

탄화수소계 냉동공조 시스템의 성능특성에 관한 실험

윤정인[†] · 이호생* · 이근태* · 김재돌**

(원고접수일 : 2004년 3월 22일, 심사완료일 : 2004년 6월 7일)

Performance Characteristics of Refrigeration and Air Conditioning System Using Hydrocarbon Refrigerants

Jung-In Yoon[†] · Ho-Saeng Lee* · Keun-Tae Lee* · Jae-Dol Kim**

Abstract : Environmentally friendly refrigerants with zero ozone layer depletion potential are required to be used in refrigerators and air conditioners due to the difficulties related to ozone layer depletion and global warming. A rigorous study for the system performance with new refrigerants having zero ozone layer depletion potential is inevitable before adopting that as a new fluid. The HFC(Hydrofluorocarbon) potential has been recommended as alternatives.

In this paper, system performance in the heat pump facilities were studied using R-290, R-600a, R-1270 as an environment friendly refrigerant, R-22 as a HCFC's refrigerant. The experimental apparatus has been set-up as a conventional vapor compression type heat pump system. The test section is a horizontal double pipe heat exchanger. A tube diameter of 12.70mm with 1.315mm wall thickness is used for this investigation. The test results showed that the COP of hydrocarbon refrigerants were superior to that of R-22 and the maximum increasing rate of COP was found in R-1270. The refrigeration capacity of hydrocarbon refrigerants were higher than that of R-22. The compressor work was obtained with the maximum value in R-1270 and the minimum one in R-22.

Key words : Hydrocarbon(탄화수소), Coefficient of performance(성능계수), Pressure ratio (압축비), Propylene(프로필렌)

1. 서 론

빠른 산업 발달과 사람들의 생활수준이 향상됨

에 따라 냉동·공조 산업은 점차 성장하여 일상생활에 많은 부분을 차지하고 있으나, 오존층 파괴와 지구 온난화라는 환경문제의 에너지 절약이라

[†] 책임저자(부경대학교 기계공학부), E-mail : yoonji@pknu.ac.kr, T : 051-620-1506

* 부경대학교 대학원 냉동공조공학과

** 동명대학 냉동공조과

는 문제 등으로 인해 새로운 대체 냉매 개발과 에너지 소비를 줄일 수 있는 고성능 열펌프 기기의 개발이 필요하게 되었다.^(1, 2)

현재 사용되고 있는 HCFC와 CFC계 냉매는 환경오염을 유발하기에 1992년 몬트리얼 의정서에 따라 사용량을 점차적으로 줄이고 2003년에는 사용이 금지되었다. 그로 인하여 현재까지는 CFC계의 대체 냉매로 비공비 혼합냉매⁽³⁾와 HFC계 냉매가 권장되고 있는데, HFC계열의 냉매는 ODP(Ozone Depletion Potential)가 0이기는 하나 지구 온난화에 영향을 미치고 누설로 인한 성분비 변동과 재 충전시 초기 성분비 재현이 힘들다는 어려움이 있기에 사용이 바람직하지 않다. 따라서 새로이 개발되는 대체 냉매는 지구 환경을 파괴하지 않으면서 독성과 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 않는 영향을 미치는 인공 화합물인 프레온계 냉매 대신에 ODP와 GWP(Global Warming Potential)가 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), 공기 등의 자연 냉매 중 값이 싸고, 사용이 간편한 냉매로써 탄화수소계(Hydrocarbon) 냉매로 프로판(Propane), 이소부탄(Isobutane), 부탄(Butane), 사이클로프로판(Cycleo-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 압축

기를 채용하고 있으므로 누설의 가능성이 적고, 기존 냉매에 비하여 큰 비체적을 가지므로 탄화수소계 냉매의 충전량이 일반적인 CFC계 냉매의 절반 정도가 되어 가연성에 의한 폭발의 위험은 거의 없는 것으로 밝혀졌다.⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾

이와 같이 지구 환경 문제를 유발하지 않을 뿐 아니라, 시스템의 효율도 향상시켜야 하는 이중의 목적을 달성하고 기존의 냉매를 사용하던 냉동·공조 기기와 동일한 용량과 효율을 얻기 위해서는 시스템의 최적화를 위한 재설계와 실험이 필요할 뿐만 아니라 기존시스템에서의 사용에 대한 연구도 병행되어야 한다.

