

R22 대체냉매의 성능 평가

Performance evaluation of R22 alternative refrigerants

송 용 재*, 박 봉 진*, 정 동 수**, 김 종 보**
Y. J. Song, B. J. Park, D. S. Jung, C. B. Kim

Key words : R22(냉매22), Refrigerant mixtures(혼합냉매), Energy efficiency(에너지 효율), Heat pump(열펌프), Air-conditioners(공조기)

Abstract

In this study, 14 refrigerant mixtures composed of R32, R125, R134a, R143a, R152a, and R1270(Propylene) were tested in a breadboard heat pump in an attempt to replace R22 used in most of the residential air conditioners and heat pumps. The heat pump was of 1 ton capacity and water was employed as the secondary heat transfer fluids. All tests were conducted under ARI test A condition. Ternary mixtures composed of R32, R125, and R134a were shown to have 4~5% higher COP and capacity than R22 and hence they seem to be very promising candidates to replace R22. On the other hand, ternary mixtures containing R125, R134a, and R152a have lower COP and capacity than R22. R32/R134a binary mixtures show a 7% increase in COP and have the similar capacity to that of R22 and hence they are also good candidates to replace R22. Special care must be exercised when a suction line heat exchanger is used with these mixtures in air conditioners. Finally, the compressor discharge temperatures of all mixtures tested were lower than those of R22 by 15.9~34.7°C, which indicates that these mixtures would offer better system reliability and longer life time than R22.

1. 서 론

지금까지 냉동 및 공조 설비에서 매우 중요하게 사용해온 CFC들이 오존층 붕괴의 주원인으로 밝혀짐에 따라, 몬트리얼 의정서 하에서 선진국의 경우에는 1996년 1월 1일부터 이들을 전면 폐기하게

되었고, 개발도상국의 경우에는 10년의 유예 기간을 갖고 점진적으로 전면 폐기하게 되었다.⁽¹⁾ 이같은 CFC 전폐로 인해 발생한 공백을 메우기 위해 지난 몇 년간 냉동/공조 산업계는 주로 오존층 붕괴 능력이 매우 낮거나 붕괴 능력이 없는 단일 성분 냉매들을 개발하는데 초점을 맞추어 연구 및 개발을 수행해왔다. 그 결과 저압 및 중압용 설비에 쓰이던 CFC11 및 CFC12 등을 대체 할 수 있는 HCFC123과 HFC134a 등의 대체냉매들이 등

* 인하대학교 대학원

** 정회원, 인하대학교 기계공학과

장하게 되었고, 이들은 그 증기압 및 성능 등이 기존의 CFC들과 비슷해 여러 종류의 설비에 적용되어 각광을 받게 되었다. 한편 이들에 비해 상대적으로 높은 증기압을 갖고 있는 HCFC22와 CFC502 냉매의 경우에도 순수한 대체냉매를 찾아보려는 노력이 있었으나, 암모니아, HFC134a, 프로판 등 현재 시중에서 구할 수 있는 냉매들의 성능이나 특성에 각각 나름대로의 심각한 문제가 있어 몇몇 예외적인 경우를 제외하고는 이들을 사용할 수 없다는 결론을 얻게 되었다.^(2,3) 이같은 문제에 직면하게된 냉동/공조 산업계는 HCFC22나 CFC502와 비슷한 성능을 내는 작동유체를 공급한다는 목표 하에 단기적으로는 HCFC 계통의 혼합냉매들을 사용하고 장기적으로는 HFC계통의 혼합냉매들과 자연냉매를 이용한 혼합냉매들을 사용하려는 노력을 기울여 왔다.^(3~7)

한편 현존하는 장비를 개조하는 경우에는, 무엇보다도 대체냉매가 기존냉매와 비슷한 냉동용량을 내는 것이 중요하다. 냉동용량은 압축기로 흡입되는 냉매의 밀도에 좌우되며 밀도는 증기압과 직접적으로 연관되어 있으므로, 혼합냉매를 사용할 경우에는 동일한 증발 온도에서 기존의 냉매가 내던 포화압력과 유사한 값을 내도록 그 성분비를 조절해야만 한다. 그러나 이렇게 성분비를 조절하다보면 대체 혼합냉매의 효율이 기존 냉매의 효율보다 훨씬 낮게 될지도 모른다. 특히 혼합냉매의 구성 성분으로 R32, R142b, R143a, R152a, R290 (Propane), R1270(Propylene), R600a(Isobutane) 등의 가연성 냉매를 사용할 경우에는 시스템에서 누출이 생김으로 인해 발생하는 “분리 현상”(fractionation) 하에서도 혼합냉매 전체가 가연성을 띠지 않도록 그 양을 제한해야만 한다.⁽³⁾ 이같은 제약 조건으로 인해 혼합냉매를 개발하고 실제 시스템에 적용하는 데에는 많은 연구와 노력이 필요하다.

HCFC22는 지난 반세기 동안 공조기에서 거의 독점적으로 사용되어 왔으며 시장 규모 역시 모든 냉매 중에서 가장 크다. 비록 HCFC22의 오존분피지수가 CFC11이나 CFC12와 비교해 볼 때 그리 높은 편은 아니지만 그 안에 여전히 오존을 분피시키는 염소를 포함하고 있으므로, 전세계는

HCFC22의 우수한 특성에도 불구하고 이를 계속해서 장기적으로 사용할 수는 없다는데 동의하게 되었다. 이에 몬트리얼 의정서에 의거하여 선진국들은 이미 1996년 1월 1일부터 HCFC 사용량을 동결하게 되었고 2019년 말까지는 전폐시키기로 합의하였다. 한편 HCFC22의 지구 온난화 지수가 이산화탄소보다 약 1500배정도 높기 때문에 HCFC22를 계속해서 사용한다면 지구온난화가 야기될 소지가 매우 크다는 우려도 있다.⁽⁸⁾ 따라서 급증하는 환경 및 에너지 문제를 해결하기 위해서는 적절한 HCFC22 대체냉매를 개발해야만 한다.

