

냉매충전량이 초임계 이산화탄소 사이클의 냉방성능에 미치는 영향에 대한 연구

조 홍 현, 류 창 기, 김 용 찬*, 심 윤 희**

고려대학교 기계공학과 대학원, *고려대학교 기계공학과, **경민대학 에너지환경과

Effects of Refrigerant Charge Amount on the Cooling Performance of a Transcritical CO₂ Cycle

Honghyun Cho, Changgi Ryu, Yongchan Kim*, Yunhee Sim**

Graduate School of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

**Department of Energy & Environment, Kyungmin College, Gyeonggi-do 480-701, Korea

(Received December 16, 2004; revision received March 10, 2005)

ABSTRACT: The cooling performance of a transcritical CO₂ cycle varies significantly with a variation of refrigerant charge amount. In this study, the performance of the CO₂ system was measured and analyzed by varying refrigerant charge amount at a standard test condition. Besides, the losses of the major components in the CO₂ system were estimated by evaluating entropy generation with refrigerant charge amount. The losses in the expansion device and the gascooler show the major portion of the total loss. For undercharging conditions, the expansion loss dominates the overall system performance, while the gascooler loss increases significantly with an increase of refrigerant charge amount.

Key words: Carbon dioxide(이산화탄소), Refrigerant charge amount(냉매충전량), Entropy(엔트로피), COP(성능계수), Loss(손실)

기 호 설 명

하첨자

COP : 성능계수
 m : 질량유량 [kg/s]
 P : 압력 [kPa]
 s : 단위 엔트로피 [kJ/kg·K]
 ΔS : 엔트로피 생성률 [kW/K]

ae : 증발기 통과 공기
 ag : 가스쿨러 통과 공기
 $comp$: 압축기
 $cooling$: 냉방
 e : 증발기
 ex : 팽창장치
 g : 가스쿨러
 i : 임의의 열역학적 과정
 r : 냉매
 sys : 시스템

† Corresponding author

Tel.: +82-2-3290-3366; fax: +82-2-921-5439

E-mail address: yongckim@korea.ac.kr

1, 2, 3... : 측정 지점(Fig. 1)

1. 서 론

환경규제에 대한 관심과 제약이 증가됨에 따라 새로운 냉매에 대한 관심이 증대되고 있으며, 그 중 자연냉매가 관심의 대상이 되고 있다. 자연냉매는 환경적인 측면에서 오존층 파괴와 지구 온난화에 미치는 영향이 매우 적다. 자연냉매인 이산화탄소를 적용한 시스템에 대한 연구는 자동차용 에어컨, 가정용 급탕기, 가정용 열펌프, 그리고 대형 냉동기에까지 점차 그 영역이 넓어지고 있다. 이산화탄소를 적용한 냉난방기기의 개발에 대한 연구는 국내에서도 활발히 진행되고 있는 실정이다.

이산화탄소를 적용한 냉방시스템의 경우 외기 조건에 크게 영향을 받으며, 냉매의 임계온도가 낮고 작동압력이 높기 때문에 기존의 냉매를 적용한 아임계 사이클보다 열역학적으로 낮은 성능을 나타낸다.^(1,2) 이산화탄소 사이클의 경우 주어진 운전조건에서 압축기 토출압력의 영향이 매우 크고, 냉방 및 난방운전시 최적의 토출압력이 다르게 존재한다. 이산화탄소 사이클에서 압축기 토출압력은 기본적으로 사이클의 냉매충전량에 의하여 결정되기 때문에 냉매충전량이 사이클의 성능에 미치는 영향은 매우 크다.

Hwang et al.⁽³⁾은 이산화탄소를 적용한 사이클의 냉난방 성능에 관한 실험과 시뮬레이션을 통하여 내부 열교환기, 팽창기, 액분사 냉각 가스쿨러, 2단압축 사이클의 적용에 따른 성능향상 정도를 비교 고찰하였다. Neksa et al.^(1,4)과 Hrnjak et al.⁽⁵⁾은 이산화탄소 사이클의 성능에 큰 영향을 미치는 압축기 토출압력(가스쿨러 압력)의 제어를 통한 사이클 성능향상에 관한 연구를 수행하였다. 또한, Halozan et al.⁽⁶⁾과 Hafner et al.⁽⁷⁾은 이산화탄소를 이용한 급탕시스템에서 내부 열교환기를 적용한 경우, 각각의 성능의 변화에 대한 연구를 다른 냉매와 비교하여 진행하였다. Kim et al.⁽⁸⁾은 이산화탄소 시스템의 각 요소들의 성능향상에 관한 전반적인 내용을 정리하였다. Choi et al.⁽⁹⁾은 R407C를, 그리고 Park et al.⁽¹⁰⁾은 R410A를 적용한 시스템에서 냉매충전량에 따른 성능특성을 R22를 적용한 사이클과 비교하여 연구하였다. Ha⁽¹¹⁾는 R22를 적용한 사이클에서 냉매충전

