

이산화탄소/프로판 혼합냉매의 냉방성능에 대한 충전량의 영향 및 순환성분비 변화 특성

김 주 혁, 황 윤 옥*, 김 민 수†

서울대학교 기계항공공학부, *한국기계연구원 에너지기계연구센터

Influence of Charging Amounts on the Cooling Performance of CO₂/Propane Mixtures and Concentration Shift Behavior

Ju Hyok Kim, Yun Wook Hwang*, Min Soo Kim†

School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

*Energy System Research Center, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon 305-343, Korea

(Received July 14, 2005; revision received October 6, 2005)

ABSTRACT: CO₂ and propane mixtures, which are environmentally benign, nontoxic, low in price, and compatible with materials and lubricants, were considered as promising alternative refrigerants. A fully instrumented air-conditioning system was developed for a precise performance evaluation of pure CO₂ and CO₂/propane mixtures. In this paper, the effect of the charging amount and circulation concentration on the cooling performance of the system using CO₂ and propane mixtures was tested and discussed. Pure CO₂ and 85/15, 75/25 and 60/40 binary blends by the charged mass percentage of CO₂/propane were selected as working fluids. An optimum charging amount was proposed as a parameter instead of the degree of subcooling, which can not be well defined in the transcritical cycle, to properly compare the performance between the transcritical and subcritical cycles.

Key words: Carbon dioxide(이산화탄소), Propane(프로판), Zeotropic mixture(변온증발혼합물), Charging amount(충전량), Concentration shift(성분비변화)

기 호 설 명

하첨자

COP : 성능계수(Coefficient of performance)
 \dot{m}_r : 냉매의 질량유량 [kg/s]
 P : 압력 [MPa]
 q_e : 단위냉방효과 [kJ/kg]
 T : 온도 [°C]
 \dot{W} : 압축기 소요동력 [kW]

e, i : 증발기 입구
 hr, i : 열방출기 입구
 sup : 과열도
 w : 물

1. 서 론

냉동 산업 분야에서 기존에 많이 사용되던 CFC, HCFC 계열 냉매들은 환경문제로 인해 그 사용이 제한되고 있다. 대체냉매로 개발된 HFC 계열

† Corresponding author

Tel.: +82-2-880-8362; fax: +82-2-883-0179

E-mail address: minskim@snu.ac.kr

냉매 역시 직접지구온난화지수가 높은 단점을 가지고 있기 때문에 사용에 제약이 있다. 따라서 최근에는 지구온난화 등을 야기하지 않는 자연냉매에 대한 관심이 높아지고 있다. 이산화탄소에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 혼합냉매에 대한 연구도 많이 이루어졌다.

Lorentzen⁽¹⁾은 환경친화적이고 안전한 대체냉매로서 이산화탄소를 제안하였다. 이산화탄소를 이용하는 냉동시스템의 성능에 대한 연구가 있었고,⁽²⁻⁴⁾ Fartaj et al.⁽⁵⁾는 열역학의 2법칙을 바탕으로 이산화탄소의 성능을 분석하였다. Didion and Bivens⁽⁶⁾는 대체냉매로서 혼합냉매를 연구하였다. 혼합냉매 상변화시의 온도변화(temperature glide) 특성, 2차유체와의 온도매칭(temperature matching), 온도조절현상(pinching) 등에 대한 연구를 수행하였다. Kim et al.⁽⁷⁾은 R134a/R290과 R134a/R600a의 등온증발혼합냉매의 성능에 대한 연구를 수행하였다.

이산화탄소는 독성과 가연성이 없지만 작동압력이 높고 임계온도가 낮다는 단점이 있다. 반면 탄화수소 계열 냉매는 뛰어난 열역학적 성질을 가지고 있지만 가연성이 있다는 단점이 있다. 이

런 단점을 상호보완하기 위해 본 연구에서는 이산화탄소와 프로판의 혼합냉매를 대체냉매로 고려하였다. 순수 이산화탄소와 이산화탄소/프로판 충전량 기준 백분율 질량비가 85/15, 75/25, 60/40인 혼합냉매를 대상냉매로 선택하였고, 실험장치를 구성하여 냉방성능 실험을 수행하였다.

냉매의 누출과 재충전 등에 의해 냉동시스템 내 냉매량이 변할 수 있고 이로 인해 시스템 성능이 변하게 된다. 따라서 충전량에 따른 냉방성능의 변화를 연구하는 것이 필요하다. 또한 변온증발냉매를 사용하는 경우에 시스템 운전시 순환하는 냉매의 성분비가 충전시의 성분비와 다르기 때문에⁽⁸⁾ 순환성분비를 고려하고 그 영향을 고찰하는 것이 필요하다.

