

탄화수소계 냉매를 이용한 수냉식 히트펌프의 성능특성에 관한 연구

전철호, 이호생, 한인근*, 김재돌**, 윤정인***
부경대학교 대학원, (주)에이알*, 동명대학**, 부경대학교***

Study on Performance Characteristic of Water-Cooled Type Heat Pump Using Hydrocarbon Refrigerants

Jun Chul Ho, Lee Ho Saeng, Han In Geon*, Kim Jae Dol**, Yoon Jung In***
Pukyong N.U. Graduate School, AR corp.*, Tongmyong College**, Pukyong N.U.***

1. 서론

국내 산업의 발달과 국민의 생활 수준이 향상됨에 따라 냉동공조 산업은 국내 시장규모가 2002년도에 약 7조 6,651억원, 건물설치비까지 포함하면 총 시장규모는 12조 이상이며 특히, 수출 전략적 산업으로 2002년의 경우 총생산의 47.2%가 수출되고 있고 매년 그 비중이 더 커지고 있는 5대 산업의 하나로 성장했다. 전 세계 냉동공조산업은 크게 미주, 유럽, 아시아 시장으로 구분되고 있으며, 현재 전체시장은 약 1,000억불 정도로 추산되고 있다. 이 냉동공조장치에 널리 쓰이고 있는 CFC계 냉매나 HCFC계 냉매는 몬트리올 의정서에 의한 오존층 파괴물질의 규제선언 이후 점차 HFC계열의 냉매나 혼합냉매로 대체되어 가고 있다.⁽¹⁾

그러나 HFC계 냉매의 경우 오존층 파괴지수(ODP)가 0이지만 지구 온난화지수(GWP)가 높고 화학적 합성물로 자연에는 여전히 이물질이며, 대기권에서 태양광선에 의해 분해되어 산과 독성 물질을 형성하는 것으로 보고되고 있다.⁽²⁾ 또한 혼합냉매는 본질적으로 다루기 어렵고 누설로 인한 성분비 변동과 재충전시 초기 성분비 재현이 힘들다는 어려움이 있기에 사용이 바람직하지 않다. 1994년 기후변화방지협약에 따라 HFC계 냉매 역시 단계적 감량 또는 사용금지 대상이 되어지고 있어 새로운 대체냉매의 개발이 시급해졌다. 따라서 새로이 개발되는 대체 냉매는 지구 환경을 파괴하지 않으면서, 독성이 없고,^(3,4) 가연성이 없으며, 기존의 냉매와 열역학적 성질이 비슷해야 한다. 이러한 관점에서 자연냉매 사용 필요성이 대두되고 있다. 이런 자연냉매로는 암모니아(NH₃), 탄화수소계(프로판, 부탄 등), 이산화탄소(CO₂), 질소(N₂), 헬륨(He), 물(H₂O), 공기 등이 있다. 특히 이들 중 탄화수소계 냉매는 사용이 간편하며, 기존의 냉동장치에서의 윤활유와 잘 혼합하는 등의 장점이 있어 (H)CFC계 대체냉매에 가장 적합한 자연냉매로 평가받고 있지만 가연성의 문제로 유럽을 제외한 미국 및 일본 등 다른 선진국에서는 주목을 받지 못했다.

그러나 James의 보고서에 의하면 가정용 냉장고와 같은 소형냉동장치에서는 기존의 냉동기들이 밀폐식 압축기를 채용하고 있으므로 누설의 가능성이 적고, 기존 냉매에 비해 큰 비체적을 가지고 있어, 일반적인 CFC계 냉매의 절반 정도이므로 가연성에 의한 폭발의 위험은 거의 없는 것으로 밝혀졌다.^(5,6) 대형 장치에도 적절한 환기 시스템 도입과 누설 감지기 등의 간단한 안전장치로 해결할 수 있는 것으로 보고되고 있다. 유럽에서는 Hydrocarbon을 이용한 고효율 및 안정성을 갖춘 설치사례를 발표하였으며 특히 히트펌프 장비의 많은 부분을 탄화수소계 냉매로 신속히 전환하고 있어 히트펌프 시스템에 대한 가장 큰 변화로 평가되고 있다. 이와 같이 지구 환경 문제를 유발하지 않을 뿐 아니라, 시스템의 효율도 향상시켜야 하는 2중의 목적을 달성하고 기존의 냉매를 사용하던 냉동공조기와 동일한 용량과 효율을 얻기 위해서는 시스템의 최적화를 위한 재설계와 실험이 필요할 뿐 아니라 기존시스템에서의 사용에 대한 연구도 병행되어야 한다. 이에 본 연구에서는 작동유체로 규제냉매인 R-22로 하는 열펌프 장치를 제작하여 대체냉매인 R-290(propane), R-600a(iso-butane),