량과 냉매분배에 따른 사이클 성능변화를 고찰하였다. 또한, Kim et al.⁽¹²⁾은 냉매충전량 변화에 따른 이산화탄소 사이클의 성능변화와 열펌프의 용량조절에 대한 연구를 수행하였다. Cho et al.^(13,14)은 압축기 주파수와 EEV 개도 및 내부 열교환기의 길이 변화에 따른 사이클 성능특성을 연구하였다.

국내의 이산화탄소를 이용한 시스템에 대한 연구는 아직 초기단계에 있고, 실험을 통한 사이클 특성에 대한 체계적인 고찰과 각 구성품의 손실에 대한 연구가 필요하다. 특히, 이산화탄소 사이클은 냉방성능이 기존 냉동사이클보다 낮게 나타나기 때문에 냉매충전량에 따른 성능 및 손실분석을 통하여 사이클 성능을 향상시킬 수 있는 방법에 대한 연구가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 압축기 회전수와 EEV 개도를 고정시키고 냉매충전량을 변화시키면서 성능을 측정하였다. 또한, 이산화탄소 시스템의 중요 부품들에 대하여 열역학 제2법칙에 적용하여 냉매충전량의 변화에 따른 손실을 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

냉매충전량의 변화에 따른 이산화탄소 시스템의 냉방성능을 측정하기 위하여 Fig. 1과 같이 실험장치를 설계, 제작하였다. 사이클의 성능 측정을 위하여 열펌프를 두 개의 챔버로 구성된 열량계에 설치하였다. 실험에 사용한 압축기는 덴소(Denso)에서 제작한 정격 난방용량 4.5kW의 스크롤형 가변속 압축기이며, 실내 및 실외 열교환

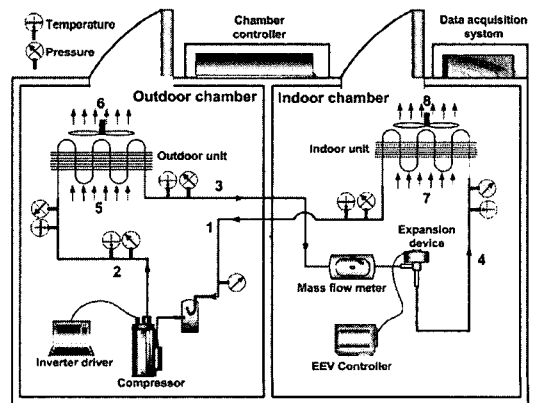


Fig. 1 Schematic of test setup.

Table 1 Experimental uncertainties

Parameters	Uncertainties
Temperature (T-type)	$\pm 0.1^\circ\text{C}$
Pressure transducer	$\pm 0.2\%$ of full scale
Mass flow rate	$\pm 0.2\%$ of reading
Power input	$\pm 0.01\%$ of full scale
Cooling capacity	$\pm 3.7\%$
COP	$\pm 3.7\%$

기는 흰튜브형으로 튜브는 내경 4 mm, 외경 5 mm로 설계하여 내압성을 가지도록 설계하였다. 전자팽창장치(EEV)는 후지꼬기(Fugikoki)에서 제작한 제품을 시스템의 설계용량에 적합하도록 선정하였다. 사이클 각 부분에서 온도와 압력을 측정하기 위하여 열전대와 압력계를 시스템의 주요 부위에 설치하였다. 본 연구에서 측정된 온도, 압력, 냉매유량 및 소비전력에 대한 정확도와 이를 통하여 얻어진 냉동용량 및 성능계수의 불확실도를 Table 1에 나타내었다.