2. 실험장치 및 장치의 타당성 검토

2.1 실험장치 및 조건

순수 이산화탄소와 이산화탄소/프로판 혼합냉매를 대상으로 성능실험을 수행하기 위해 제작한 실험장치의 개략적인 형태를 Fig. 1에 나타내었다.

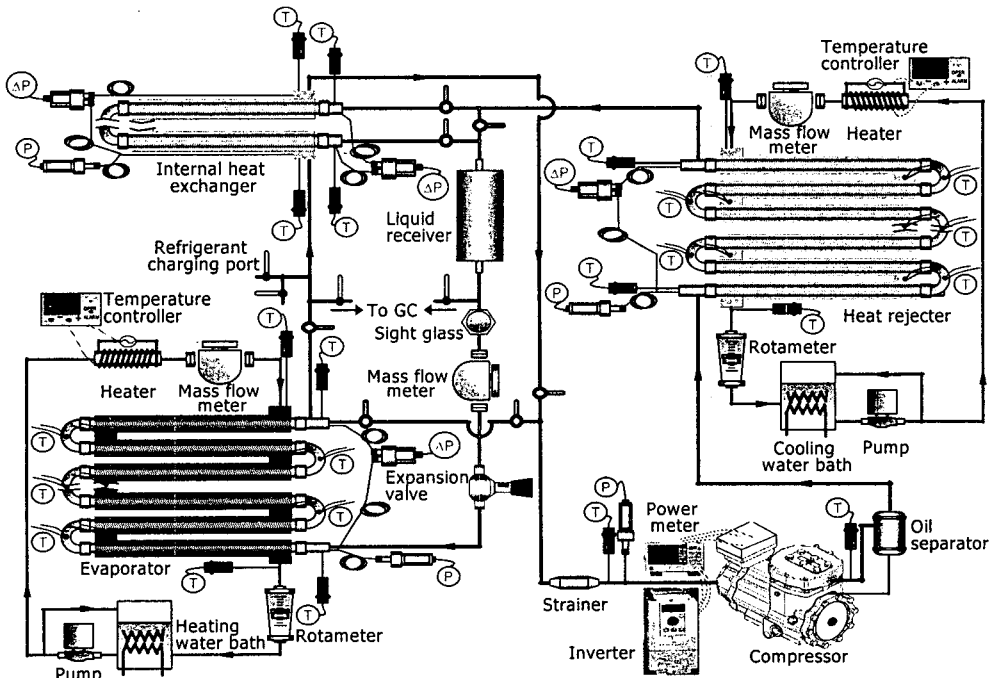


Fig. 1 A schematic diagram of the experimental setup for performance tests.

기존 냉매와 달리 이산화탄소는 고압이기 때문에 실험장치에 사용된 압축기, 오일분리기, 사이트클라스는 이산화탄소용을 장착하여 사용하였다. 압축기는 Dorin 회사 제품으로 TCS113 모델을 사용하였다. 압축기 출구에 오일분리기를 설치하였으며, 냉매의 순환상태를 확인하기 위해 사이트클라스를 설치하였다. 열방출기, 증발기, 내부 열교환기는 각각의 용량과 작동압력에 맞게 직접 제작하였다. 실험장치에서 열방출기는 초임계 사이클에서는 가스냉각기이며, 아임계 사이클에서는 응축기 역할을 하는 열교환기이다.

온도, 압력, 질량유량, 압축기 소요동력, 순환성분비 등을 측정하기 위해 보정을 마친 여러 계측장비들을 실험장치에 설치하였다. T형 열전대를 이용해 냉매와 2차유체의 온도를 측정하였고, 영점온도보상기(ice point reference)를 이용해 온도를 보정하였다. Fig. 1에 측정위치가 표시되어 있는 절대압과 차압 등의 압력은 절대압계와 차압계를 이용해 측정하였다. 질량유량계로 냉매와 2차유체의 유량을 측정하였으며, 전력계로 압축기 소요동력을 측정하였다. 또한 실험 중에 혼합냉매의 순환성분비를 가스크로마토그래프로 정밀하게 측정하였다.

열방출기와 증발기의 2차유체인 물의 질량유속은 각각 90 g/s와 125 g/s로 고정하였다. 2차유체의 입구온도와 과열도 등을 변화시키면서 실험을 수행하였다.

