

탄화수소계 냉동공조 시스템의 성능특성에 관한 실험

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

Performance Characteristics of Refrigeration and Air Conditioning System Using Hydrocarbon Refrigerants

K. T. Lee, H. S. Lee, D. A. Cha, J. D. Kim*, I. G. Han and J. I. Yoon
Pukyong N. U. Graduate School, Tong Myong College*, AR Co., Ltd**, Pukyong N. U.

1. 서 론

빠른 산업의 발달과 사람들의 생활 수준이 향상에 따라 냉동 공조 산업은 점차 성장하여 일상 생활에 많은 부분을 차지하고 있으나 오존층 파괴와 지구 온난화라는 환경문제와 에너지 절약이라는 문제 등으로 인해 새로운 대체 냉매 개발과 에너지 소비를 줄일 수 있는 고성능 열 펌프 기기의 개발에 많은 개발이 필요하게 되었다.⁽¹⁾⁽²⁾

현재 사용되고 있는 HCFC와 CFC는 환경 오염을 유발하기에 1992년 몬트리얼 의정서에 따라 사용량을 점차적으로 줄이고 2003년 사용 금지되었다. 그로 인하여 현재까지는 CFC계의 대체 냉매로 비공비 혼합냉매⁽³⁾와 HFC계 냉매가 권장되고 있으나 HFC계열의 냉매는 ODP(Ozone Depletion Potential)가 0이기는 하나 지구 온난화에 영향을 미치고 누설로 인한 성분비 변동과 재충전시 초기 성분비 재현이 힘들다는 어려움이 있기에 사용이 바람직하지 않다. 따라서 새로이 개발되는 대체 냉매는 지구 환경을 파괴하지 않으면서 독성이 없고, 가연성이 없으며, 기존의 냉매와 열역학적 성질이 비슷해야 하며 기존의 냉매를 사용하는 냉동·공조 장치와 비교하여 에너지 효율이 비슷하거나 더 높은 수준을 유지하여야 한다.

이러한 관점에서 지구 환경에 좋지 않은 영향을 미치는 인공 화합물인 프레온계 냉매 대신에 ODP와 GWP(Global Warming Potential) 거의 0인 자연 냉매의 물성치 및 이들 자연 냉매를 사용하는 시스템에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 이산화탄소(CO₂), 암모니아(NH₃), 탄화수소계, 질소(N₂), 물(H₂O), 공기등의 자연 냉매 중 값이 싸고, 사용이 간편한 냉매로써 탄화수소계(Hydrocarbon) 냉매로 프로판(Propane), 이소부탄(Isobutane), 부탄(Butane), 사이클로프로판(Cyclo-propane), 퍼플로사이클로부탄(Perfluorocyclobutane), 프로필렌(Propylene)등이 있다.⁽⁴⁾

최근까지는 유럽을 제외한 일본 및 미국 등 다른 선진국들에서 가연성에 의해 탄화수소계 냉매의 사용이 거의 무시되어 왔으나 지구 온난화 문제가 심각하게 거론됨으로써 (H)CFC 냉매를 대체하기 위하여 온난화 지수가 낮은 프로판, 부탄 등의 탄화수소계 냉매의 사용이 적극적으로 검토되고 있다. 또한, 가정용 냉장고의 경우 James의 보고서에 의하면 기존의 냉동기들이 밀폐식 압축기를 채용하고 있으므로 누설의 가능성이 적고, 기존 냉매에 비하여 큰 비체적을 가지므로 탄화수소계 냉매의 충전량이 일반적인 CFC계 냉매의 절반 정도이므로 가연성에 의한 폭발의 위험은 거의 없는 것으로 밝혀졌다.^(6, 8)

이와 같이 지구 환경 문제를 유발하지 않을 뿐 아니라, 시스템의 효율도 향상시켜야 하는 2종의 목적을 달성하기 위해서는 기존의 냉매를 사용하던 냉동·공조 기기와 동일한 용량과 효율을 얻기 위해서는 시스템의 최적화를 위한 재설계와 실험이 필요할 뿐만 아니라 기존시스템에



Fig. 1 Photograph of experimental apparatus

서의 사용에 대한 연구도 병행되어야 한다.

이에 본 연구에서는 작동유체로 규제냉매인 R-22로 하는 열펌프 장치를 제작하여 대체 이에 본 연구에서는 작동유체로 규제냉매인 R-22로 하는 열펌프 장치를 제작하여 대체냉매인 R-290(propane)과 R-600a(iso-butane)를 작동유체로 변화시켜 평활관에서의 R-22와 탄화수소 냉매의 시스템 성능 특성을 비교·분석하여 탄화수소계 냉매를 대체냉매로 사용하는 열펌프 시스템 설계를 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 데이터 방법

2-1. 실험장치

실험 장치는 물을 열원으로 사용하는 증기 압축식 열펌프 사이클의 기본적인 구성 요소로 제작하였고, Fig. 1과 Fig. 2에 실험 장치의 실제 사진과 개략도를 나타내었다. 실험장치는 냉매가 순환되는 경로와 응축기 및 증발기를 위한 이체유체가 순환되는 경로로 구성되어 있다.