지난 5년간 공조산업계는 HCFC22를 대체할 수 있는 물질에 대한 연구를 진행해 왔고, 새로운 상업용 기기의 경우에는 HFC134a가 HCFC22를 대체할 수 있는 강력한 후보로 떠오르고 있다. 반면에 상업용과 가정용 공조기의 경우에는 미국냉동공조학회(ASHRAE)에서 공식적으로 R410A로 명명한 혼합냉매(50% HFC32/50% HFC125, Allied Signal사의 AZ20)와 R-407C로 명명한 혼합냉매(23% HFC32/25% HFC125/52% HFC134a Du Pont사의 AC9000)가 시장에 나와 있다.⁽³⁾

거의 공비혼합매체인 R410A는 전통적인 냉매 충전방법을 적용할 수 있을 뿐만 아니라 장비의 소형화에 대한 잠재성과 시스템 효율이 향상될 가능성을 지니고 있어 매우 매력적이다. 그러나 이 냉매의 증기압은 HCFC22의 증기압보다 무려 60% 정도 높기 때문에 설비 제조업체들은 압축기의 재설계(소형화)와 관벽의 두께 강화, 강인한 용접을 위한 고압 용기의 사용 등으로 인한 제조비용의 증가와 체적용량의 증대로 인한 제조비용의 감소가 어떻게 경제적으로 서로 상쇄될 수 있는가를 연구하여 이 대체냉매의 사용을 결정해야만 한다. R410A의 등엔트로피 효율은 HCFC22에 비해 상대적으로 낮은 것으로 알려져 있지만 마찰의 감소 및 밀도의 증가로 인한 압력 손실의 감소가 등엔트로피 효율의 감소를 상쇄시킬 수 있으므로, 이 냉매를 사용하는 시스템의 효율은 HCFC22보다 클 것으로 전문가들은 추측하고 있다.^(3,9)

반면에 R407C는 6°C 정도의 온도구배를 지닌 비공비 혼합매체로서 HCFC22와 비슷한 증기압을 내며, 따라서 별도로 현행 장비를 크게 수정하지

않고서도 이를 적용할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 그러나 비공비 혼합냉매이므로 시스템에 누설이 있는 경우에는 분리 현상이 발생하여 냉매를 보충하는데 문제가 있고, 또한 질량전달저항으로 인해 열전달 계수가 감소하므로 열교환기의 성능저하가 우려된다. 그러나 '대항류'나 '직교류-대항류' 형태로 열교환기를 수정하여 온도구배현상을 이용하게 되면 열효율의 증대가 이루어질 수 있으므로, 이미 공조기 제조업체들이 열교환기의 형상 및 유로 개선에 대한 연구를 시작했다. 현재 관련 업체는 R410A를 장기적 대체냉매로 보고 있고, R407C를 중단기적 대체냉매 및 현존하는 시스템을 개조하는데 사용할 수 있는 냉매로 보고 있다.^(3,9)

한편 혼합냉매를 구성하는 순수냉매들이 복잡한 분자구조를 지니고 있다는 사실은 혼합매체의 비열이 기존의 HCFC22보다 크며 따라서 흡입관 열교환기(suction line heat exchanger, SLHX)를 사용하여 어느 정도 효율을 증가시킬 수 있음을 시사한다.⁽⁹⁾

현 시점에서는 HCFC22를 대체할 수 있는 뚜

렷한 냉매가 부각되지 않은 상태이고, 세계 각국이 시장을 점유하기 위해 독자적으로 대체냉매를 개발하기 위해 노력하고 있다. 국내에서는 한두 업체만이 HFC 계열의 냉매를 제조할 수 있는 기술을 갖고 있으며, 시스템을 크게 바꾸지 않고 HCFC 22를 대체할 수 있는 혼합냉매를 개발하기 위해 노력하고 있다. 본 연구에서는 현재 가정용 공조기에서 가장 많이 쓰이고 있는 HCFC22를 대체할 수 있는 HFC계열의 혼합냉매의 특성을 살펴보고자 한다. 특히 기존의 시스템을 크게 수정하지 않고도 적용할 수 있는 'Drop-in 대체냉매'의 성능을 측정하여 비교하려 한다.

2. 실험장치

2.1 열펌프 설계 및 제작

위의 연구 목표를 달성하기 위해 본 연구에서는 냉매와 물이 대항류를 이루고 흐르며 압축기 등을 원하는 대로 쉽게 바꿀 수 있는 가변형 열펌프를 설계하고 제작하여 여러 가지 대체냉매의 성능을 측정하려 한다. 또한 흡입관 열교환기도 설치하여

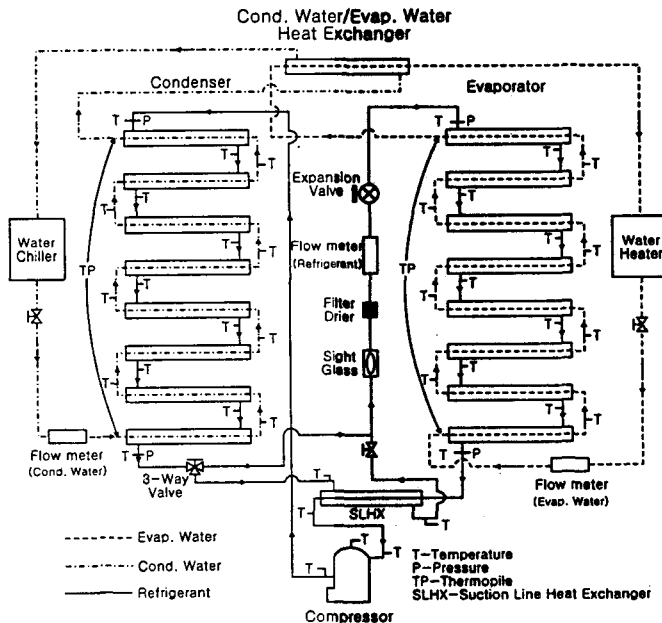


Fig.1 Schematic diagram of the breadboard heat pump

이것을 사용하였을 때와 사용하지 않았을 때의 성능도 비교하려하며, 시스템의 안정성에 영향을 주는 압축기 토출온도와 압축기 돔의 온도도 비교 분석하려한다.