R-1270(propylene)를 작동유체로 변화시켜 R-22와 탄화수소 냉매의 시스템 성능 특성을 비교·분석하여 탄화수소계 냉매를 대체냉매로 사용하는 열펌프 시스템 설계를 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 이 론(실험 및 방법)

2-1. 실험장치

실험 장치는 물을 열원으로 사용하는 증기 압축식 열펌프 사이클의 기본적인 구성 요소로 제작하였고, Fig. 1에 실험 장치의 실제 사진과 개략도를 나타내었다. 실험장치는 냉매가 순환되는 경로와 응축기 및 증발기를 위한 이차유체인 물이 순환되는 경로로 구성되어 있다.

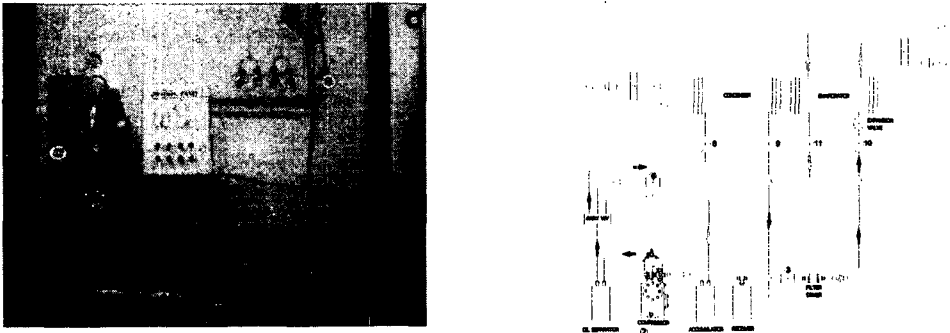


Fig. 1 Photograph and schematic diagram of experimental apparatus

압축기는 BOCK사 R-22용 2기통 개방형 압축기로 정격 운전 모터를 사용하여 구동시켰으며, 파워미터(Power meter)를 설치하여 압축기 축동력을 측정하였다. 냉매의 원활한 흐름을 위해 유분리기와 수액기, 필터 드라이어, 온도식 자동팽창밸브, 액분리기를 각각 설치하여 실험을 수행하였다. 또한, ABB사 냉매질량유량계를 설치하여 운전시 냉매 유량을 측정하였으며 측정된 데이터는 데이터 로그(Yokogawa사)를 통하여 PC에서 처리하도록 하였다.

냉매는 압축기, 유분리기, 4-way 밸브, 응축기, 수액기, 냉매 질량유량계, 드라이어, 팽창 밸브, 증발기, 액분리기, 압축기의 순으로 순환된다. 또, 응축기와 증발기에서의 이차유체는 각각 열원수 공급 장치, 수펌프, 수유량계, 응축기와 증발기의 순으로 순환된다.

열전대는 냉매 및 이차유체 온도를 측정하기 위해 각각 $\varnothing 0.3$ Sheath형 T-type과 정밀수는 온도계로 보정하여 $\pm 0.2\%$ 의 오차 범위를 가지는 $\varnothing 0.1$ T형(Thermocouple)으로 압축기, 응축기, 증발기 및 각 주요 기기 입·출구에 삽입하여 데이터 로거와 연결하였고, 각 부위의 누설 여부를 확인하기 위해 질소가스를 주입하여 압력을 가한 후 확인하였으며, 냉매 충전을 위해 먼저 진공펌프를 이용해 진공작업을 수행하였다. 진공작업이 완료된 후에는 히트펌프 특성 및 성능평가를 위한 냉매를 충전하였으며, 냉매는 먼저 기존 냉매인 R-22를 충전하여 실험한 다음에 탄화수소계 냉매를 동일조건으로 충전하여 비교실험을 수행할 수 있도록 하였다.