2.2 에너지 균형검증 및 오차해석

열교환기에서의 열교환량은 냉매측과 2차유체측의 측정된 질량유속, 온도와 압력 등을 이용해 각각 구할 수 있다. 이때 필요한 비열 또는 엔탈피 자료는 REFPROP 프로그램⁽⁹⁾을 이용하여 계산하였다. 물성 프로그램에 의해 예측된 혼합냉매의 물성값이 순수냉매에 비해 덜 정확하고, 특히 혼합냉매의 경우 임계압력 부근에서의 액상 열물성값의 정확성이 떨어진다. 따라서 에너지 균형검증은 냉매의 물성이 상대적으로 정확하게 예측되는 순수 이산화탄소를 대상으로 수행된 61회의 성능실험을 이용해 이루어졌다. 열방출기에서의 냉매측과 2차유체측의 열용량의 차이는 0.94%이고 증발기의 경우는 0.76%였다. 동일한 장치에서 실험을 수행하였기 때문에 다른 혼합냉매를

대상으로 실험하는 경우에도 같은 수준의 에너지 균형이 유지될 것으로 판단된다.

실험의 정확성을 검증하기 위해서 네 개의 냉매를 가지고 이루어진 319회의 실험을 대상으로 오차해석을 수행하였다. 냉방용량과 성능계수의 측정오차에서 2차유체의 열교환기 입구와 출구 온도차이 측정이 가장 큰 오차 요인이다. 따라서 오차를 최소화하기 위해 실험에서 2차유체의 온도차이를 10°C 이상으로 유지하였다. 냉방용량과 냉방성능계수 측정의 전체 오차는 각각 1.8%와 2.0%였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 순수 이산화탄소

주어진 외기조건에서 초임계 사이클을 형성하는 순수 이산화탄소에 대해 충전량에 따른 성능변화를 고찰하였다. Fig. 2에 이산화탄소의 충전량에 따른 실제 냉동사이클의 성능변화를 압력-엔탈피 선도에 나타내었다. Fig. 2에서 냉방용량과 압축기 동력을 냉매의 질량유속으로 나눈 단위냉방효과와 단위소요일의 충전량에 대한 변화를 파악할 수 있다. 충전량이 증가함에 따라 단위냉방효과는 거의 선형적으로 증가하고 단위소요일은 상대적으로 천천히 증가하다가 급격히 증가하는

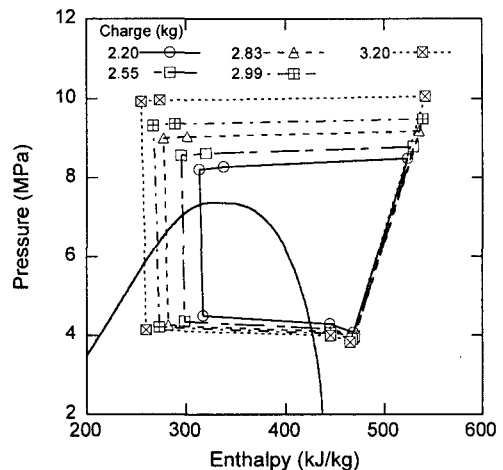


Fig. 2 Pressure-enthalpy diagram of CO₂ system for different charging amounts ($T_{w,hr,i}=30^{\circ}\text{C}$, $T_{w,e,i}=27^{\circ}\text{C}$).

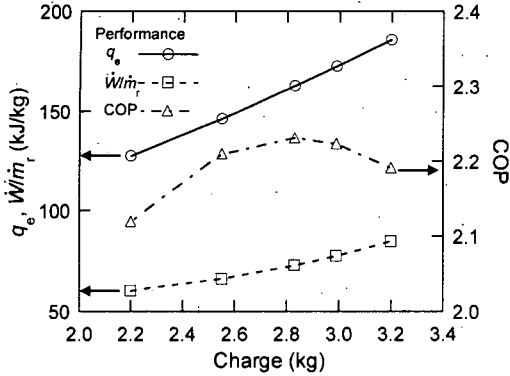


Fig. 3 Specific refrigerating effect, specific compression work and COP of CO₂ system with the charging amount.