Fig.1은 HCFC22 대체 혼합냉매의 성능을 측정하기 위한 열펌프를 개략적으로 보여준다. 본 연구에서는 압축기, 응축기, 팽창밸브, 증발기 등을 조합하여 약 3.5kW(1 냉동톤)의 용량을 낼 수 있는 열펌프를 설계, 제작하였다. 본 실험에서 증발기와 응축기로 사용한 열교환기는 내경 19.01mm, 외경 25.4mm, 길이 740mm의 이중관 형태의 동관을 8개씩 직렬로 연결하여 만들었다. Fig.2는 동관 연결 부위를 상세히 보여준다. 증발기와 응축기의 총 길이는 각각 5.92m이며 내벽면을 기준으로 한 열교환기의 면적은 각각 0.3536m²이다. 이중관 열교환기의 내관으로는 2차유체가 흐르도록 하였으며, 냉매는 내관과 외관 사이의 환상공간으로 흐르게 하였다. 한편 혼합매체의 특성을 살리기 위해 열교환기의 형태는 대향류가 되도록 하였다.

본 실험 장치의 압축기로는 압축기 전문회사가 R22용으로 제작한 밀폐형 왕복동식 압축기를 사용하였으며, 증발기로 들어가는 냉매의 양과 압력을 조절하기 위해 미세조절이 가능한 수동식 팽창밸브를 사용하였다. 또한 증발기 출구의 차가운 냉매와 응축기 출구의 뜨거운 냉매를 서로 열교환 시켜주는 흡입관 열교환기의 효과를 살펴보기 위해 내경 12.8mm, 외경 22.8mm, 길이 530mm의 이중관 형태의 동관을 흡입관 열교환기로 사용하였다. 흡입관 열교환기를 사용하는 경우와 사용하지 않는 경우를 다 고려하기 위해 3방향 볼 밸브를 이용해

응축기에서 나온 냉매의 순환 방향을 결정했고, 이로써 흡입관 열교환기내로 냉매가 통과하는지 여부를 결정하였다.

응축기를 통과한 냉매가 완전히 과냉 되었는지 확인하기 위해 유리로 된 가시화 장치를 설치하였다. 또한 팽창밸브 전에 필터 드라이어를 설치하여 냉매 속에 있을지도 모르는 불순물이나 수분등을 제거하였다. 혼합냉매를 충전할 때는 분리 현상을 방지하기 위해 냉매를 액상으로 충전해야 하며 이를 위해 압축기 입구뿐만이 아니라 증발기 입구에도 냉매 주입구를 만들었다. 냉동 사이클의 특성상 응축기 압력은 20~25기압까지 올라갈 수 있기 때문에 이같은 고압에서도 시스템이 견딜 수 있도록 하기 위해 모든 접합부는 은납을 사용하여 용접하였다.

한편 2차유체로는 증발기 및 응축기 쪽 모두 물을 사용하였고, 물의 온도를 일정하게 맞추기 위해 응축기에는 칠러를 사용하였으며, 증발기에는 히터를 사용하였다. 그리고 열교환기의 물 측 입구에는 필터를 설치하여 물 속에 섞여 있을지도 모르는 불순물을 제거하였다. 또한 칠러와 히터의 부하를 최소화하기 위해 응축기에서 나오는 뜨거운 물과 증발기에서 나오는 차가운 물을 열교환 시켜 각각의 용량을 줄였다. 본 실험에서는 열손실을 최소화하기 위해 열교환기 외벽에 3mm 두께의 스펀지 테이프를 두 겹으로 감고, 그 위에 25mm 두께의 단열 폼을 덮었으며 그 뒤 열교환기 전체를 50mm 두께의 유리섬유로 덮었다.

2.2 데이터 측정

증발기 및 응축기 내에서 냉매 및 물의 온도를 측정하기 위해 각각 20개 이상의 T-type 열전대를 열교환기 연결 부위의 냉매 및 물의 흐르는 관 속에 삽입하였고, 모든 열전대는 사용에 앞서 정도 0.01℃의 정밀 온도계로 보정했다. 증발기의 용량을 결정하기 위해서는 증발기로 흐르는 2차유체의 유량 및 온도차를 정확히 측정해야한다. 2차유체 측의 온도차를 정확히 측정하기 위해 6개의 열전대를 연결하여 Thermopile을 제작했고 이 역시 정밀 온도계로 보정한 뒤 물 측 입출구에 삽입하여 직접 온도차를 측정하였다. 흡입관 열교환기의

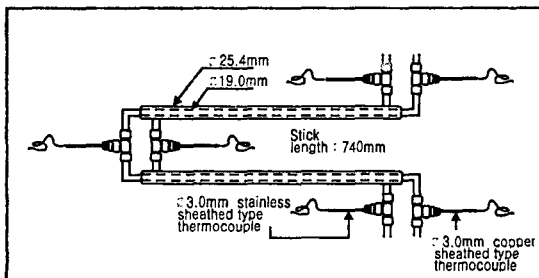


Fig.2 Details of the evaporator and condenser connection

효과를 올바르게 판단하기 위해 흡입관 열교환기를 통과하는 냉매의 온도를 측정했으며, 압축기의 흡입온도와 토출온도도 측정하여 압축기의 안정성이나 냉매의 혼합비에 따른 변화도 살펴보았다. 끝으로 에폭시를 이용하여 열전대를 압축기 뚜껑에 부착시킨 뒤 두께가 3mm인 단열재를 그 위에 붙여 외부환경의 영향을 크게 받지 않도록 한 뒤 냉매에 따른 압축기 뚜껑의 온도 변화도 살펴보았다.