압축기는 R-22용 2기통 개방형 압축기로 인버터를 사용하여 압축기의 회전수를 변화시켰으며 디지털 타코메타를 설치하여 압축기의 회전수를 측정하였다. 팽창장치는 수동식 팽창밸브를 설치하여 냉매유량 및 증발온도를 조절하였다. 응축기와 증발기는 내관으로 냉매가 흐르고, 내관과 외관 사이의 환상구간으로 열원수가 냉매와 대향류로 흐르는 이중관식 열교환기이다.

각각의 내관이 12.77mm, 외관이 22.22mm인 수평 평활 동관으로 제작하였고 입구측으로부터 등간격으로 10개의 소구간으로 나누어 냉매, 열원수, 열교환기 내관의 벽면온도를 소구간 입·출구에서 측정하였다. 냉매온도와 열원수 온도를 측정하기 위한 열전대는 관길이에 따라 등간격으로 구분된 소구간에 설치하였다. 그리고 관벽온도를 측정하기 위한 T형 열전대는 소구간의 입·출구에 관의 상, 하, 측부 3점에 90° 간격으로 설치하였다. 측정된 데이터는 데이터 로그(Yokogawa사)를 통하여 PC에서 처리하였다.

수액기에서 나오는 냉매 유량을 측정하기 위해 질량유량계를 설치하였다. 응축기 및 증발기에 공급하는 이차유체의 온도 조절을 위해 항온조와 히터를 설치하였고, 이차유체의 유량 측정을 위해 수유량계를 각각 설치하였다.

열교환기 및 장치내 배관은 충분히 단열하여 외부와의 열교환은 무시하였다. 주요 실험 조건은 Table 1에 나타내었으며, 냉매의 포화압력 및 온도가 30분 이상 평형상태를 유지하는 정상상태에서의 데이터를 취득하였다.

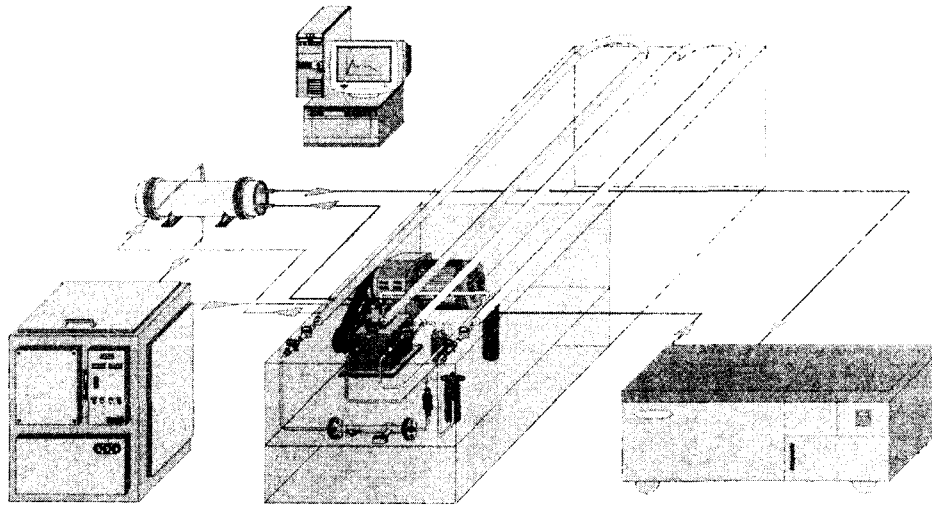


Fig. 2 Schematic flow diagram of experimental apparatus

Table 1 Experimental conditions

Refrigerant	
Working fluid	R-22, R-290, R-600a
Evaporating Temperature [K]	275~285
Mass velocity [kg/m ² ·s]	50~200
Chilled water	
Temp. of Eva. Inlet [K]	298
Mass flow late [kg/h]	350~400
Cooling water	
Temp. of Cond. Inlet [K]	289.5
Mass flow late [kg/h]	400~450

2-2. 데이터 분석

본 연구에서 작동유체로 사용되는 R-22와 대체 냉매인 R-290, R-600a의 열물성값 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_c 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_c 는 증발기측 열원수의 유량이며, $T_{c,in}$ 과 $T_{c,out}$ 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 성능계수와 압축비는 다음과 같이 계산하였다.