이에 본 연구에서는 작동유체로 규제냉매인 R-22를 대상으로 하는 냉동·공조장치를 제작하여 대체냉매인 R-290과 R-600a, R-1270으로 작동유체를 변화시켜 평활관에서의 R-22와 탄화수소 냉매의 시스템 성능 특성을 비교·분석하여, 탄화수소계 냉매를 대체냉매로 사용하는 시스템 설계를 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 데이터 처리 방법

2-1. 실험장치

실험장치는 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 이차유체인 물이 순환되는 경로로 구성되어 있다.

압축기는 R-22용 2기통 개방형 압축기로 인버터를 사용하여 압축기의 회전수를 변화시켰으며 디지털 타코메타를 설치하여 압축기의 회전수를 측정하였다. 또한 압축기에 파워미터(Yokogawa사)를 부착하여 각 운전조건에 따라 압축기에서 소요되는 동력을 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 22.22mm이

고, 열교환기의 총길이가 6m인 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. 냉매온도 측정을 위한 센서는 1.6mm Sheath형 T-type 열전대를 사용하였고, 관벽온도를 측정하기 위한 온도센서는 정밀 수은 온도계로 보정하여 $\pm 0.2\%$ 의 오차 범위를 가지는 0.1mm T형 열전대(thermocouple)로 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 장치 내 배관의 모든 부분은 고무 발포보온재와 보온재 테입을 사용하여 충분히 단열함으로써 외부와의 열교환이 없도록 하였다. 주요 실험 조건은 Table 1에 나타내었으며, 냉매의 포화압력 및 온도가 30분 이상 평형상태를 유지하