2-2. 실험방법

탄화수소계 냉매용 히트펌프의 특성 및 성능평가를 위한 연구에서는 작동 유체로 기존 냉매인 R-22를 충전하여 먼저 실험을 수행한 후, 탄화수소계 냉매인 R-290과 R-600a 및 R-1270을 동일조건에서 수행한다. 실험은 먼저 장치를 가동한 후 냉매의 포화 압력과 포화 온도를 관찰하면서 30분 이상 평형 상태로 유지되는 정상 상태가 되었을 때 필요한 데이터

(온도, 유량, 압력 등)를 취득한다. 이를 위하여 응축온도 및 증발 온도를 일정하게 유지시키면서 기타 변수 조건을 변화시키면서 실험한다. 여기서 실험 변수인 이차유체측 유량과 온도를 변화시켰으며, 측정된 데이터는 압축기, 응축기, 증발기 입·출구 냉매 온도 및 압력과 이차유체인 물의 온도, 그리고 냉매와 이차유체의 유량, 압축기의 입력 전력과 전압 등을 측정한다. 압력의 측정에는 정밀 부르돈관식 압력계를 사용하였다. 이와 같이 측정된 모든 데이터는 측정점에서의 출력 신호를 콘트롤 유니트와 데이터 변환기로 입력되어 데이터 처리 장치를 통해 컴퓨터로 저장될 수 있도록 하였다.

실험 데이터는 실험조건을 조절하여 시스템이 30분 이상 정상상태가 유지된 후에 측정을 하였고, 실험 데이터 측정이 완료되면 다시 조건을 변화시켜 반복실험을 수행하였다. 위에서 언급한 주요 실험 조건을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Experimental conditions

Working fluid	
R-22, R-290, R-600a, R-1270	
Chilled water	
Temperature [K]	288~298
Mass flow rate [kg/h]	600~900
Cooling water	
Temperature [K]	298~308
Mass flow rate [kg/h]	840~1080

2-3. 데이터분석

본 연구에서 작동유체로 사용되는 R-22와 대체 냉매인 R-290, R-600a, R-1270의 열물성 값 계산은 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 개발한 냉매 물성 계산 프로그램인 REFPROP(Ver. 6.0)를 이용하였으며 시스템 성능 특성을 파악하기 위한 실험 데이터의 분석에 사용된 계산식은 다음과 같다.

냉동시스템의 성능을 파악하기 위해서는 압축기 소요동력, 응축기에서의 열방출량, 증발기에서의 열유입량을 측정하여야 한다. 먼저, 열교환기인 응축기의 열방출량 Q_c 는 식 (1)로 계산하였다.

$$Q_c = m_c \cdot c_{p,c} \cdot \int_{T_{c,out}}^{T_{c,in}} dt \quad (1)$$

여기서, m_c 는 응축기측 열원수의 유량이며, $T_{c,in}$ 과 $T_{c,out}$ 는 각각 응축기측 열원수의 입구와 출구 온도를 나타낸 것이며, $c_{p,c}$ 는 응축기측 열원수의 비열을 나타낸다.

증발기에서의 열유입량 Q_e 는 응축기에서의 동일한 방법으로 식 (2)와 같이 계산하였다.

$$Q_e = m_e \cdot c_{p,e} \cdot \int_{T_{e,out}}^{T_{e,in}} dt \quad (2)$$

여기서, m_e 는 증발기측 열원수의 유량이며, $T_{e,in}$ 과 $T_{e,out}$ 는 각각 증발기측 열원수의 입구와 출구 온도를 나타낸 것이며, $c_{p,e}$ 는 증발기측 열원수의 비열을 나타낸다.