한편 증발기와 응축기의 입출구에는 모세관을 삽입하여 압력 측정포트를 만들었고, 정도가 0.1% FS 미만인 정밀 압력 변환계를 이용하여 냉매 측 압력을 측정하였다. 한편 압축기의 소요동력은 정도가 0.1% 미만인 정밀 디지털 파워 미터를 이용하여 측정하였다. 열펌프의 용량을 정확히 결정하기 위해서는 증발기 측 2차유체의 질량유량을 정확하게 측정해야 하며 냉매 측 및 2차유체 측의 에너지 균형이 맞는 가를 살펴보기 위해서는 냉매 측의 유량을 측정해야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 Coriolis force를 이용하여 점도나 밀도 등 유체의 물성치에 영향을 받지 않으므로 0.2%의 고정도를 갖는 질량 유량계를 이용하여 증발기 측 2차유체의 유량과 시스템 내부를 순환하는 냉매의 유량을 정확하게 측정하였다.

온도, 압력, 유량 등의 데이터는 PC와 HP3852 Data Logger를 상호 연결하여 15-30초 간격으로 수집하였으며, 이렇게 수집한 데이터는 PC의 하드 디스크에 저장하여 추후에 데이터 해석을 위한 프로그램을 이용하여 분석할 수 있게 했다.

2.3 실험 조건 및 방법

냉매의 성능을 공정하게 비교하기 위해서는 올바른 실험조건하에서 데이터를 취해야한다. 이를 위해 본 연구에서는 미국 공기조화냉동협회(ARI)의 “공조기 및 열펌프의 냉방 실험조건 A” 하에서 모든 실험을 진행했다.⁽¹⁰⁾ 이 조건하에서 증발기 측 물의 입출구 온도는 26.7℃와 14.4℃로 고정했고, 응축기 측 물의 입출구 온도는 35℃와 43.2℃로 고정했다. 실제로 응축기 출구에서의 물의 온도는 냉매에 따라 조금씩 변하지만(0.3℃미만), 본 실험에서는 가능한 한 일정하게 유지하려고 했다. 또한 모든 실험에서 증발기 출구의 과열도와 응축

기 출구의 과냉도를 각각 5℃로, 그리고 그 편차는 $\pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지했다. 본 조건의 특징은 2차유체의 온도가 고정되어 있으므로 냉매의 열전달 계수의 증감 등으로 인한 성능의 변화를 올바르게 반영한다는 점이다.

실험 방법은 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 진공으로 만든다.

(2) 칠러와 히터를 작동시킨 상태에서 0.1g의 정도를 지닌 전자 저울로 냉매의 양을 측정해가면서 조금씩 냉매를 주입한다. 순수냉매의 경우에는 기체상태로 압축기 흡입부로 충전하고, 혼합냉매의 경우에 이미 제조사에서 혼합시켜 용기에 담겨 있을 때는 증발기 입구에서 액체로 충전하며, 본 연구에서 고안한 혼합냉매를 적용 할 때는 증기압이 낮은 순수냉매부터 증기압의 순서대로 압축기 입구에서 충전하여 원하는 조성비가 되도록 한다.

(3) 팽창밸브를 조절하여 과열도와 과냉도를 맞추어가면서 위에서 언급한 실험 조건에 맞추어 실험을 수행한다.

(4) 시스템이 60분 이상 정상상태에 다다르면 30초 간격으로 30분 이상 데이터를 취한다.

2.4 대체냉매 및 유효유 선정

지구 온난화의 원인이며 오존층을 파괴시키는 HCFC22를 효과적으로 대체하기 위해서는 염소를 포함하지 않는 HFC냉매를 사용하거나 자연냉매를 사용해야만 한다. 이를 위해 본 연구에서는 HFC32, HFC125, HFC134a, HFC143a, HFC152a, R1270 (Propylene) 등의 순수냉매를 사용하여 ‘Drop-in 대체’가 가능한 혼합냉매를 만들었다. 실험에 앞서 혼합냉매의 조성비를 정확하게 정하기 위해 미국 표준 연구소에서 개발한 혼합냉매의 물성치 계산 프로그램인 REFPROP⁽¹¹⁾을 이용하여 먼저 공조기 사이클 프로그램을 만들었고, 이를 바탕으로 다양한 혼합냉매의 성능을 예측했다.^(4,12) 이같은 이론 해석을 통해 냉매의 조성을 결정한 뒤 이들을 실험했으며, 그 외에도 이미 시중에 나와있는 냉매와

Table 1 Refrigerants tested in this study

Ref. Number	Refrigerants	Temp. Glide(°C)
1	R22	0.00
2	23%R32/25%R125/52%R134a (R407C, Du Pont사의 AC9000)	6.64
3	26%R32/14%R125/60%R134a	6.87
4	26%R32/20%R125/54%R134a	6.74
5	50%R125/30%R134a/20%R152a	4.64
6	70%R125/10%R134a/20%R152a	4.85
7	75%R125/5%R134a/20%R152a	4.77
8	25%R32/71.5%R134a/3.5%R152a	10.91
9	26%R32/60%R134a/14%R152a	6.19
10	30%R125/60%R134a/10%R1270	6.08
11	33%R125/55%R134a/12%R1270	5.82
12	43.6%R125/45.9%R134a/10.5%R1270	5.40
13	30%R32/70%R134a	6.93
14	26%R32/74%R134a	6.77
15	45%R290/55%R134a	0.00

의 성능을 비교하기 위해 HFC계열의 3원 혼합냉매인 R407C(Du Pont사의 AC9000)도 실험하였다. Table 1은 본 연구에서 실험한 냉매들을 보여준다. 순수냉매로는 기준이 되는 R22만을 실험했고, 11개의 3원 혼합냉매와 3개의 2원 혼합냉매의 성능을 측정했다.