경향을 나타낸다. 따라서 냉방성능계수는 어떤 충전량까지는 증가하다가 감소하게 된다. 이 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

충전량에 따른 성능의 변화를 정량적으로 고찰하기 위해 엑서지 해석을 수행하고 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 냉동시스템의 각 요소부품에서 비가역성에 의해 손실일이 발생하고 이 손실일의 분포는 충전량에 따라 다르게 나타난다. 성능계수가 가장 높게 나타난 충전량 2.83 kg보다 적은 충전량에서는 팽창밸브와 내부 열교환기의 비가역적인 손실일이 전체 손실일에서 차지하는 비중이 상대적으로 크다. 반면, 과충전인 경우에는

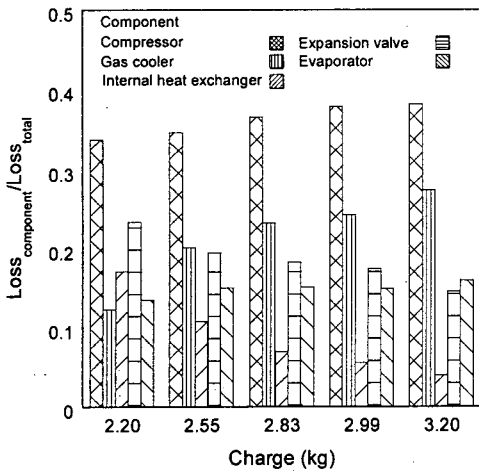


Fig. 4 Effect of CO₂ charge on the component loss distribution.

열방출기, 증발기, 압축기에서의 손실일이 저충전 영역에 비해 더 큰 부분을 차지한다. 저충전 및 과충전 영역에서의 이런 손실일의 증가로 인해 성능계수는 Fig. 3과 같이 증가하다가 감소한다.

3.2 이산화탄소/프로판 혼합냉매 (85/15 충전량 기준 질량비)

이산화탄소/프로판 충전량 기준 질량비가 85/15인 혼합냉매에 대해서 가장 높은 성능계수를 나타내는 최적 충전량을 결정하였다. 최적 충전량은 2.55 kg이며, 프로판의 액상밀도가 이산화탄소에 비해 작기 때문에 동일시스템에서 최적 충전량은 프로판의 성분비가 높아짐에 따라 작아진다.

변온증발혼합냉매의 경우 충전할 때의 성분비와 냉동시스템 운전시의 순환성분비가 다르다.⁽⁸⁾ 이것은 압축기 오일의 혼합냉매의 한 성분에 대한 차별적인 용해도 때문에 부분적으로 나타나고, 대부분은 시스템 작동 중에 2상 영역에 포함된 냉매의 성분비가 충전성분비와 다르기 때문에 나타난다. 즉, 작동 중에 2상 영역의 각 지점에 포함된 냉매들의 성분비가 서로 다르며, 2상 영역 전체에 포함된 혼합냉매에 보통 휘발성이 큰 성분물질이 충전성분비에 비해 적다. 따라서 단상 영역에는 충전성분비에 비해 휘발성이 큰 성분이 더 많이 포함되게 되며, 단상 영역을 차지하고 있는 냉매의 성분비와 같은 값을 갖는 순환 성분비도 휘발성이 큰 물질의 성분비가 높게 나타나게 된다. 변온증발혼합냉매를 사용하는 경우 작동 중의 순환성분비는 충전성분비와 다르며, 냉동시스템, 외기조건, 냉매의 종류와 충전량 등에 따라 그 값이 변하게 된다.

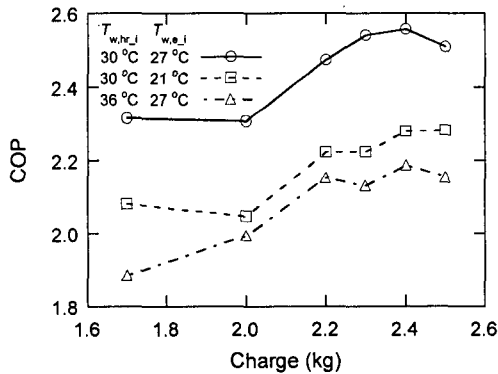
이산화탄소/프로판(85/15 wt%) 혼합냉매를 대상으로 여러 조건에서 수행된 실험에서 측정된 순환성분비는 이산화탄소 기준으로 0.88 물질분율이다. 본 실험장치에서 작동 중에 냉매 총질량의 약 60%가 초임계 상태로 수액기에 충전되어 있고 가스냉각기에도 초임계 상태의 냉매가 충전되어 있기 때문에 상대적으로 시스템에 2상상태의 냉매가 적다. 따라서 충전량이나 작동조건에 대해 순환성분비가 거의 변하지 않았다. 본 연구에서는 실험 또는 성능평가에 필요한 과열도, 엔탈피, 엔트로피 등의 계산을 위해 충전성분비가 아닌 순환성분비를 사용하였다.