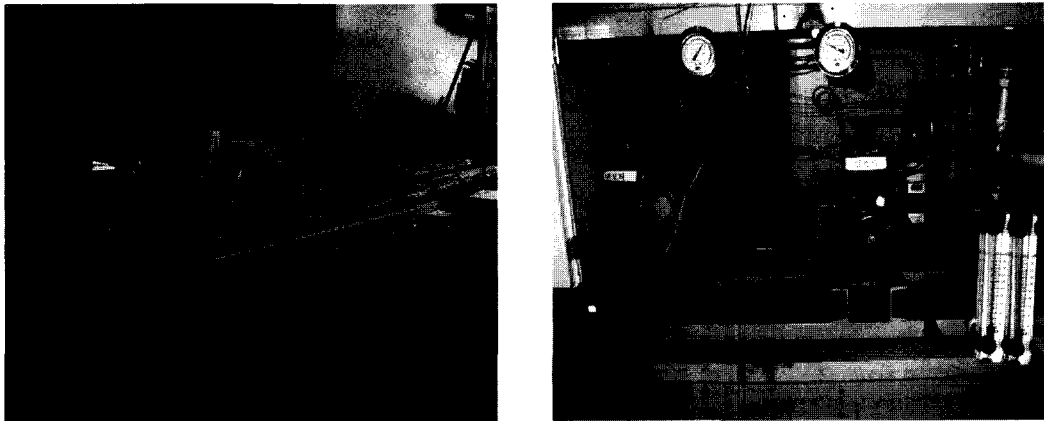


Fig. 1 Photograph of experimental apparatus

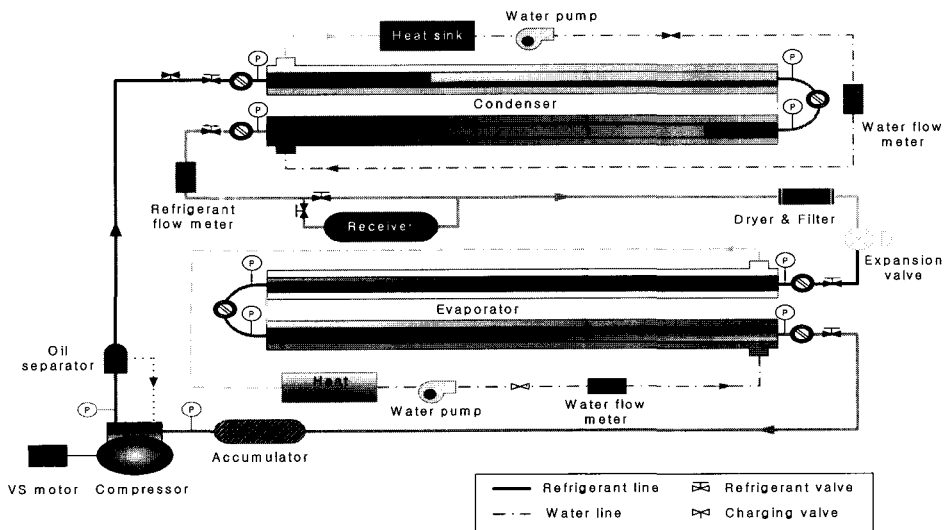


Fig. 2 Schematic flow diagram of experimental apparatus

는 정상상태에서의 데이터를 취득하였다.

Table 1 Experimental conditions

Refrigerant	
Working fluid	R-22, R-290, R-600a, R-1270
Evaporating Temperature [K]	278
Mass flux [kg/m ² ·s]	120~250
Chilled water	
Temp. of Eva. Inlet [K]	289
Mass flow rate [kg/h]	330~570
Cooling water	
Temp. of Cond. Inlet [K]	303
Mass flow rate [kg/h]	600~840

2-2. 데이터 분석

본 연구에서 작동유체로 사용되는 R-22와 대체 냉매인 R-290, R-600a, R-1270의 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.

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

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.

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

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 성능계수 COP와 압축비 PR은 다음과 같이 계산하였다.

$$COP = \frac{Q_e}{W} \tag{3}$$

$$PR = \frac{P_c}{P_e} \tag{4}$$

여기서, Q_e 는 식 (2)에서 구해진 증발기에서의 열유입량, W 는 압축일량을 나타내고, P_c 와 P_e 는 각각 응축압력과 증발압력을 나타낸다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 열교환량을 검토하기 위하여 증발기 냉각열량 Q_e 와 압축 일량 W 를 합한 값과 응축기에서의 열방출량 Q_c 를 비교하여 나타낸 것이다. 가로축은 식 (2)에 의하여 열원수 유량과 입·출구 온도차로 계산한 열용량 Q_e 와 압축 일량 W 를 합한 값이고, 세로축은 식 (1)에 의하여 계산한 열용량 Q_c 이다. 그림에서 기호 □, ◇, ○, △은 각각 R-22, R-290, R-600a, R-1270을 나타낸다. 그림에서의 오차범위는 냉매의 종류와 증발기 입·출구에서의 냉매의 유량과 엔탈피차로 열원수 유량변화에 관계없이 ±20% 내외에서 거의 일치하였다. 따라서 장치의 열평형은 비교적 우수한 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 4는 증발온도의 변화에 의한 R-22, R-290, R-600a 및 R-1270 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 물성 값의 차이로 인한 영향 때문이라 생각된다. 즉, R-22의 밀도, 비체적 등과 같은 물성치에 맞게 제작된 압축기에 대체냉매인 탄화수소계

냉매를 적용함으로써 인해 냉매간의 물성치 차이에 의한 압축기에서의 흡입체적당 냉동능력의 차이가 나게 되고 그러므로 인해 압축일량의 차이를 보이게 된다. 여기서, 탄화수소계 냉매는 R-22에 비해 낮은 밀도값을 가지므로 흡입체적당 냉동능력이 작아지게 되고, 그러므로 인해 압축일량이 소폭 증가하는 것으로 나타났다.

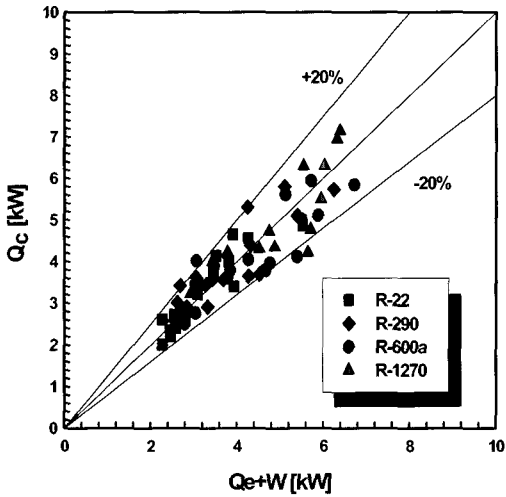


Fig. 3 Heat balance in the refrigeration and air-conditioning system

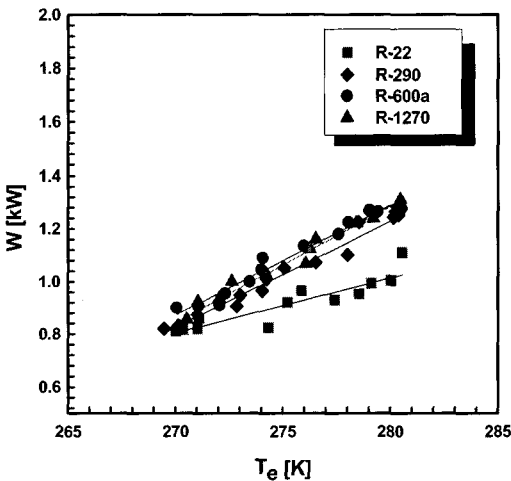


Fig. 4 Compressor work on the evaporating temperature

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.

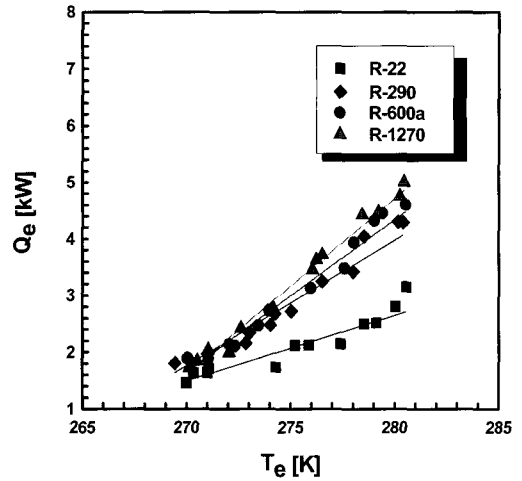


Fig. 5 The refrigeration capacity to evaporating temperature

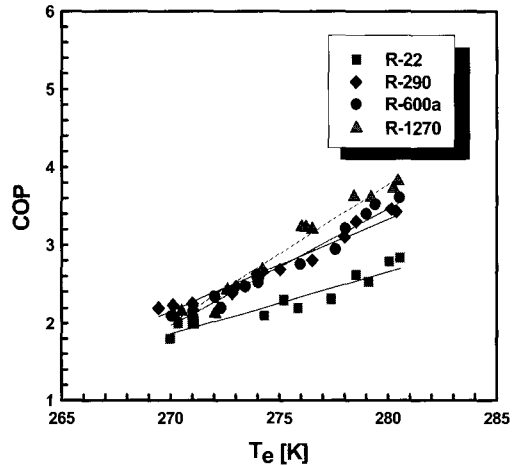


Fig. 6 The coefficient of performance to evaporating temperature

Fig. 6은 성능계수의 변화를 각 냉매별 증발온도에 따라 나타내었다. 성능계수는 증발온도가 증가할수록 선형적으로 증가하였으며, R-1270이 가

장 높은 것으로 나타났다. 따라서 성능계수의 측면에서 살펴본다면 탄화수소계 냉매는 R-22의 대체냉매로 충분하다는 것을 알 수 있다.

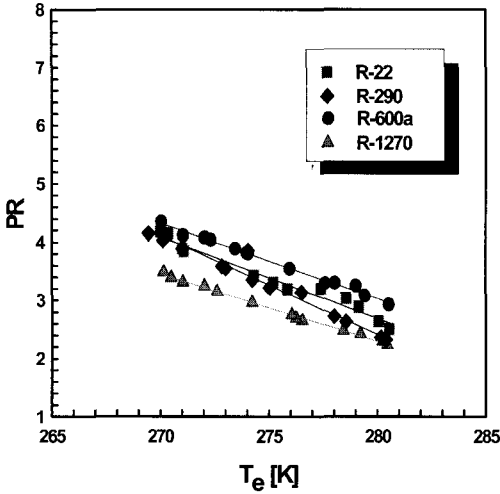


Fig. 7 The pressure ratio to evaporating temperature

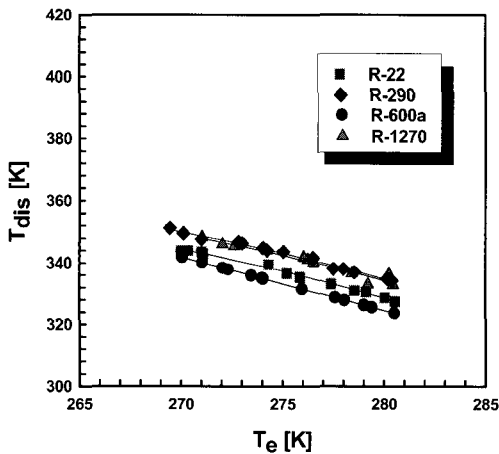


Fig. 8 The discharged temperature to evaporating temperature

Fig. 7은 각 냉매의 압축비의 변화를 증발온도에 따라 나타내고 있다. 그림에서와 같이 증발온도가 증가할수록 압축비는 감소하는 경향을 나타

내었으며, R-290은 R-22와 거의 비슷한 값을 나타내었고, R-600a는 R-22보다 약간 높게 R-1270은 매우 높게 나타내었다.

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.

4. 결 론

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 일치하며 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. 냉동능력은 증발온도가 증가함에 따라 상승하며 탄화수소계 냉매가 R-22에 비해 높게 나타났으며 Propylene은 고질량유속일 때 다른 탄화수소계 냉매보다 높게 나타났다.
4. 성능계수는 증발온도가 증가할수록 증가하는 경향을 보이며, 탄화수소계 냉매 중 R-1270이 가장 높은 것으로 나타났다.

감사의 글

본 논문은 한국과학재단 지정 부경대학교 친환경 첨단에너지기계연구센터의 지원(과제번호:R12-2003-001-01002-0)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [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] Hewit, 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 Didion, 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

저 자 소 개

**이호생 (李虎生)**

1975년생, 2000년도 부경대학교 냉동공조공학과 졸업, 2002년도 부경대학교 대학원 냉동공조공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 냉동공조공학과 박사과정.

**이근태 (李根太)**

1977년생, 2003년도 부경대학교 냉동공조공학과 졸업, 현재 부경대학교 냉동공조공학과 대학원 재학.

**김재돌 (金在堃)**

1967년생, 1991년 부산수산대학교 냉동공학과 졸업, 1993년 부산수산대학교 대학원 냉동공조학과 졸업(공학석사), 1996년 동대학원 졸업(공학박사), 현재 동명대학건축기계설비시스템과 조교수.

**윤정인 (尹政仁)**

1962년생, 1988년 부산수산대학교 냉동공학과 졸업, 1990년 부산수산대학교 대학원 냉동공학과 졸업(공학석사), 1995년 동경농공대 대학원 졸업(공학박사), 현재 부경대학교 기계공학부 냉동공조에너지전공 부교수.