압축기에 들어가는 윤활유는 냉매와 혼합되어 시스템 내부에서 순환하기 때문에 올바른 윤활유의 선정도 중요하다. 지난 몇 년 동안 HFC134a에 대한 연구가 많이 진행되어 왔고, 이로 인해 HFC냉매와 호환성이 좋은 합성 기름이 개발되었다. 본 실험에서는 HCFC22의 경우에 기존의 팜유(SUNISO-3GS)를 사용하였으며, HFC를 함유한 혼합냉매의 경우에는 같은 점도의 폴리올 에스터 윤활유(Mobil Arctic32 synthetic refrigeration oil EALth)를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 가변형 열펌프를 이용하여 Table

Table 2 Test results for various refrigerants

Ref. Number	Use of SLHX	COP	Qe(W)	dis. Temp(°C)
1	No	2.435	3,526	112.2
	Yes	2.482	3,553	117.0
2	N	2.456	3,801	92.7
	Y	2.493	3,760	99.1
3	N	2.544	3,659	93.3
	Y	2.569	3,605	100.3
4	N	2.509	3,709	92.5
	Y	2.566	3,770	97.9
5	N	2.417	2,841	82.1
	Y	2.410	2,837	87.9
6	N	2.391	3,167	81.0
	Y	2.481	3,214	88.0
7	N	2.339	3,261	80.0
	Y	2.430	3,291	87.0
8	N	2.605	3,326	94.3
	Y	2.639	3,300	98.7
9	N	2.618	3,385	95.9
	Y	2.660	3,398	102.0
10	N	2.450	3,466	82.0
	Y	2.514	3,480	87.0
11	N	2.429	3,594	80.1
	Y	2.481	3,604	87.8
12	N	2.348	3,602	80.0
	Y	2.425	3,703	87.0
13	N	2.609	3,626	96.0
	Y	2.620	3,569	104.0
14	N	2.613	3,492	96.3
	Y	2.610	3,397	103.1
15	N	2.521	3,715	76.0
	Y	2.615	3,841	84.0

1에 있는 15가지 냉매의 성능을 측정했다. 특히 냉매 측 및 2차유체 측의 에너지 균형이 3~4% 안에서 서로 일치하도록 시스템을 보완한 상태에서 모든 데이터를 취했다. 또한 각 냉매에 대해서 2번씩 반복해서 동일한 실험을 수행했으며 그 편차가 1%미만일 때에만 적합한 데이터로 간주했다.

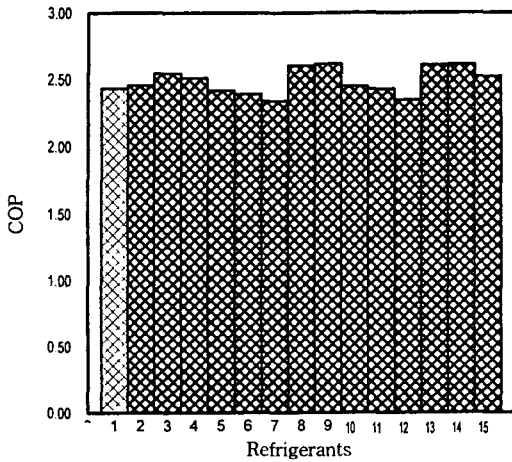


Fig. 3 COP of various refrigerants

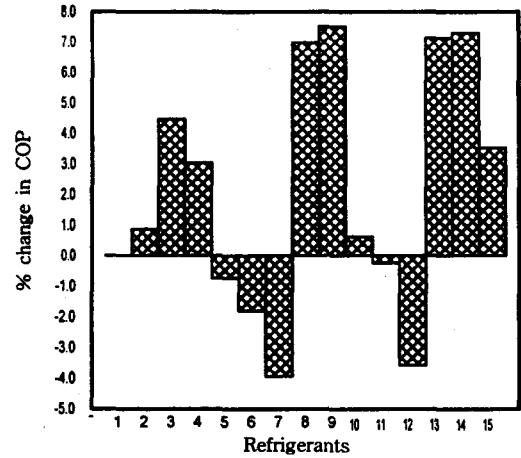


Fig. 4 Change in COP of various refrigerants as compared to R22

Table 2는 이렇게 측정한 여러 가지 냉매의 냉동용량, 성능계수, 그리고 압축기 토출온도 등을 보여준다.

Table 2의 2, 3, 4번 냉매는 기본적으로 R32, R125, R134a로 구성된 3원 혼합냉매이다. Fig. 3 및 Fig. 4에서 볼 수 있듯이, 이렇게 구성된 3원 혼합냉매의 성능계수는 기존의 R22보다 4.5% 정도까지 좋은 것으로 나타났으며, 조성을 조금 조정하여 R32 및 R134a를 늘리고 R125를 줄인 3원 혼합냉매는 R22에 비해 약 4.5% 정도 증대된 성능계수를 보였다. R125는 지구 온난화 지수가 높기 때문에 가능한 한 그 양을 줄이는 것이 좋으며, 이런 차원에서도 3번의 26% R32/14% R125/60% R134a 혼합냉매는 기존의 R407C보다 더 좋은 냉매라 할 수 있다. 이같은 사실은 Sawada가 미국 냉동공조협회의 "R22 AREP"에서 발표한 결과와 거의 유사하며, 그는 25% R32/15% R125/60% R134a 혼합냉매가 기존의 R407C보다 성능계수면에서 3% 정도 높음을 실험으로 증명하였다.⁽¹³⁾

한편 5, 6, 7번 냉매는 R125, R152a, R134a로 구성된 3원 혼합냉매이다. 이렇게 구성된 혼합냉매의 성능계수는 R22에 비해 4.0%까지 떨어지는 것으로 평가되었다. 특히 R125의 조성비가 크면 클수록 성능계수의 감소가 더 컸는데, 그 이유는 순수한 R125의 성능계수가 다른 순수냉매의 성능계

수보다 떨어지기 때문이다. R125는 다른 냉매에 비해 비열이 훨씬 크기 때문에 증발기로 들어가는 냉매의 건도가 클 수밖에 없으며 따라서 단위 질량당 냉동효과가 떨어져 결과적으로 성능계수가 감소한다.⁽¹⁴⁾

8번 및 9번 냉매는 R32, R152a, R134a로 구성된 3원 혼합냉매로, 성능이 떨어지는 R125 대신에 가연성은 있으나 성능이 좋은 R32를 사용한다는 특징을 갖고 있다. 예상한대로, 이렇게 혼합된 3원 혼합냉매의 성능계수는 R22에 비해 무려 7% 정도나 증가한다. 그러나 R32와 R152a가 둘 다 가연성 냉매이므로 사용하기에 앞서 이 냉매가 이 조성에서 가연성을 띠게 되는지 또한 누설이 있을 경우에 시스템 내부에 있는 전체 혼합냉매가 가연성을 띠게 될 것인지 조사해 보아야만 한다.

10, 11, 12번 냉매는 R125, R134a, R1270으로 구성된 3원 냉매로 그 성능계수는 R22 보다 떨어지며, 특히 R125의 조성비가 크면 클수록 성능계수가 저하되어 R125가 전체의 40% 이상이 되면 성능계수가 약 4% 정도까지 저하되는 것으로 드러났다. 한편 13, 14번 냉매는 R32와 R134a로 구성된 2원 혼합냉매로 그 성능이 매우 좋아 R22에 비해 무려 7.0% 이상 성능계수가 증가하는 것으로 밝혀졌다. 30% R32/70% R134a 냉매는 가연성 여부를 놓고 미국과 일본의 기업들이 논쟁을 벌인

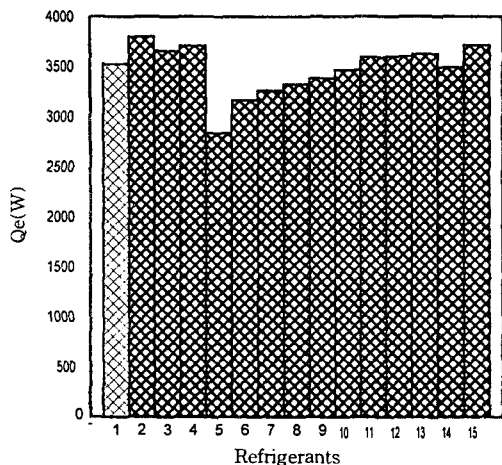


Fig.5 Refrigeration capacities of various refrigerants

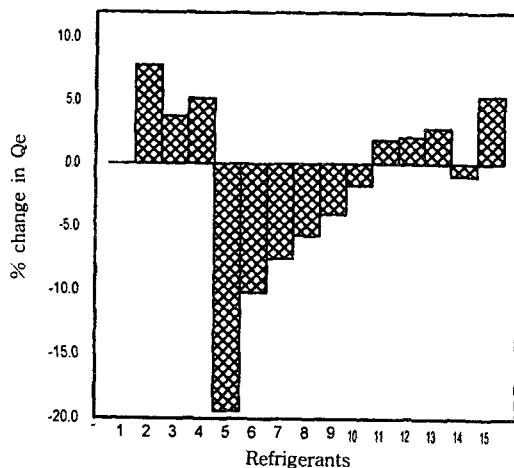


Fig.6 Change in capacity of various refrigerants as compared to R22

바 있는 냉매로, 가연성을 줄이기 위해 R32의 조성비를 조금 줄여 14번 냉매처럼 26% R32/74% R134a로 만들면 성능계수의 저하 없이도 가연성 문제를 해결할 수 있을 것으로 판단된다. 혼합냉매는 그 구성성분이 많을수록 다루기가 힘들므로 R32/R134a로 구성된 2원 혼합냉매는 냉매 취급 면에서도 다른 3원 냉매보다 장점을 지니고 있다고 할 수 있다. 끝으로 15번 냉매는 R290과 R134a를 혼합한 2원 공비혼합냉매로 그 성능계수는 R22보다 3.5% 정도 높은 것으로 나타났다. 이 냉매의 경우 성능계수도 좋고 공비매체이므로 취급도 용이할 것으로 판단되지만 R290의 가연성이 매우 크기 때문에 전체 혼합냉매도 가연성을 E1f 것이고 따라서 사용 및 취급시 세심한 주의를 기울여야 할 것으로 판단된다.

냉동에서 성능계수에 버금가는 중요한 인자는 냉동능력이다. 아무리 성능계수가 좋다 하더라도 냉매의 냉동능력이 너무 크거나 너무 작으면 필연적으로 압축기를 재설계 해야한다. 따라서 시스템의 큰 변경 없이 대체냉매를 사용하려면(즉 'Drop-in 대체'), 대체냉매의 성능계수뿐만 아니라 냉동능력이 기존의 냉매의 냉동능력과 비슷하거나 조금 큰 것이 좋다. Fig.6은 동일한 압축기를 사용하여 얻은 각 냉매의 냉동능력과 R22를 기준으로 한 냉동능력의 변화를 보여준다. R32, R125, R134a

로 구성된 3원 혼합냉매(2, 3, 4번)의 냉동능력은 R22에 비해 평균적으로 5% 정도 높은 것으로 드러났으며, 따라서 이들은 성능계수 및 냉동능력 면에서 모두 R22를 능가하므로 'Drop-in 대체냉매'로 매우 적합하다고 판단된다.