위와 같은 계산식을 바탕으로 시스템의 성능을 나타내는 중요한 지표인 성능계수는 냉방일 때와 난방일 때를 각각 식 (3), (4)에 나타내었고, 압축비는 식 (5)와 같이 계산하였다.

$$COP_{cooling\ mode} = \frac{Q_e}{W} \quad (3)$$

$$COP_{\text{heating mode}} = \frac{Q_c}{W} \quad (4)$$

$$PR = \frac{P_c}{P_e} \quad (5)$$

여기서, Q_c 와 Q_e 는 각각 식 (1)과 (2)에서 구해진 값이고, W 는 압축기 축동력을 나타내고, P_c 와 P_e 는 각각 응축압력과 증발압력을 나타낸다.

3. 실험(결과 및 고찰)

Fig 2는 시스템의 열평형을 검토하기 위하여 증발기 열유입량 Q_e 와 압축기 축동력을 합한 값과 응축기에서의 열방출량 Q_c 를 비교하여 나타낸 것이다. 가로축은 식 (2)에서 열원수유량과 입·출구 온도차로 계산한 열용량 Q_e 와 압축기 축동력 W 의 합이고, 세로축은 식 (1)에서 계산한 열용량 Q_c 이다. 그림에서 기호 Δ , \circ , \square , \diamond 은 각각 R-22, R-290, R-600a, R-1270을 나타낸다. 그림에서의 오차범위는 냉매의 종류나 열원수유량 및 온도변화에 관계없이 $\pm 20\%$ 내외에서 거의 일치하여 장치의 열평형은 비교적 우수한 것으로 판단된다.

Fig. 3은 증발온도의 변화에 의한 R-22, R-290, R-600a 및 R-1270 압축기 축동력의 변화를 나타낸 것이다. 압축 일량은 증발온도가 증가할수록 증가하는 경향을 보이며, 탄화수소계 냉매가 R-22에 비해 비슷하거나 다소 높게 나타났다. 이와 같은 차이는 R-22용 압축기를 사용함으로써 열물성값의 차이로 인한 영향이라 판단된다. 따라서, 대체 냉매를 사용할 때에

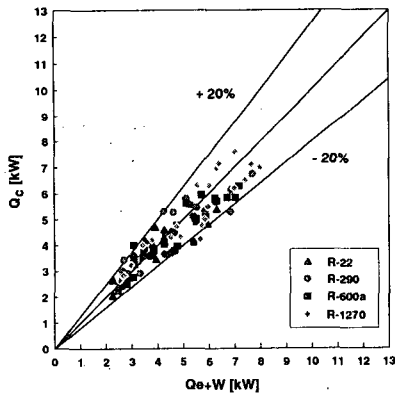


Fig. 2 Heat balance in the heat pump

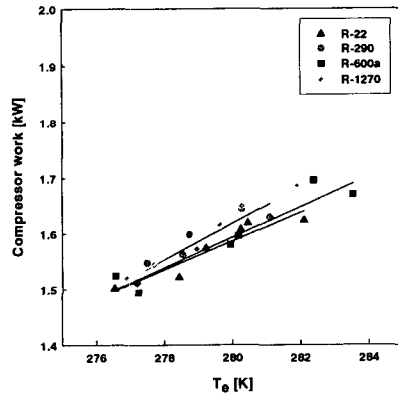


Fig. 3 Compressor shaft power

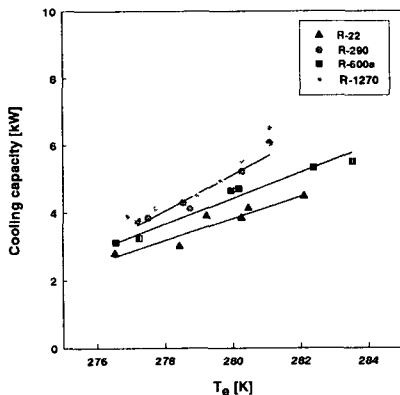


Fig. 4 The cooling capacity

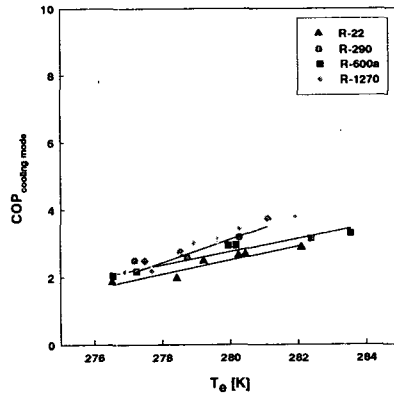


Fig. 5 The coefficient of performance

는 그 냉매의 성질에 알맞은 특성을 가진 압축기를 사용해야 최적의 성능을 낼 수 있을 것이라 사료된다.

Fig. 4는 냉방능력의 변화를 각 냉매별 증발온도에 따라 나타내었다. 그림과 같이 냉방능력은 증발온도가 증가함에 따라 증가하였으며, 증발온도에 따른 냉방능력은 탄화수소계 냉매가 R-22에 비해 큰 증가폭을 보였다.

Fig. 5는 냉방시의 성능계수의 변화를 각 냉매별 증발온도에 따라 나타내었다. 성능계수는 증발온도가 증가할수록 선형적으로 증가하였으며, R-1270이 가장 높은 것으로 나타났다. 따라서 냉방시 성능계수의 측면에서 살펴본다면 탄화수소계 냉매는 R-22의 대체냉매로 충분하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 각 냉매의 증발온도에 따른 장치의 난방능력의 변화를 나타낸 결과이다. 난방능력 역시 냉매의 증발온도가 증가함에 따라 증가하였고, 난방능력과 마찬가지로 탄화수소계 냉매가 R-22 냉매에 비해 전반적으로 높게 나타났다. 탄화수소계 냉매에 중에서는 R-1270의 난방능력이 가장 높았다.

Fig. 7은 난방시 증발온도에 따른 성능계수를 나타낸 결과이다. 그림에서와 같이 증발온도가 증가할수록 선형적으로 증가하였으며 탄화수소계 냉매들에 있어서는 증발온도가 높아질수록 R-1270이 가장 높은 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 R-1270냉매의 열물성값에 기인하는 결과로 판단된다.

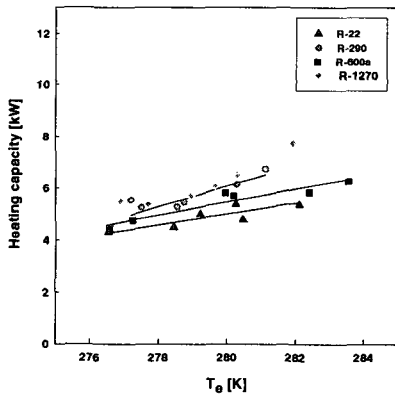


Fig. 6 The heating capacity

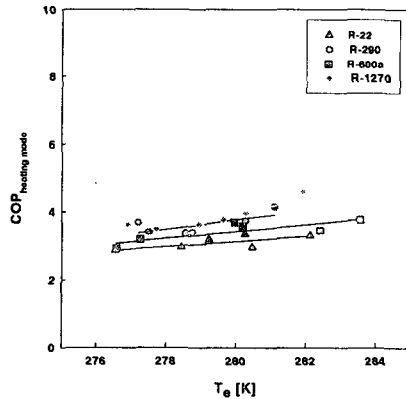


Fig. 7 The coefficient of performance (Heat pump)