$$COP = \frac{Q_e}{W} \quad (3) \quad PR = \frac{P_c}{P_e} \quad (4)$$

3. 실험결과 및 고찰

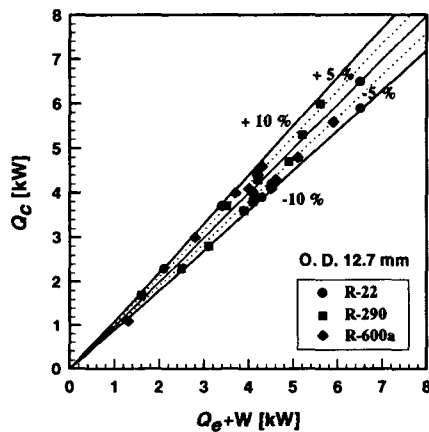


Fig. 3 Heat balance between in the heat pump system

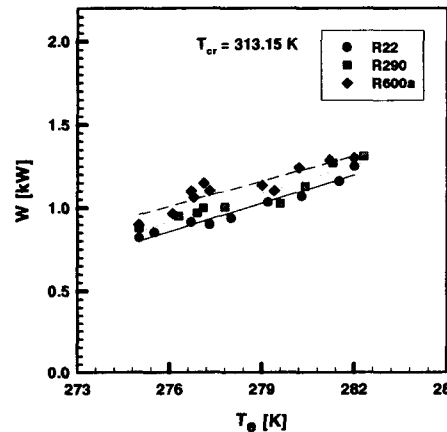


Fig. 4 Compressor work on the evaporating temperature

Fig. 3은 열교환량을 검토하기 위하여 증발기 냉각열량 Q_c 와 압축 일량을 합한 값과 응축기에서의 가 열량 Q_e 를 비교하여 나타낸 것이다. 가로축은 식 (2)에 의하여 열원수 유량과 입·출구 온도차로 계산한 열용량 Q_s 이고, 세로축은 식 (1)에 의하여 계산한 열용량 Q_c 이다. 그림에서 기호 \circ , \square , \diamond 는 각각 R-22, R-290, R-600a를 나타낸다. 그림에서의 오차범위는 냉매의 종류와 증발기 입·출구에서의 냉매의 유량과 엔탈피차로 열원수 유량변화에 관계없이 $\pm 5 \sim 10\%$ 내외에서 거의 일치하였다. 따라서 장치의 열평형은 비교적 우수한 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 4는 증발온도의 변화에 의한 R-22, R-290 및 R-600a 압축 일량의 변화를 나타낸 것이다. 압축 일량은 증발온도가 증가할수록 증가하는 경향을 보이며, 탄화수소계 냉매가 R-22에 비해 미소한 차이지만 보다 크게 나타났다. 이와 같은 차이는 R-22용 압축기를 사용함으로써 물성값의 차이로 인한 영향 때문이라 생각된다.

Fig. 5는 냉동능력의 변화를 각 냉매별 증발온도에 따라 나타내었다. 냉동능력은 증발온도가 증가함에 따라 증가하였으며, 증발온도에 따른 냉동능력의 증가가 탄화수소계 냉매가 R-22에 비해 높은 것으로 나타났다.

Fig. 6은 성능계수의 변화를 각 냉매별 증발온도에 따라 나타내었다. 성능계수는 증발온도가 증가할수록 선형적으로 증가하였으며, R-600a가 가장 높은 것으로 나타났다. 따라서 성능계수

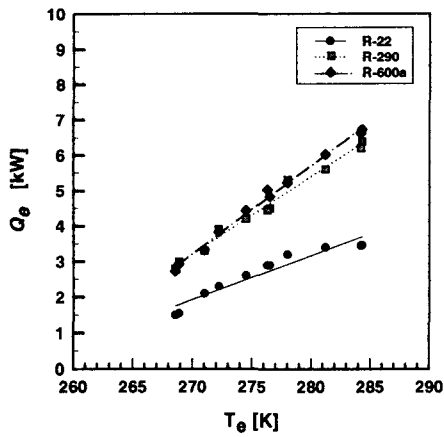


Fig. 5 The refrigeration capacity to evaporating temperature

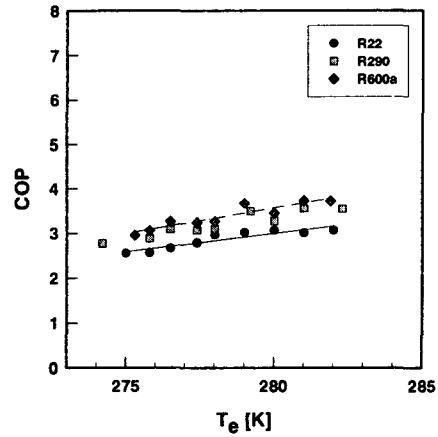


Fig. 6 The coefficient of performance to evaporating temperature

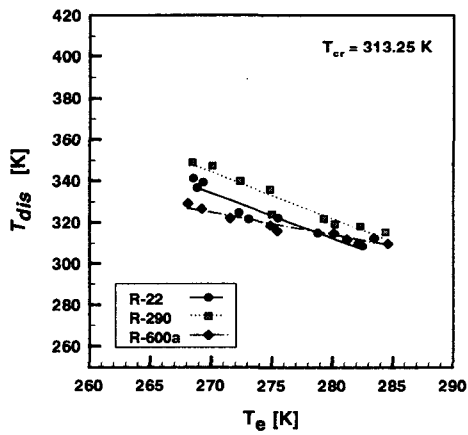


Fig. 7 The discharged temperature to evaporating temperature

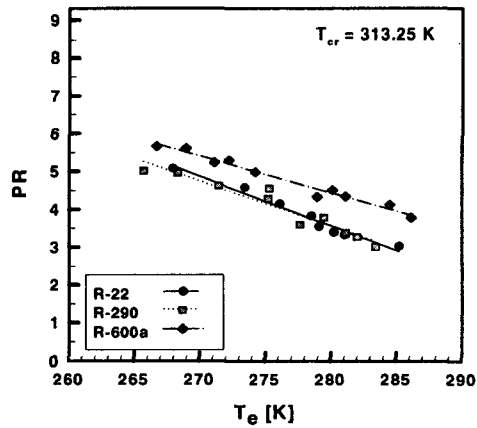


Fig. 8 The pressure ratio to evaporating temperature

의 측면에서 살펴본다면 탄화수소계 냉매는 R-22의 대체냉매로 충분하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7는 각 냉매의 압축비의 변화 증발온도에 따라 나타내고 있다. 그림에서와 같이 증발온도가 증가할수록 압축비는 감소하는 경향을 나타내었으며, R-290은 R-22와 거의 비슷한 값을 나타내었고, R-600a은 R-22보다 약간 높게 나타났다.

Fig. 8은 각 냉매에 대한 압축기 토출가스 온도를 증발온도 변화에 따라 나타낸 것이다. 압축기 토출가스 온도는 증발온도가 증가할수록 선형적으로 감소하는 경향을 보이고 있으며, 비열비와 같은 냉매 물성의 영향 때문인 것으로 생각된다.

5. 결 론

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

1. 열평형을 검토한 결과 냉매의 종류에 관계없이 대체적으로 5~10%정도내외로 거의 일치하며 장치에서의 열평형이 비교적 우수함을 확인하였다.
2. 압축일량은 증발온도가 증가할수록 선형적으로 증가하였고, 탄화수소계 냉매가 R-22에 비해 미소한 차이지만 보다 크게 나타났다.
3. 냉동능력은 증발온도가 증가함에 따라 증가하였으며, 탄화수소계 냉매가 비해 증발온도에 따른 냉동능력의 증가가 R-22에 비해 높은 것으로 나타났다.
4. 성능계수는 증발온도가 증가할수록 증가하는 경향을 보이며, 탄화수소계 냉매 중 R-600a가 가장 높은 것으로 나타났다.

참고문헌

- (1) Molina, M. J. and Rowland, F. S., "Stratospheric Sink for Chlorofluoromethanes," Chlorine Atom Catalyzed Destruction of Ozone, Nature, Vol. 249, pp. 810~814, 1974
- (2) Kurylo, M. J., "The Chemistry of Stratospheric Ozone," Its Response to Natural and Anthropogenic Influences, Int. J. Ref., Vol. 13, pp. 62~72, 1990
- (3) 산업자원부, "자연 냉매를 적용한 냉동·공조 시스템 기술 개발에 관한 산업 분석," pp. 58~69, 2000
- (4) Diddion, D.A. and Bivens, D.B., "Role of Refrigerant Mixtures as Alternatives to CFCs," International Journal of Refrigeration, Vol. 13, pp. 163~175, 1990
- (5) Hewitt, N. J., McMullan, J. T. and Mongey, B., "Some Aspects of Using Hydrocarbons as Components in Refrigerant Mixtures", New Applications of Natural Working Fluids in Refrigeration and Air Conditioning, IIR Commission B2, pp. 143~152, 1994
- (6) Kruse, H., "European Research and Development Concerning CFC and HFC Substitution," ASHRAE/NIST Refrigerants Conference, pp. 41~54, 1993
- (7) Kim, M. S., Mulroy, W. J. and Diddion, D. A., "An Experimental Evaluation of the Flammability and Performance Potentials of Two Azeotropic Refrigerant Mixtures," Transport Phenomena in Thermal Engineering, pp. 446~451, 1993
- (8) James, R. W. and Missenden, J. F., "The Use of Propane in Domestic Refrigerators," Int. J. Ref., Vol. 15, No. 2, pp.95~100, 1992