3.3 이산화탄소/프로판 혼합냉매
(75/25, 60/40 충전량 기준 질량비)

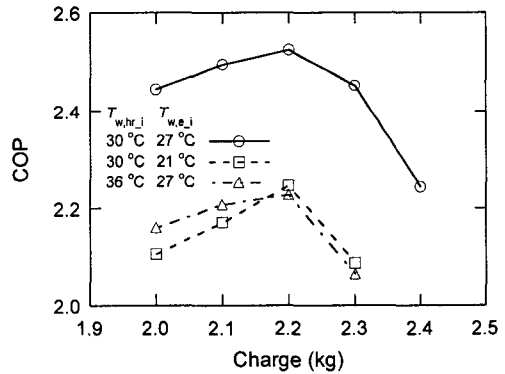
75/25, 60/40 성분비 혼합냉매에 대해서 다른 2차유체 입구온도조건에 대해 충전량의 영향을 살펴보았다. 열방출기에서의 물의 입구온도는 30°C 부터 36°C까지며, 증발기에서의 물의 입구온도는 21°C부터 27°C까지 변화시켰다. 증발기 출구 과열도는 5°C로 고정하였다. Fig. 5의 (a)와 (b)에 75/25와 60/40 성분비 혼합냉매의 냉방성능계수의 충전량에 대한 변화를 각각 나타내었다. 이산화탄소/프로판(60/40 wt%) 혼합냉매의 경우 외기 조건에 관계없이 2.2 kg에서 최대 성능계수를 나타내었으며, 이산화탄소/프로판(75/25 wt%) 혼합냉매의 경우에는 동일한 충전량에 대해서도 외기

조건에 따라 아임계 또는 초임계 사이클을 형성하는 차이가 있지만 대체로 2.4 kg에서 최대 성능계수를 나타내었다.

일정한 2차유체의 입구온도에서 0, 5, 10°C의 과열도에 대해 충전량의 냉방성능계수에 대한 영향을 Fig. 6에 나타내었다. 과열도에 관계없이 이산화탄소/프로판(75/25 wt%)와 이산화탄소/프로판(60/40 wt%) 혼합냉매는 각각 2.4 kg, 2.2 kg에서 최대 성능계수를 나타내었다. 그러나 60/40 혼합냉매는 과열도에 따라 동일 충전량에서 성능계수의 차이가 크게 나타났다. 이산화탄소/프로판(60/40 wt%) 혼합냉매의 경우 열교환기에서 온도변화가 크기 때문에 증발기 출구에서 온도조절(pinching)이 발생했고 이로 인해 과열도에 따라 냉매의 증발기 내 온도와 압력이 상대적으로 크게 변화했

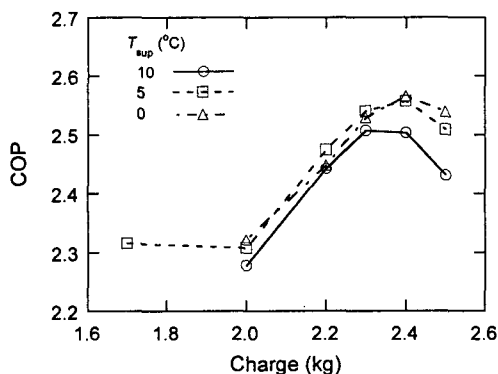


(a) CO₂/propane (75/25 wt%) system

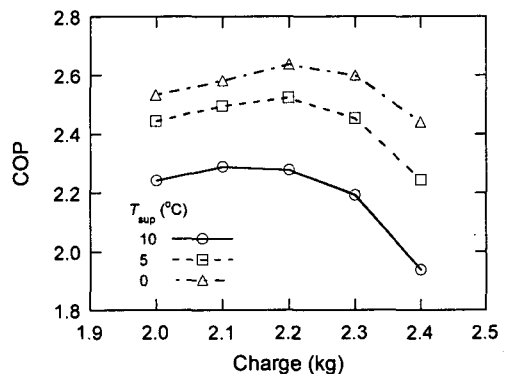


(b) CO₂/propane (60/40 wt%) system

Fig. 5 Effect of charging amount on the COP with different ambient conditions.



(a) CO₂/propane (75/25 wt%) system



(b) CO₂/propane (60/40 wt%) system

Fig. 6 Effect of charging amount on the COP with different degrees of superheat.