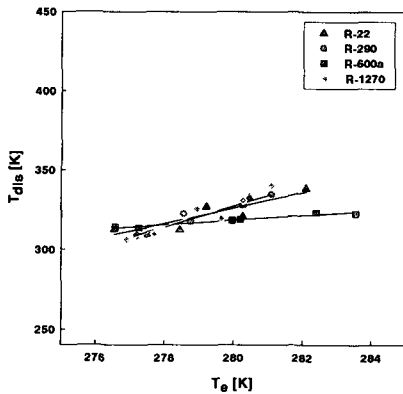


Fig. 8 The discharged temperature

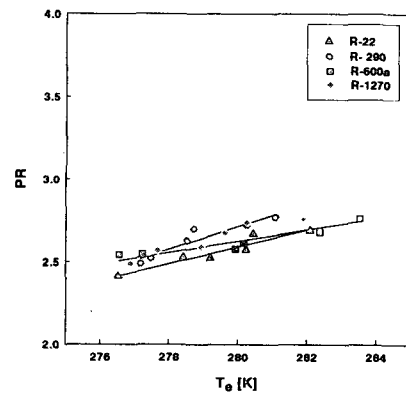


Fig. 9 The pressure ratio

Fig. 8은 각 냉매에 대한 압축기 토출가스 온도를 증발온도 변화에 따라 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 압축기 토출가스 온도는 증발온도가 증가할수록 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있으나, 냉매간 토출가스 온도차이는 그렇게 크지 않는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 냉매의 비열비와 같은 물성값에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 각 냉매 압축비의 변화를 증발온도에 따라 나타낸 결과이다. 그림에서와 같이 증발온도가 증가할수록 압축비는 거의 일정하거나 미세 증가하는 경향을 나타내었으며, R-600a는 R-22와 거의 비슷한 값을 나타내었고, R-290과 R-1270은 약간 높게 나타나 탄화수소계 냉매를 사용해도 압축기 사용에 무리가 없는 것으로 판단된다.

4. 결론

지구 환경 파괴로 인해 규제되고 있는 R-22와 대체 냉매로 기대되는 탄화수소계 자연냉매인 R-290, R-600a 및 R-1270을 이용하여 시스템 성능·특성에 대하여 규명하고자 하였다. 본 장치 특성 실험을 수행한 결과는 다음과 같다.

1. 열평형을 검토한 결과 냉매의 종류에 관계없이 대체적으로 20%정도 내외로 거의 일치하여 비교적 열평형의 우수함을 확인 할 수 있었다.
2. 압축일량은 증발온도가 증가할수록 점차 선형적으로 증가하며 냉매 물성치의 영향으로 탄화수소계 냉매가 R-22보다 크게 나타남을 알 수 있었다.
3. 냉방능력 및 난방능력은 증발온도가 증가함에 따라 상승하며 냉방능력의 경우 탄화수소계 냉매가 R-22 냉매에 비해 약 14.6%정도 높게 나타났다. 난방능력은 R-290과 R-600a가 각각 R-22 냉매에 비해 약 14.5%, 10.4%정도 높게 나타났고, 특히 R-1270은 고질량 유속일때 다른 탄화수소계 냉매보다 높게 나타났다.
4. 성능계수는 난방과 냉방 모두 증발온도가 증가할수록 증가하는 경향을 보이며, 탄화수소계 냉매가 기존의 R-22냉매보다 냉방의 경우 약 12.7%정도 높게 나타났고 난방의 경우는 약 10%정도 높은 값을 나타내었다. 이들 탄화수소계 냉매 중 R-1270이 가장 높은 것으로 나타났다.
5. 위 결과를 통하여 탄화수소계 냉매는 기존의 R-22에 대해 Drop-in 대체냉매로 사용이 충분히 가능할 것이라 사료된다.

5. 감사의 글

본 논문은 에너지 관리공단 2002년 에너지 절약 과제에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

6. 참고문헌

1. Didion, D.A. and Bivens,D.B.: "Role of Refrigerant Mixture as Alternatives to CFCs", International Journal of Refrigeration, Vol. 13, 163-175 (1990).
2. Ebner,T.and Halozan,H.: "testing the Aviable Alternative An Examination of R-134a, R-152a and R-290", IEA HPC Newsletter, Vol. 12, No.1 (1994).
3. Molina, M.J. and Rowland, F.s.: "Stratospheric SinK for Clorofluoromethanes : Chlorine Atom Catalyzed Destruction of Ozone", Nature. Vol. 249, 810-814 (1974).
4. 산업자원부: "자연 냉매를 적용한 냉동·공조 시스템 기술 개발에 관한 분석" 58-69 (2000).
5. Kruse, H.: "European Research and Development Concerning CFC and HFC Substitution", ASHRAE/NIST Refrigerants Conference, 41-54 (1992).
6. James,R.W. and Missenden, J.F.: "The Use of Propane in Domestic Refrigerators", International Journal of Refrigeration, Vol. 15, No. 2 95-100 (1992).