한편 R125, R152a, R134a로 구성된 3원 혼합냉매(5, 6, 7번)의 냉동능력은 모두 R22보다 떨어지며, 특히 5번 냉매처럼 R125의 조성비가 50%일 때는 냉동능력이 무려 20% 정도나 감소한다. 이것을 막기 위해 R125의 조성비를 늘이면 성능계수가 감소하므로, 이 3원 혼합냉매는 R22를 대체할 수 없을 것으로 판단된다. 반면에 R32, R134a, R152a로 구성된 3원 혼합냉매(8, 9번)의 냉동능력은 R22에 비해 평균적으로 5% 정도 떨어지는 것으로 나타났다. 이 냉매의 성능계수가 R22에 비해 7% 정도 높지만 냉동능력은 조금 부족하므로 R22를 대체할 수 있는 최적의 혼합냉매라 할 수는 없을 것이다. 이를 극복하기 위해서는 압축기 크기를 조금만 늘이면 될 것으로 판단된다. 한편 R125, R134a, R1270으로 구성된 3원 혼합냉매(10, 11, 12번)는 거의 R22와 비슷한 냉동능력을 지니고 있는 것으로 밝혀졌다. 그러나 이들의 성능계수가 R22보다 조금 떨어지므로 이들도 R22에 대한 최적의 대체냉매라 할 수는 없을 것이다.

한편 R32/R134a 2원 혼합냉매(13, 14번)의 냉

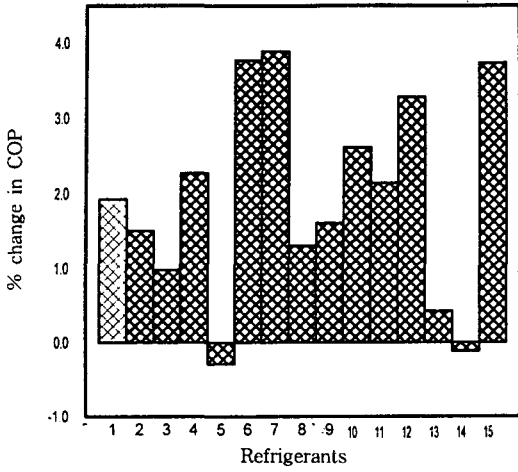


Fig.7 Change in COP when SLHX is used

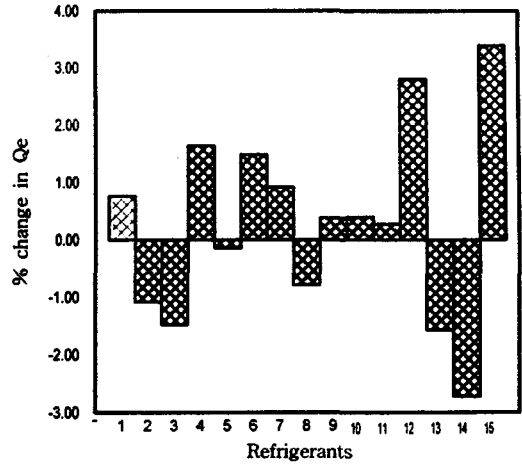


Fig.8 Change in capacity when SLHX is used

동능력은 R22와 대등하며, 이들의 성능계수가 R22보다 7% 정도 높으므로 이들 역시 성공적으로 R22를 대체할 수 있는 냉매라고 결론지을 수 있다. 끝으로 R290/R134a 2원 혼합냉매 역시 냉동능력이 R22에 비해 5% 정도 높은 것으로 나타나, 가연성을 띠는 점을 제외하고는 R22를 적절히 대체할 수 있는 좋은 냉매라 할 수 있다.

Fig.7과 Fig.8은 흡입관 열교환기(SLHX)를 사용하지 않았을 때를 기준으로 하여 SLHX를 사용하였을 때의 성능계수와 냉동능력의 변화를 각 냉매에 대해 살펴본 것이다. SLHX를 사용하게 되면 대부분의 냉매의 경우 성능계수가 조금씩 증가하며 최대 3.9%정도까지 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 R125의 조성비가 큰 냉매일수록 SLHX의 효과가 큰 것으로 드러났는데, 그 이유는 R125의 비열이 크기 때문으로 추정된다. 한편 흡입관 열교환기를 사용하게 되면 냉동용량은 늘어나는 것도 있고 줄어드는 것도 있었다. 성능계수의 경우와 마찬가지로, R125의 조성비가 큰 냉매는 SLHX의 사용으로 인해 용량 면에서 긍정적인 효과를 보게 되지만, R32/R134a 2원 혼합냉매는 오히려 부정적인 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서 흡입관 열교환기의 사용할 때 얻게 되는 효과는 냉매마다 다르므로 사용에 앞서 반드시 성능을 점검해야만 한다.

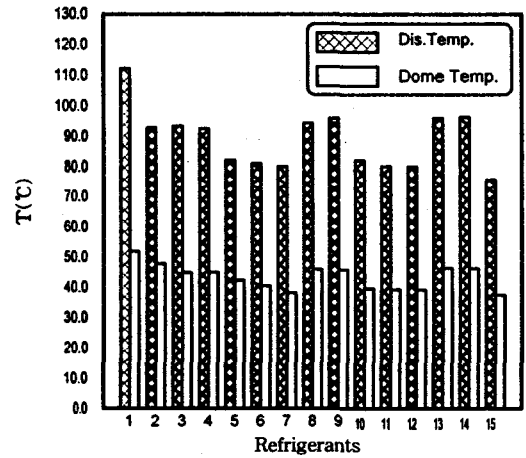


Fig.9 Discharge and dome temperatures of various refrigerants

대체냉매를 적용할 때는 시스템의 수명이나 윤활유 및 냉매의 안정성 등도 고려해야하며, 압축기 토출온도 및 뚜껑온도를 측정 비교함으로써 간접적으로나마 이런 특성들을 판단해 볼 수 있다. 본 연구에서는 이 온도들을 측정할 때 주변환경의 변화로 인한 오차를 줄이기 위해 두께 3mm의 단열재로 온도측정부위를 감쌌기 때문에 온도편차는 3°C 미만으로 확인되었다. Fig.9는 각 냉매의 압축기 토출온도와 뚜껑온도를 보여준다. 이 그림을 통해