다. 과열도가 증가함에 따라 증발기에서의 냉매의 온도와 압력이 감소하기 때문에 냉방용량이 감소하고 성능계수가 낮게 나타났다.

실험 중에 측정된 순환성분비는 이산화탄소/프로판(75/25 wt%) 혼합냉매에 대해 0.780~0.785, 이산화탄소/프로판(60/40 wt%) 혼합냉매는 0.630~0.635의 순환성분비를 나타냈다. 시스템이 작동할 때 수액기를 차지하고 있는 초임계 상태 또는 액상 상태의 냉매가 총 충전량의 약 60%이기 때문에 순환성분비는 외기조건이나 충전량에 따라 크게 달라지지 않았다. 2상 영역에 포함된 냉매의 양이 많아진다면 순환성분비와 충전성분비의 차이는 더 커질 수 있고 작동조건에 따라서도 순환성분비가 달라질 수 있다.

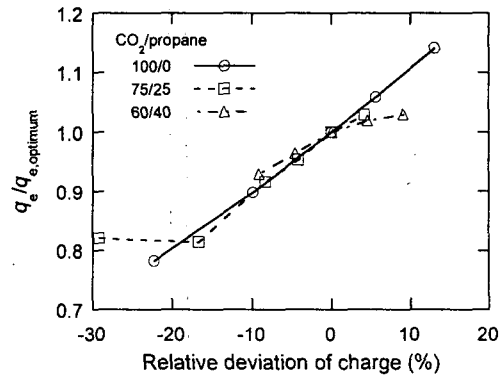
3.4 각 냉매의 성능 특성에 대한 충전량의 영향 비교

순수 이산화탄소와 75/25, 60/40 성분비의 혼합냉매에 대해 같은 작동조건에서 성능에 대한 충전량의 영향을 비교하였다. 동일 작동조건에서 이산화탄소는 초임계 사이클을 이루며, 이산화탄소/프로판(75/25 wt%) 성분비 혼합냉매는 충전량에 따라 아임계 사이클 또는 초임계 사이클을 이루고, 이산화탄소/프로판(60/40 wt%) 혼합냉매는 아임계 사이클을 형성하였다.

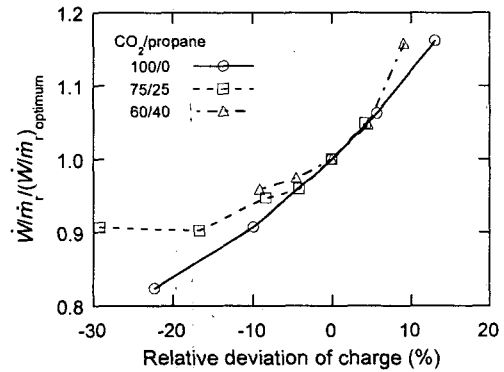
세 가지 냉매의 단위냉방효과, 단위소요일, 냉방성능계수의 충전량에 대한 영향을 Fig. 7에 나타내었다. 냉매에 따라 충전량과 성능특성의 절대값이 다르기 때문에 Fig. 7의 냉매의 충전량은 각 냉매의 최적 충전량을 기준으로 상대적으로 나타내었고, 성능특성도 최적 충전량에서의 값을 기준으로 상대적으로 나타내었다. Fig. 7(c)는 이산화탄소가 다른 두 냉매에 비해 실험범위에서 충전량의 변화에 대해 냉방성능계수의 변화가 적은 것을 보여준다. 이것은 이산화탄소가 초임계 사이클을 형성하기 때문이다.

Fig. 8의 압력-엔탈피 선도에 이산화탄소/프로판(60/40 wt%) 혼합냉매의 충전량에 따른 실제 냉동사이클의 변화를 나타내었다. 아임계 사이클은 시스템에 냉매 충전량이 증가하면 응축기에 액상이 생기면서 응축기의 압력은 높아지고 증발기의 압력은 거의 일정하게 유지되는 특징을 갖는다. 그러나 플러딩 현상(flooding effect)이 없는 초임

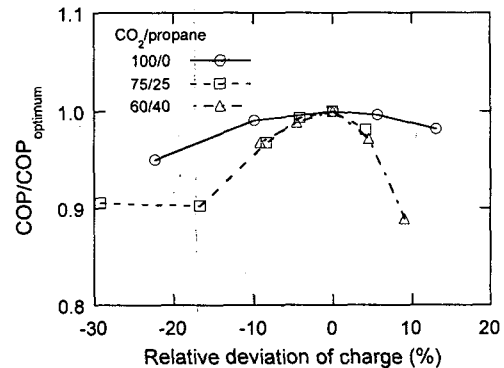
계 사이클에서는 충전량이 증가하면 가스냉각기 압력은 높아지고 증발기 압력은 낮아진다. 이 특징은 이산화탄소의 냉동사이클에 대한 충전량의 영향을 나타낸 Fig. 2의 온도-엔탈피 선도에서 확



(a) Specific refrigerating effect



(b) Specific compression work



(c) COP

Fig. 7 Performance referenced to the value at optimum charge.