이산화탄소 시스템의 냉방 실험조건은 단일유닛 시험조건인 ASHRAE Standard 116⁽¹⁵⁾에 근거하여 설정하였으며, 냉방용량의 측정은 공기 엔탈피법을 사용하였다. 표준조건은 실외측 건구온도 35°C, 습구온도 24°C로 실내측 건구온도 27°C, 습구온도 19.5°C로 설정하였다. 또한 압축기 주파수는 50 Hz로 일정하게 유지하였으며, EEV의 개도는 전체개도의 49%로 고정하였다. 냉매충전량은 시스템의 체적을 고려하여 1,100 g에서부터 시험을 시작하였으며, 성능의 변화를 관찰하면서 100 g 단위로 냉매충전량을 증가시키면서 성능을 측정하였다.

중기압축 냉방사이클의 충전량 변화에 따른 시스템 성능변화는 주로 어떤 팽창장치를 사용하였는가에 따라 크게 달라진다. 시스템의 각 구성부품의 체적은 일정하지만, 비체적은 시스템의 운전상태에 따라 변하므로 이에 대한 정확한 예측이 어려워 대부분의 경우 반복 실험을 통하여 시스템의 충전량을 결정한다. 본 실험에서도 시스템이 안정적으로 운전되는 상태에서 반복 실험을 통하여 성능을 일정시간 측정하였다.

3. 사이클 손실 해석

냉동시스템의 성능계수는 열역학 1법칙에 근거

하여 냉동용량과 소요동력의 비로 표현하고 있다. 따라서 사이클의 각 부품들이 충전량의 변화에 따라 손실의 변화를 고찰하기 위해서는 열역학 제2법칙의 관점에서 분석을 수행하여야 한다. 이러한 방법을 통하여 손실이 제일 큰 부품을 결정할 수 있고, 이를 이용하여 성능향상 방안을 제시할 수 있을 것이다.

시스템 성능해석을 위하여 열역학 제2법칙을 적용할 때, 각 부분에서 비가역성이 증가하면 손실이 증가된다. 본 연구에서는 전체 시스템의 엔트로피 증가량을 구하고, 전체에서 각 부품의 엔트로피 증가량이 차지하는 비율을 계산하였다. 전체 시스템에 의하여 외부로 발생하는 엔트로피는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta S_{\text{sys}} = m_{ag}(s_6 - s_5) + m_{ae}(s_8 - s_7) \quad (1)$$

또한 외부로 발생된 엔트로피 증가량은 각 부품의 엔트로피 증가량의 합과 같다.

$$\Delta S_{\text{sys}} = \sum \Delta S_i \quad (2)$$

시스템의 구성부품인 압축기, 가스쿨러, 팽창기 및 증발기에서 발생하는 엔트로피의 양은 다음과 같이 계산한다.

$$\Delta S_{\text{comp}} = m_r(s_2 - s_1) \quad (3)$$

$$\Delta S_g = m_r(s_3 - s_2) + m_{ag}(s_6 - s_5) \quad (4)$$

$$\Delta S_{\text{ex}} = m_r(s_4 - s_3) \quad (5)$$

$$\Delta S_e = m_r(s_1 - s_4) + m_{ae}(s_8 - s_7) \quad (6)$$

위의 식들을 사용하여 구한 각 부품의 엔트로피 발생률을 냉매충전량별로 서로 비교 및 고찰하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 2는 냉매충전량의 증가에 따른 가스쿨러와 증발기의 압력, 그리고 증발기 입구의 건도의 변화를 보여주고 있다. 냉매충전량은 상온인 25°C에서 본 시스템의 총체적에 충전된 냉매의 양이 전부 기상으로 이루어질 때를 0으로, 전부 액상으

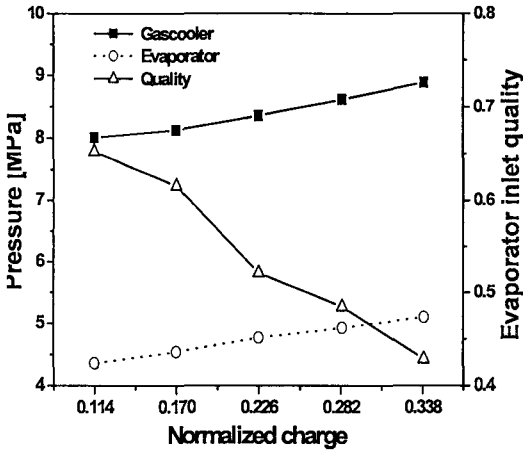


Fig. 2 Variations of pressures in gascooler and evaporator and quality at the evaporator inlet with normalized charge.

Table 2 Refrigerant charge amount vs. normalized charge

Refrigerant charge (g)	Normalized charge
1,100	0.114
1,200	0.170
1,300	0.226
1,400	0.282
1,500	0.338

로 채워질 때를 1로 무차원화하여 나타내었다.⁽¹⁶⁾ Table 2는 무차원화된 냉매충전량의 변화를 실제 충전량에 대하여 나타내고 있다. 시스템의 냉매충전량이 증가하면 시스템의 작동압력은 저압측 뿐만 아니라 고압측까지 전체적으로 증가한다. 냉매충전량이 증가할수록 가스쿨러 압력이 고압으로 형성되기 때문에 이산화탄소 사이클에서 압축기의 압축비가 낮게 고정되어 있는 경우 냉매충전량은 사이클 성능을 결정하는 매우 중요한 요인이 된다.

본 연구에서 제작한 시스템의 경우, 무차원화된 냉매충전량이 0.114에서 0.338로 증가할 때, 고압측은 8.0 MPa에서 8.9 MPa로 0.9 MPa 증가했으며, 저압측은 4.4 MPa에서 5.1 MPa로 0.7 MPa 증가하였다. 증발압력의 상승은 증발기 입구의 온도를 상승시켜 외기와의 온도차를 감소시키고 냉동용량의 감소를 유발한다. 반면 압축기 입출구의 압력차를 감소시켜 시스템을 통과하는 냉매유

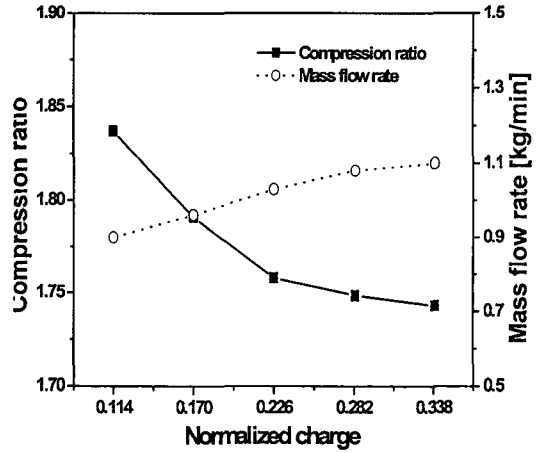


Fig. 3 Variations of compression ratio and mass flow rate with normalized charge.

량을 증가시키고 이에 냉동용량은 증가된다. 따라서 일반적인 시스템에서 냉방용량은 이 두 요소에 의하여 결정된다. 하지만 이산화탄소 사이클에서는 두 요소 이외에 가스쿨러 압력변화에 따라 증발기 입구의 건도가 크게 변화하는 특성이 있으며, 가스쿨러 압력이 냉방용량의 결정에 크게 기여하는 요인이 된다.

냉매충전량이 증가하면 외기와의 열교환을 통하여 냉각되는 가스쿨러 출구의 온도는 약간씩 증가하지만 가스쿨러 출구의 엔탈피는 점점 감소하여 증발기 입구의 건도도 감소하게 된다. 본 시스템에서는 무차원화된 냉매충전량이 0.114에서 0.338로 증가할 때, 증발기 입구의 건도는 0.65에서 0.42로 낮아지는 것으로 확인되었다. 특히, 무차원화된 냉매충전량이 0.170에서 0.226으로 증가될 때 그 감소폭이 크게 나타났다.

Fig. 3은 무차원화된 냉매충전량 변화에 따른 압축기의 압축비와 사이클에 흐르는 냉매유량의 변화를 나타내고 있다. 냉매충전량이 증가할수록 압축비는 감소하는 경향을 보인다. 특히, 냉매충전량이 낮은 부분에서는 압축비가 크고 그 기울기는 냉매충전량이 증가될수록 점점 줄어드는 경향을 나타낸다. 이는 압축기의 토출압력의 변화가 크지 않은 영향도 있지만 증발기의 압력이 높아지는 데 그 주요한 원인이 있다. 이와 반대로 시스템에 흐르는 냉매유량은 냉매충전량이 증가할수록 증가하게 된다. 하지만 냉매충전량이 증가할수록 시스템에 흐르는 냉매유량의 증가비는

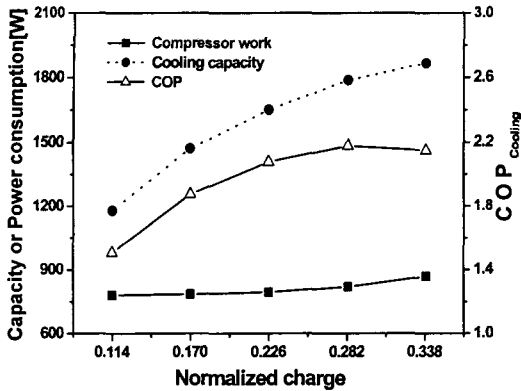


Fig. 4 Variations of compressor work, cooling capacity and COP with normalized charge.

감소하는 경향을 나타낸다. 따라서 시스템의 냉매충전량이 계속적으로 증가하더라도 시스템을 흐르는 냉매유량은 계속적으로 증가하지 않을 것으로 판단된다.

냉매유량이 증가하면 압축기의 소요동력이 증가하는 반면 시스템의 냉방용량은 증가하게 된다. 따라서 각 사이클의 운전특성을 파악하여 적절히 냉매유량을 제어하면 시스템의 성능을 향상시킬 수 있다. 본 연구에서 제작한 시스템의 경우, 무차원화된 냉매충전량이 0.114에서 0.338로 증가할 때 압축비는 1.84에서 1.74로 약 5.1% 감소하였고, 질량유량은 0.92 kg/min에서 1.09 kg/min로 약 20% 증가한 것으로 나타났다.

Fig. 4는 무차원화된 냉매충전량 변화에 따른 압축기 소요동력, 냉방용량, 그리고 냉방 성능계수의 변화를 나타내고 있다. 냉매충전량이 증가할수록 압축기 소요동력과 냉방용량은 모두 증가하는 경향을 나타낸다. 그러나 압축기 소요동력의 경우 소요동력의 증가비가 계속적으로 증가하는 경향을 보이는 반면 냉방용량의 경우 그 증가비는 감소하는 경향을 보인다. 냉방 성능계수는 낮은 충전량에서 크게 증가하다가 그 기울기가 점점 감소하고 무차원화된 냉매충전량이 0.282일 때 최대의 성능을 보였다. 이때 최대 냉방 성능계수는 2.18로 나타났다. 그러나 무차원화된 냉매충전량이 0.338이 되면 냉매는 과충전이 되고 이에 성능이 감소한다. 적절한 냉매를 시스템에 충전하면 최적의 운전압력까지 가스쿨러 압력을 상승시키며, 이에 사이클 성능은 향상된다. 하지만

과도한 냉매의 충전은 약간의 냉방용량의 상승을 가져올 수 있으나 압축기의 소요일이 크게 증가하여 시스템의 성능은 감소하게 된다. 본 연구에서 제작한 시스템의 경우, 무차원화된 냉매충전량이 0.114에서 0.338로 증가할 때 압축기 소요동력은 약 11% 증가하였고, 냉방용량은 5.8% 정도 증가한 것으로 나타났다. 또한 냉방 성능계수는 무차원화된 냉매충전량이 0.114에서 0.282로 증가할 때, 1.51에서 2.18로 약 44.4% 증가하는 것으로 확인되었다.

Fig. 5는 무차원화된 냉매충전량이 0.170에서 0.338로 증가할 때 시스템의 각 부분의 상태를 압력-엔탈피 선도에 나타낸 것이다. 무차원화된 냉매충전량이 0.170인 경우, 외기온도 35°C의 작동조건에서 압축기 출구의 압력이 높지 않기 때문에 압축기 출구와 가스쿨러 출구의 엔탈피차가 크지 않으며 이에 냉동용량도 감소함을 확인할 수 있다. 반면에 무차원화된 냉매충전량이 0.170에서 0.226으로 증가할 때, 작은 토출압력 차이임에도 불구하고 냉동용량이 크게 증가됨을 볼 수 있다. 그러나 무차원화된 냉매충전량이 0.226 이후에는 그 증가 정도가 작거나 거의 일정해진다. 또한 증발기 입구의 건도도 냉매충전량이 증가될수록 감소하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 무차원화된 냉매충전량이 0.170에서 0.226으로 증가할 때, 건도는 크게 감소하였다.

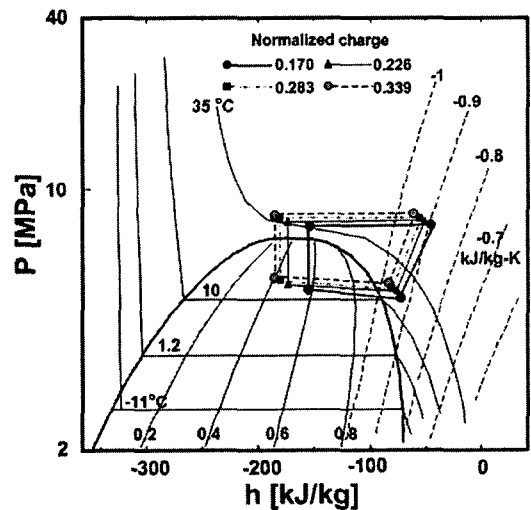


Fig. 5 Variations of pressure-enthalpy diagram with normalized charge.

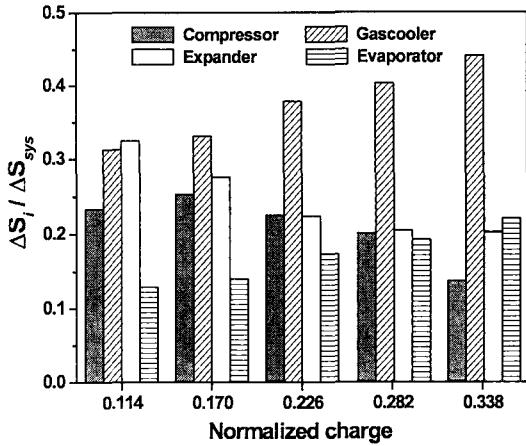


Fig. 6 Effects of normalized charge on the ratio of entropy generation in each component to total entropy generation.

Fig. 6은 시스템 전체의 엔트로피 발생량에 대한 각 부품의 상대적인 엔트로피 발생량을 비교하여 나타내고 있다. 낮은 충전량인 0.114의 경우 팽창손실이 32%로 가장 큰 비중을 차지하였으며, 다음으로 가스쿨러와 압축기가 31%와 23%로 나타났다. 반면에 충전량이 높은 0.338인 경우 가스쿨러 손실이 전체의 44%로 가장 크게 나타났으며, 그 다음으로 증발기가 22%, 팽창장치가 20%를 차지하는 것으로 나타났다. 낮은 충전량 조건에서 팽창장치의 손실이 가장 크게 나타났으며 냉매충전량이 증가할수록 그 손실은 줄어들어 전체적으로 약 12% 감소하였다. 반면 가스쿨러에서

손실은 냉매충전량이 증가할수록 크게 증가하여 냉매충전량이 증가함에 따라 약 13% 증가하였다. 압축기에서 손실은 낮은 냉매충전량에서는 상대적으로 크게 나타났으나 냉매충전량이 증가할수록 상대적으로 감소하는 경향을 가진다. 이는 압축기에서의 손실이 감소한 것이 아니라 열교환기 기에서 손실이 상대적으로 크게 증가하였기 때문이다. 증발기에서의 손실 또한 냉매충전량이 증가할수록 열교환량이 많아지게 되므로 손실이 증가하였다.

냉매충전량이 증가하면 시스템에서 원하는 최적의 압력을 유지시킬 수 있으며 이에 팽창장치에서의 손실은 줄어들게 된다. Fig. 7은 증발온도를 0°C로 일정하게 고정하고 압축기 토출압력에 따른 등엔탈피 과정을 비교하여 보여주고 있다. 토출압력이 낮은 7 MPa인 경우 등엔탈피 과정에서 기울기가 높은 토출압력을 가지는 과정보다 완만하게 나타나며 이는 팽창과정에서 손실의 증가를 의미한다. 따라서 냉매충전량이 증가되어 압축기 토출압력이 높아질수록 팽창장치에서의 비가역성은 줄어들게 된다.

이산화탄소 사이클의 충전량 변화에 따른 사이클 성능 변화 정도를 비교하기 위하여 다른 냉매를 적용한 시스템과 충전량에 따른 성능을 비교하여 보았다. Fig. 8은 다른 냉매들을 적용한 사이클에서 성능계수비의 변화를 냉매충전량비의 변화에 따라 보여주고 있다. Ha⁽¹¹⁾의 R22를 적용한 시스템과 Choi et al.⁽⁹⁾의 R407C를 적용한 시스템은 용축기 2차유체의 온도를 34°C, 증발기 2차유

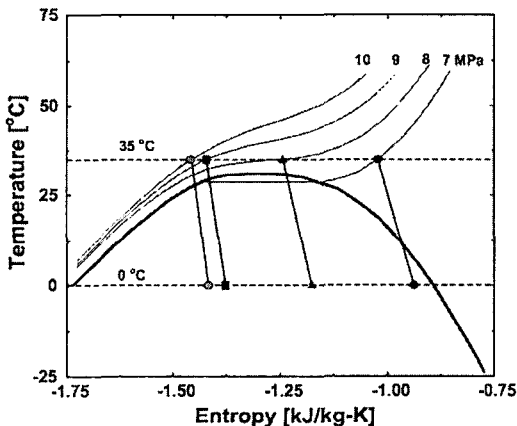


Fig. 7 Isenthalpic processes with inlet pressure of the expansion device.

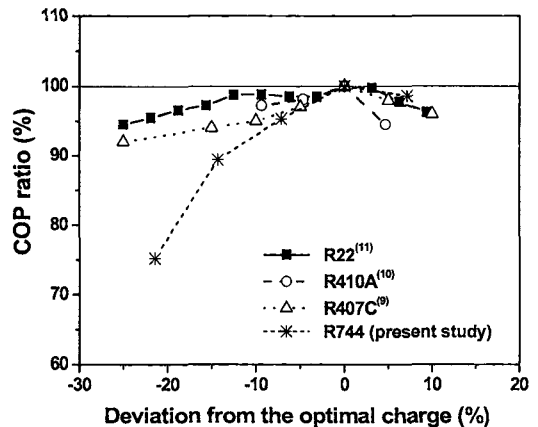


Fig. 8 COP ratios of R22, R410A, R407C and CO₂ cycles with deviation of full charge.

체의 온도를 25℃로 설정하여 실험을 실시하였으며, Park et al.⁽¹⁰⁾의 R410A를 적용한 시스템은 외기온도를 35℃, 실내온도를 27℃로 설정하였다. 또한 Choi et al.⁽⁹⁾과 Park et al.⁽¹⁰⁾은 EEV 개도를 각각의 충전량에 따라 최적제어 하였으며, Ha⁽¹¹⁾는 EEV 개도를 일정하게 유지하며 실험을 실시하였다. 일반적으로 EEV의 최적제어를 통한 사이클이 일정한 개도를 유지한 사이클보다 성능이 우수하게 나타나지만, 각 사이클의 냉매 물성치적 또는 사이클적 특성에 미치는 영향은 상대적으로 작을 것으로 생각된다.

Fig. 8에서 볼 수 있듯이 이산화탄소 사이클의 충전량 변화에 대한 성능변화가 다른 냉매를 사용하는 경우보다 크게 나타남을 확인할 수 있다. 최적충전량에서 냉매가 20% 적게 충전된 경우 이산화탄소 사이클은 성능이 27% 감소하였고 R407C는 8%, 그리고 R22의 경우 4% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 냉매를 10% 정도 적게 충전한 경우 R22는 2%, R410A는 8%, R407C는 6%, 그리고 이산화탄소의 경우 8% 감소하는 것으로 확인되었다. 5% 정도 과충전하였을 때 R22는 2%, R410A는 5%, R407C는 3%, 그리고 이산화탄소의 경우 2% 감소하는 것으로 나타났다. 과충전시 R410A의 성능이 크게 감소하는 것으로 나타났다. 이산화탄소 사이클은 R22, R410A, R407C에 비하여 최적충전량보다 낮은 충전량에서 성능 저하가 상대적으로 크게 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 냉매충전량 변화에 따른 이산화탄소 시스템의 냉방 성능특성을 실험을 통하여 고찰하였으며, 각 부품의 손실을 열역학적 해석을 통하여 비교하였다. 이를 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 냉매충전량이 증가할수록 시스템의 작동압력은 모두 증가한다. 그러나 압축비는 약 5.1% 감소하고 이에 질량유량은 20% 정도 증가하는 경향을 가진다. 또한 증발기 입구의 건도는 점점 감소하게 된다.

(2) 본 연구에서 설계한 시스템의 경우 최적의 무차원화된 냉매충전량은 0.282로 나타났으며, 이때 냉방 성능계수는 2.18로 나타났다.

(3) 낮은 충전량에서는 팽창장치의 손실이 32%

로 가장 크게 나타났으며, 높은 충전량에서는 가스쿨러의 손실이 44%로 가장 크게 나타났다. 또한 냉매충전량이 증가될수록 압축기와 팽창기의 손실은 상대적으로 줄어들고 가스쿨러와 증발기의 손실은 증가되는 경향을 나타냈다.

(4) 충전량이 최적충전량에 비해 20% 작은 경우 이산화탄소 시스템의 성능은 20% 이상 저하되었으며, 충전량 변화에 따른 성능의 변화가 다른 냉매(R22, R410A, R407C)를 적용한 시스템보다 크게 나타나는 것으로 확인되었다.

후 기

본 논문은 산업자원부 차세대 신기술 개발사업의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Neksa, P., Rekestad, H., Zakeri, R. and Schiefloef, P., 1998, CO₂ heat pump water heater: characteristics, system design and experimental results, *Int. Journal of Refrigeration*, Vol. 21, No. 3, pp. 172-179.
2. Hwang, Y. and Radermacher, R., 1999, Experimental investigation of the CO₂ refrigeration cycle, *ASHRAE Transactions*, Vol. 105, Pt. 1, pp. 1219-1227.
3. Hwang, Y., Huff, H., Preissner, R. and Radermacher, R., 2001, CO₂ transcritical cycles for high temperature application, *Proceedings of 2001 ASME Int. Mechanical Engineering Congress in New York, IMECE2001/AES-23630*.
4. Neksa, P., 2002, CO₂ heat pump systems, *Int. Journal of Refrigeration*, Vol. 25, pp. 421-427.
5. Hrnjak, P., Richeter, M., Song, S., Kim, M. and Bullard, C., 2000, Transcritical CO₂ heat pump for residential application, *4th IIR-Gustav Lorentzen Conference*, pp. 9-16.
6. Halozan, H. and Rieberer, R., 2000, CO₂ as refrigerant-possible applications, *4th IIR-Gustav Lorentzen Conference*, pp. 43-50.

7. Hafner, A., 2000, Experimental study on heat pump operation of prototype CO₂ mobile air conditioning system, 4th IIR-Gustav Lorentzen Conference, pp. 177-184.
8. Kim, M., Pettersen, J. and Bullard, C., 2004, Fundamental process and system design issues in CO₂ vapor compression systems, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 30, pp. 119-174.
9. Choi, J. and Kim, Y., 2004, Influence of the expansion device on the performance of a heat pump using R407C under a range of charging conditions, Int. Journal of Refrigeration, Vol. 27, pp. 378-384.
10. Park, T., Lee, M., Jung, J. and Jang, G., 2004, Comparison of performance variation between R22 and R410A refrigerant systems, Korea Journal of Air-conditioning and Refrigeration, Vol. 15, No. 3, pp. 166-176.
11. Ha, J., 1999, Experimental study on the characteristics of flow rate distribution and performance of a multi-heat pump system, MS. Thesis, Korea University, Seoul, Korea.
12. Kim, D., Kim, Y. and Kim, M., 2004, Studies on the capacity control of a heat pump system using carbon dioxide as a working fluid, Proceeding of the SAREK '04 Winter Annual Conference, pp. 517-522.
13. Cho, H., Ryu, C. and Kim, Y., 2004, Experimental study on the cooling performance of a CO₂ cycle with internal heat exchanger, Proceeding of the SAREK '04 Winter Annual Conference, pp. 571-576.
14. Cho, H., Ryu, C. and Kim, Y., 2004, Experimental study on the performance of a CO₂ cycle in the cooling mode, Proceeding of the SAREK '04 Winter Annual Conference, pp. 554-559.
15. ASHRAE, 1983, Methods of testing for seasonal efficiency of unitary air-conditioner and heat pumps, ASHRAE Standard 116.
16. Kim, S., 2002, Study on performance of heat pump for hot water heater and autocascade cycle using CO₂, Ph.D. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.