알 수 있듯이 본 연구에서 사용한 HFC 및 자연 냉매를 혼합한 냉매들의 압축기 토출온도와 뚜껑의 온도는 R22에 비해 각각 15.9~34.7°C, 5.5~14.3°C 정도 감소한 것으로 나타났다. 이 결과로 미루어 볼 때 이 혼합냉매들은 모두다 시스템의 수명이나 윤활유 및 냉매의 안정성에 관한 한 문제가 없을 것으로 판단된다. 한편 흡입관 열교환기를 사용하게 되면 압축기 토출온도는 4.4~8.3°C, 압축기 뚜껑의 온도는 4.8~8.6°C 정도 상승하지만, 여전히 흡입관 열교환기를 사용하지 않았을 때의 R22의 온도보다 낮게 때문에 이 경우에도 시스템의 안정성에 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 R22를 대체할 수 있는 혼합냉매를 선정하여 그 성능을 측정했다. 이를 위해 가변형 수냉식 열펌프를 제작했으며, 미국냉동공조협회의 고온냉방 실험기준 하에서 총 15가지 냉매의 성능을 측정하고 그 특성을 분석했고 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

1) R32, R125, R134a로 구성된 3원 혼합냉매의 성능계수 및 냉동능력은 R22 보다 4~5% 정도 높은 것으로 드러났으며, 특히 R32와 R134a의 조성비를 조금 늘인 26% R32/14% R125/60% R134a는 이미 시장에 나와있는 R407C 보다도 성능이 좋은 것으로 나타났다.

2) R125, R134a, R152a로 구성된 3원 혼합냉매의 성능계수 및 냉동능력은 R22에 비해 모두 떨어지는 것으로 나타났으며, 성능계수를 증대시키기 위해 조성을 변화시키면 냉동능력이 감소하고, 냉동능력을 증대시키기 위해 조성을 변화시키면 성능계수가 감소하는 것으로 나타나 이 계열의 혼합냉매들이 R22의 대체물로는 적합하지 않음을 알 수 있었다.

3) R32, R134a, R152a로 구성된 3원 혼합냉매의 성능계수는 R22보다 7% 정도 높으나, 냉동능력은 5% 정도 낮은 것으로 나타났으며, 따라서 R22를 대체하기 위해서는 압축기를 조금 크게 만들어야 함을 알 수 있었다.

4) R32와 R134a로 구성된 2원 혼합냉매의 성능계수는 R22보다 7% 정도 높으며 냉동 능력은 동일한 것으로 평가되었다. 취급이나 사용 면에서 3원 혼합냉매보다 덜 복잡하므로 이 냉매는 R22를 효과적으로 대체할 수 있는 좋은 냉매라 할 수 있을 것이다.

5) 흡입관 열교환기를 사용하면 모든 냉매의 성능계수가 최대 3.9%까지 증가하지만 냉동능력의 경우에는 3%까지 감소하는 냉매도 있으므로, 그 사용에 신중을 기해야 할 것이다.

후 기

본 연구는 (주)한국 신화의 연구비로 수행되었으며, 이에 감사를 드린다. 또한 여러 모로 지원을 해준 인하대학교 및 대학원에 감사를 드린다.

참 고 문 헌

1. Montreal Protocol on Substances That Deplete the Ozone Layer, 1987, Final Act, United Nations Environmental Programme.
2. McLinden, M. O. and Didion, D. A., 1987, "Quest for alternatives", ASHRAE Journal, December, pp. 32~42.
3. ARI, 1992~1997, "R22 and R502 alternative refrigerants program", US Air-conditioning and Refrigeration Institute.
4. Radermacher, R. and Jung, D. S., 1993, "Theoretical analysis of replacement refrigerants for R22 for residential uses", ASHRAE Trans., Vol. 99, Part1, pp. 333~343.
5. Didion, D. A., and Bivens, D.B., 1990, "Role of refrigerant mixtures as alternatives to CFCs", Int. J. Refrigeration, Vol. B, pp. 163~175.
6. 김만희, 1995, "Performance evaluation of HFC refrigerants in heat exchanger and heat pumps", ASHRAE Trans., Vol. 100, Part 2, pp. 566~572.

7. 박동민, 정동수, 김종보, 강득주, 1997, "R-502 대체 혼합냉매의 성능에 관한 실험적 연구", 공기조화 냉동공학 논문집 제9권 제2호, pp. 198~209.
8. CFC Focus, 1998, 한국정밀화학공업진흥회, 3월호
9. Didion, D., 1994, Private Communication, US National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
10. ARI Standard for Unitary Air-conditioning and Air-source Heat Pump Equipment, 1989, ANSI/ARI210/240-89.
11. NIST, 1994, REFPROP, Version 4.0, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
12. 유환규, 정동수, 1995, "가정용 냉방기의 대체 냉매 성능분석을 위한 전산해석 연구", 한국태양 에너지학회 논문집 Vol. 15, No. 3, pp. 75~90.
13. Sawada, N., 1997, "Joint evaluation of R32/125/134a for packaged heat pumps", AREP Technical Committee Meeting Book, US Air-conditioning and Refrigeration Institute.
14. Threlkeld, J.S., 1970, "Thermal environmental engineering", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.