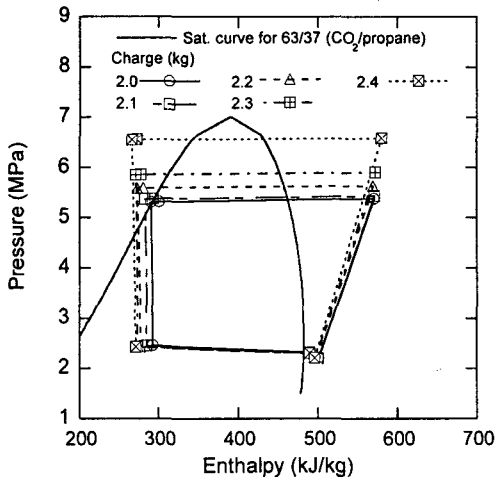


Fig. 8 Pressure-enthalpy diagram of CO₂/propane mixture (60/40 wt%) for different charging amounts.

인할 수 있다. 이로 인해 Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)에 나타난 것처럼, 이산화탄소의 단위냉방효과는 최적 충전량 이상에서 상대적으로 지속적으로 증가하고 압축기의 단위소요일은 최적 충전량 이하에서 다른 냉매에 비해 지속적으로 감소한다. 따라서 초임계 사이클을 형성하는 냉동시스템은 최적 충전량을 기준으로 비교적 넓은 범위에서 충전량의 변화에 대해 덜 민감하게 성능계수가 변한다.

3.5 최적 충전량

냉매 간 성능 비교를 위해서는 일반적으로 대량 냉매들에 대해 과열도, 과냉도, 2차유체 조건 등을 동일하게 적용하고 실험을 수행해야 한다. 그러나 이산화탄소와 같이 초임계 사이클을 형성하는 냉매들은 통상적으로 과냉의 개념을 갖지 않는다. 따라서 과냉도와 유사한 물리적 의미를 갖는 실험조건으로 과냉도 조건을 대체하는 것이 필요하다. 동일한 외기조건에서는 과냉도가 충전량의 함수이므로, 과냉도를 대신하는 조건으로 최적 충전량 개념을 도입하였다. 여기서 최적 충전량은 냉동시스템의 성능계수가 최대가 되는 냉매량을 의미한다. 과냉도가 정의되어 있지 않은 냉매가 포함되어 있는 경우 각 냉매의 최적 충전량에서 얻어진 성능을 기준으로 비교하는 것이 엄밀한 성능해석을 위해 필요하다.

4. 결론

환경친화적이고 열역학적 성질이 우수한 이산화탄소와 프로판 두 성분의 혼합냉매를 대체냉매로 선택하여 성능실험을 수행하였다. 이산화탄소와 이산화탄소/프로판 혼합냉매(85/15, 75/25, 60/40 wt%)에 대해 여러 조건에서 성능에 대한 충전량의 영향을 고찰하였다. 또한 충전시의 냉매 성분비와 다른 값을 갖는 시스템 작동시의 순환 성분비를 측정하고 조건에 따른 순환성분비의 변화 등을 고찰하였다.

(1) 충전량에 따라 냉방성능계수는 증가하다가 감소한다. 이산화탄소가 시스템에 적게 충전된 경우에는 팽창밸브와 내부 열교환기에서의 일손실이 많으며, 과충전인 경우에는 가스냉각기, 증발기, 압축기 등에서의 일손실이 전체 일손실에서 차지하는 비중이 크다.

(2) 여러 조건에서 각 냉매의 최적 충전량을 실험을 통해 구하였다. 제작된 냉방실험장치에서 이산화탄소와 85/15, 75/25, 60/40 이산화탄소/프로판 혼합냉매의 최적 충전량은 각각 2.83, 2.55, 2.40, 2.20 kg로 결정되었다. 프로판의 액상 밀도가 이산화탄소에 비해 작기 때문에 동일 시스템에서 최적 충전량은 프로판의 성분비가 증가함에 따라 감소하였다.

