propane heat pump with low refrigerant charge: Design and laboratory tests, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 27, No. 7, pp. 761-773.
11. Mulroy, W., Kauffeld, M., McLinden, M. O., and Didion, D. A., 1988, Experimental evaluation of two refrigerant mixtures in a bread-board air conditioner, *Proc. of Int. Inst. Refrigeration, Purdue Conference on CFCs, Commissions B1, B2, E1 & E2*, pp. 27-34.
12. Maclaine-cross, I.L. and Leonardi, E., 1997, Why hydrocarbons save energy?, *Australian AIRAH Journal*, Vol. 51, pp. 33-37.