(3) 초임계 사이클과 아임계 사이클 간의 성능 비교를 위한 기준조건으로 최적 충전량 개념을 도입하였다. 과냉도가 정의되지 않은 초임계 사이클을 포함하는 냉매 간의 비교에서는 최적 충전량에서 얻은 성능을 기준으로 서로를 비교하는 것이 엄밀한 성능해석을 위해 필요하다.

(4) 아임계 사이클의 경우 충전량이 증가함에 따라 응축기에 액상의 냉매가 생기고 이로 인해 응축기의 압력은 상승하며 증발기 압력은 거의 일정하게 유지된다. 이와 달리 초임계 사이클에서는 가스냉각기에 액상이 존재하지 않기 때문에 충전량이 증가함에 따라 가스냉각기 압력은 증가하지만, 증발기 압력은 감소한다. 따라서 아임계 사이클에 비해 초임계 사이클에서 최적 충전량 기준으로 좀더 넓은 충전량 범위에서 최적 성능계수와 비슷한 수준으로 시스템이 작동할 수 있다.

(5) 시스템 운전시 혼합냉매의 순환성분비를 측정하였다. 이산화탄소/프로판 충전성분비가 85/15 인 혼합냉매의 순환성분비는 0.880이었고, 75/25

혼합냉매는 0.780~0.785, 60/40 혼합냉매는 0.630~0.635의 순환성분비를 나타냈다. 충전량이나 작동조건에 대해 혼합냉매의 순환성분비가 크게 변하지 않은 것은 시스템 내 냉매 총질량의 약 60%를 차지하는 수액기가 초임계 상태 또는 액상 상태의 냉매로 충전되어 있어서 상대적으로 시스템에 2상 상태 냉매가 적었기 때문이다.

변온증발혼합냉매의 순환성분비는 냉동시스템, 외기조건, 냉매의 종류와 충전량 등에 따라 달라지므로 하나의 시스템 변수가 된다. 따라서 작동중의 순환성분비는 측정 등을 통해 파악되어야 하며, 변온증발혼합냉매를 대상으로 성능실험을 수행하는 경우 충전성분비가 아닌 순환성분비를 기준으로 냉매의 과열도, 엔탈피, 엔트로피 등을 계산해야 한다.

후 기

본 연구는 특정물질사용합리화기금출연사업 및 마이크로열시스템연구센터의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사하는 바이다.

참고문헌

- Lorentzen, G., 1994, Revival of carbon dioxide as a refrigerant. *Int. J. Refrig.*, Vol. 17, No. 5, pp. 292-301.
- Pettersen, J., Aarli, R., Neksa, P., Skaugen, G. and Aflekt, K., 1997, A comparative evaluation of CO₂ and HCFC-22 room air conditioners, *Proceeding of IEA-IIR Workshop-CO₂ Technology in Refrigeration, Heat Pump and Air Conditioning Systems*, Trondheim, Norway, pp. 177-191.
- Hwang, Y. and Radermacher, R., 1998, Experimental evaluation of CO₂ water heater, *Proceedings of the IIR-Gustav Lorentzen Conference (Natural Working Fluids' 98)*, Oslo, Norway, pp. 321-328.
- Brown, J. S., Yana-Motta, S. F. and Domanski, P. A., 2002, Comparative analysis of an automotive air conditioning systems operating with CO₂ and R134a, *Int. J. Refrig.*, Vol. 25, No. 1, pp. 19-32.
- Fartaj, A., Ting, D. S. K. and Yang, W. W., 2004, Second law analysis of the transcritical CO₂ refrigeration cycle, *Energy Conversion & Management*, Vol. 45, pp. 2269-2281.
- Didion, D. A. and Bivens, D. B., 1990, Role of refrigerant mixtures as alternatives to CFCs, *Int. J. Refrig.*, Vol. 13, pp. 163-175.
- Kim, M. S., Mulroy, W. J. and Didion, D. A., 1994, Performance evaluation of two azeotropic refrigerant mixtures of HFC-134a with R-290 (propane) and R-600a (isobutane), *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 116, pp. 148-154.
- Chen, J. and Kruse, H., 1995, Calculating circulation concentration of zeotropic refrigerant mixtures, *HVAC&R research*, Vol. 1, No. 3, pp. 219-231.
- Lemmon, E. W., McLinden, M. O. and Huber, M. L., 2002, Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties (REFPROP), NIST Standard Reference Database 23, Version 7.0, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA.