

운전조건 변화에 따른 이산화탄소 냉방시스템들의 성능 비교

배 경 진, 신 은 성, 조 흥 현^{*†}

조선대학교 기계공학과 대학원, *조선대학교 기계공학과

Comparisons of Performance in CO₂ Systems with Operating Conditions

Kyungjin Bae, Eunsung Shin, Honghyun Cho^{*†}

ABSTRACT: Since the cooling performance of a CO₂ cooling cycle is varied significantly with a variation of refrigerant charge amount and outdoor temperature, the reliability of CO₂ system is down. In this study, the performance characteristics of three kinds of CO₂ systems were measured and analyzed by varying refrigerant charge amount and outdoor temperature so as to study the characteristics of variation with cycle option. The applied system options are the single-stage compression(1C-1E) system, two-stage compression with 1-EEV(2C-1E) system, and two-stage compression with 2-EEV(2C-2E) system. The performances of two-stage compression with 2-EEV system were less sensitive than those of other systems and the system operated safely and steadily for wide charge amount. The performance of the two-stage compression with 1-EEV(2C-1E) system was the most sensitive to the charge amount, and that of the single-stage compression(1C-1E) system varied a lot with outdoor temperature.

Key words: Carbon dioxide(이산화탄소), Coefficient of Performance(COP, 성능계수), Two-stage compression(이단압축), Electronic Expansion Valve(전자팽창밸브)

1. 서론

최근 전세계적으론 친환경 및 고효율에 대한 관심이 높아지면서 여러 가지 새로운 냉매의 개발과 적용에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 일반적으로 기존의 공조기기에 쓰이는 작동유체인 HCFCs, HFCs 계열의 냉매는 오존층파괴와 지구온난화 등을 유발시켜 환경문제에 대한 우려가 야기되고 이에 세계는 국제적인 협약을 통해 지구온난화, 오존층파괴, 독성물질의 유출과 같이

환경에 악영향을 미치는 냉매의 사용을 규제하고 있다. 특히, 기존에 열펌프에 사용되었던 대부분의 냉매들이 규제의 대상이 되어 이를 대체할 새로운 냉매의 개발이 절실하게 요구되고 이에 가장 궁극적인 해결책으로 자연냉매를 이용한 시스템들이 활발히 연구되고 있다. 이 중 이산화탄소를 이용한 열펌프 시스템의 경우 고압의 작동압력에도 불구하고 냉매로써 열역학적 물성치가 뛰어나고 인화성과 독성이 없으며 작은 체적열용량을 가짐으로 시스템의 소형화 설계에 유리하다. 따라서 이산화탄소를 이용한 증기압축 시스템에 대한 연구는 일본, 미국, 그리고 유럽에서 오래전부터 진행되고 있으며 일부 제품들이 이미 출시되어 시장에서 판매되고 있다. 특히, 일본에서는

† Corresponding author

Tel.: +82-62-230-7050; fax: +82-62-230-7055

E-mail address: hhcho@chosun.ac.kr

가스냉각(gascooling)과정의 큰 온도변화를 이용한 이산화탄소용 온수급탕기를 개발하여 판매중이고, 유럽에서는 이산화탄소를 자동차용 공조기에 적용하기 위하여 많은 연구가 진행중이다. 이와 같이 국제적으로 이산화탄소 사이클의 적용과 효율향상을 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며 이산화탄소 사이클의 적용범위도 점차 확대되고 있다.

이산화탄소 사이클의 성능향상과 최적화에 대한 기존의 연구로는 우선 Neksa⁽¹⁾ 등과 Hrnjak⁽²⁾ 등은 이산화탄소 사이클의 성능특성에 관한 연구를 위하여 가스쿨러(gascooler) 압력의 제어를 통한 시스템 성능변화를 해석과 실험적 방법을 이용하여 고찰하였다. 그리고 Sarkar^(3,4) 등은 해석적 방법을 이용하여 여러 가지 이산화탄소 사이클에서 토출압력 변화에 따른 성능을 고찰하고 이에 시스템의 성능유지를 위한 최적의 토출압력에 대한 연구를 진행하였으며, Chen⁽⁵⁾ 등은 내부 열교환기(internal heat exchanger)를 적용한 이산화탄소 사이클에서 가스쿨러 압력변화에 따른 성능변화를 예측하고 가스쿨러압력과 성능에 관한 수식을 개발하였다. 또한 Hwang 등⁽⁶⁾은 이산화탄소를 적용한 이단압축 시스템에서 내부열교환기를 장착하여 실험적 연구를 수행하였다. Kobayshi 등⁽⁷⁾은 이산화탄소 열펌프의 난방과 급탕 실험을 수행하여 저온외기 조건에서 난방성능향상을 위한 연구를 진행하였으며 Hidemine Murahashi⁽⁸⁾은 이산화탄소 급탕 열펌프에 이젝터(ejector)를 적용해 압축기 동력을 줄여 난방성능을 높이기 위한 연구를 수행하였다.

기존의 여러 연구에서 나타났듯이 이산화탄소 사이클의 성능은 기존의 아임계 사이클에 비하여 낮고 외기온도나 가스쿨러 압력에 따른 성능변화가 심하여 시스템의 신뢰성이 저하되고 경쟁력 있는 성능을 유지하기 힘들다. 외기온도가 높은 경우 높은 토출압력을 필요로 하고 이는 압축기 소요동력의 증가로 이어져 시스템의 성능이 급격히 저하된다. 특히 국내에서 이산화탄소 사이클에 따른 성능의 비교 및 민감도에 대한 연구를 기존의 문헌에서 찾아보기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 여러 가지 이산화탄소 냉동시스템들의 성능을 냉매충전량과 외기온도 변화에 따라 측정하고 비교함으로써 각각의 시스템이 가지고 있는 특성을 파악하고 이에 다른 시스템에 비하여 신

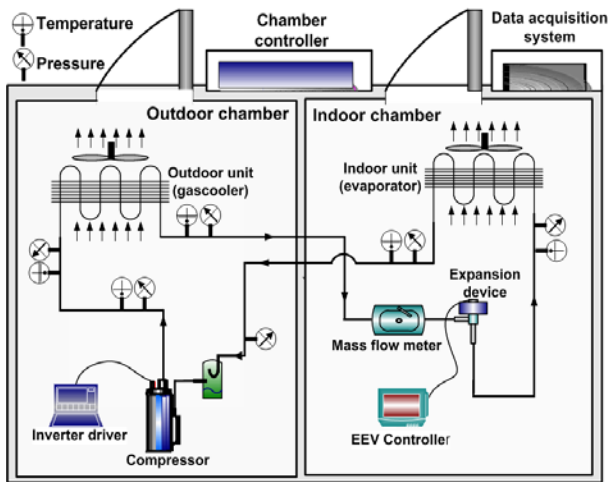
뢰성이 높고 시장 경쟁력 있는 이산화탄소 사이클의 개발을 위한 데이터를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

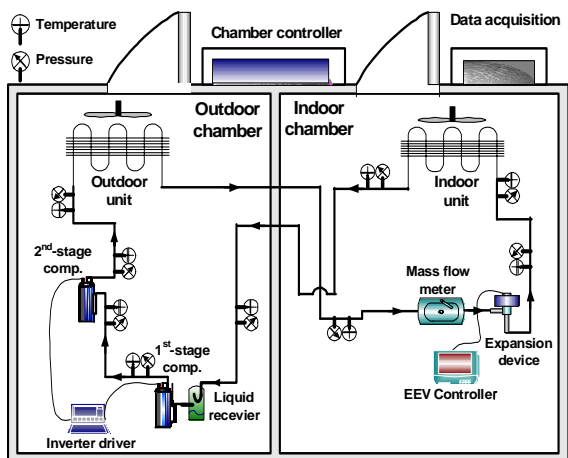
2.1 실험장치

본 연구에서 개발된 여러 가지 이산화탄소 냉방시스템들의 구성도를 Fig. 1에 나타내었다. 이산화탄소 냉방시스템의 냉방성능을 측정하기 위해 실외측 챔버로 구성된 열량계에 설치하였다. 본 연구에서 사용된 압축기는 스크롤 압축기로 난방표준용량은 약 4.5 kW이다. 증발기와 응축기는 핀튜브 형태의 열교환기로 외경은 5 mm, 내경은 4 mm로 고압에 견딜 수 있도록 제작되었다. 또한 열교환 효과를 향상시키기 위하여 오프셋 스트립 핀(offset strip fin)을 사용하였다. 팽창밸브는 후지꼬끼사(Fugikoki) 전자식 팽창밸브로서 여자방식으로 개도가 조절되며 시스템 용량에 맞게 선정하였다.

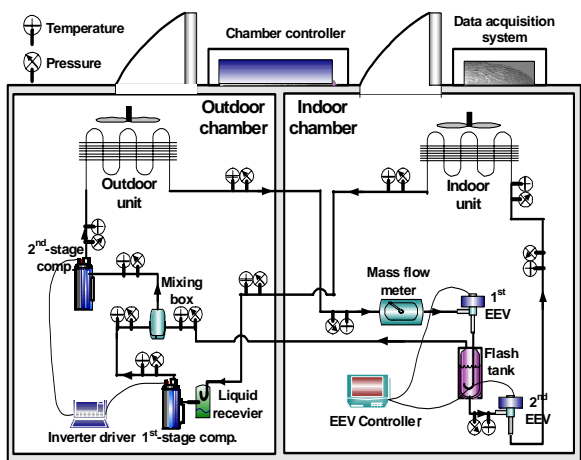
본 연구에서 개발된 이산화탄소 냉방시스템은 세 가지 형태로 Fig. 1에 개략도를 나타내었다. Fig. 1의 (a)에서 보듯 우선 단일압축-단일팽창(1C-1E) 시스템으로 하나의 압축기와 하나의 팽창장치로 구성되어 있는 일반적인 냉방기와 같이 구성되었으며 그림 (b)는 이단압축-일단팽창(2C-1E) 시스템으로 동일한 용량의 두개의 압축기를 직렬로 연결하여 이단압축 시스템을 만들고 하나의 팽창장치를 사용하여 작동되는 시스템으로 구성되었다. 마지막으로 Fig. 1의 (c)에 나타낸 이단압축-이단팽창((2C-2E) 시스템으로 이단압축 시스템(two-stage compression system)을 구성하고 도중에 일단 팽창기에서 나온 차가운 냉매를 인젝션(injection) 할 수 있는 중간냉각(intercooling) 시스템을 적용하여 설계하였다. 각각의 이산화탄소 냉방시스템들이 성능을 측정하기 위하여 주요부위에 온도와 압력, 질량유량을 측정하기 위한 열전대, 압력계, 질량유량계를 설치하였다. 본 연구에서 이산화탄소 냉방시스템들의 민감도를 비교하기 위하여 각 부분에서의 물성치 측정에 사용된 실험장치의 정확도와 이를 통하여 얻어진 냉방용량 및 성능계수의 불확실도를 Table 1에 나타내었다.



(a) 1C-1E system



(b) 2C-1E system



(c) 2C-2E system

Fig. 1 Schematics of three kinds of CO₂ cooling systems.

Table 1 Experimental uncertainties

Parameters	Errors
Temperature(T-type)	±0.1°C
Pressure transducer	±0.2% of full scale
Mass flow rate	±0.2% of reading
Power input	±0.01% of full scale
Cooling capacity	±3.71%
COP	±3.73%

Table 2 Test conditions

Parameters	Value
Indoor temperature (db,wb(°C))	27/19.5°C
Outdoor temperature (db,wb(°C))	Standard=35/24°C Variable=30/20.1°C, 32.5/22°C, 35/24°C, 37.5/25.9°C
EEV opening (First/Second(%))	1C-1E=49 2C-1E=49 2C-2E=56/42
Compressor frequency (First/Second(Hz))	1C-1E=50 2C-1E=50/30 2C-2E=40/40

2.2 실험 방법

일반적으로 시스템의 각 구성부품의 용적은 일정한 값을 가지지만, 비체적은 시스템의 운전 상태에 따라 변하므로 정확한 예측이 어려워 대부분의 경우 반복 실험을 통하여 시스템의 냉매 충전량을 결정한다. 본 연구에서는 정격 부하조건에서 압축기 회전수, 전자팽창밸브 개도, 냉매 충전량, 외기온도를 변화시켜가면서 실험을 수행하였으며, 우선 최적의 냉매충전량 결정 실험을 실시하였다. 이산화탄소 시스템의 냉방 실험조건을 설정하기 위하여 우선 단일유닛 시험 조건인 ASHRAE STANDARD 116⁽⁹⁾에 근거하여 온도와 습도 등의 조건을 설정하였다. 본 실험에서 설정된 각 사이클 사양별 EEV 개도와 압축기 회전수, 그리고 설정된 외기조건을 Table 2에 나타내었다. 각 시스템의 실험조건(압축기 주파수, EEV 개도)은 각각의 운전특성과 최적의 운전 조

건을 고려하여 서로 가장 유사한 운전조건으로 설정하였다. 우선 표준외기조건(외기온도=35/24°C, 실내온도=27/19.5°C)에서 각각의 냉매충전량 변화실험을 실시하여 최적의 냉매충전량을 찾고 이를 기준으로 냉매충전량 변화에 따른 성능변화를 시스템 사양에 따라 비교 및 고찰하였다. 이후 외기온도 변화에 따른 성능측정을 위하여 실내온도는 27/19.5°C로 고정하고 실외온도를 30°C에서 37.5°C까지 2.5°C씩 변화시켜가면서 성능을 측정하여 비교하였다. 본 연구에서 측정된 시스템의 열량은 냉매 엔탈피법을 이용하여 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 냉매충전량 변화에 따른 시스템 사양별 냉방성능 비교

Fig. 2는 각 사이클별 압축기 소요동력비의 변화를 냉매충전량 변화에 따라 비교하여 보여주고 있다. 일반적으로 냉매충전량이 증가할수록 증발기와 가스쿨러의 압력은 증가하게 된다. 하지만 증발기의 압력의 증가정도가 가스쿨러의 압력의 증가정도에 비하여 더 크게 나타나기 때문에 냉매충전량이 증가할수록 압축비는 감소하게 된다. 반면에 압축기 입구의 밀도는 증가하고 시스템의 압축비 감소로 인하여 압축기에 들어가는 소요동력은 최적충전량 전까지 냉매충전량에 비례하여 증가하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 단일압축-단일팽창(1C-1E) 시스템과 이단압축-단일팽창(2C-1E) 시스템에서 잘 보여주고 있다. 그러나 이단압축-이단팽창(2C-2E) 시스템의 경우 냉매충전량 변화에 따라 압축기 소요동력의 변화가 작게 나타나고 있는데 이는 중간냉각을 위하여 차가운 냉매가 일단과 이단의 압축기 사이에 주입되기 때문이다. 즉, 냉매충전량이 감소하였을 때 일단의 압축기 출구와 일단의 EEV 사이의 압력의 증가로 많은 양의 냉매가 압력차에 의하여 이단의 압축기 입구로 주입되게 되고 이에 이단의 압축기 소요동력의 증가로 이어져 저충전량 부분에서도 소요동력은 감소폭이 작아진다. 중간냉각효과로 어느 정도의 압축기 소요동력의 감소를 예상할 수 있지만 본 연구에서는 이단의 압축기로 유입되는 냉매의 증가로 인하여 압축기 소요동력의 감소정도가 미미하게 나타났다. 냉매충

전량 변화에 따른 압축기 소요동력에 대한 민감도는 이단압축-단일팽창 시스템이 가장 큰 것으로 확인되었다.

Fig. 3은 냉매충전량 변화에 따른 시스템 사양별 냉방용량비의 변화를 비교하여 나타내고 있다. 냉방용량은 최적충전량 전까지 냉매충전량이 비례하여 증가하는 형태를 보인다. 모든 시스템 사양에 대하여 저충전량 부분에서의 냉방용량의 증가정도는 크게 나타났으며 과충전량 부분에서의 냉방용량의 감소정도는 상대적으로 작은 것으로 나타났다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 냉매충전량 변화에 따른 냉방용량의 변화는 이단압축-단일팽창 시스템이 가장 큰 것으로 확인되었으며 반면 이단압축-이단팽창이 가장 작은 변화를 보였다. 이는 이단압축-이단팽창의 경우 인젝션에 의하여 저충전량 영역에서 압축기 토출압력을 일정압력 이상으로 유지할 수 있어 냉방용량의 감소정도가 상대적으로 작게 나타나기 때문이다. 본 연구에서 냉매충전량이 -14%인 경우 냉방용량은 1C-1E 시스템, 2C-1E 시스템, 2C-2E 시스템에 대하여 각각 17.1%, 27%, 그리고 5.1% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 반면 6% 과충전된 경우 1C-1E 시스템, 2C-1E 시스템의 경우 3.4%와 3.5% 증가하는데 반하여 2C-2E 시스템의 경우 1.5% 감소하는 것으로 확인되었다.

각각의 냉방시스템별 냉매충전량에 따른 시스템별 냉방성능계수비의 변화를 Fig. 4에 비교하여 보여주고 있다. 이산화탄소 시스템에서 냉매충전량이 증가하면 냉매의 평균밀도는 증가하지만 시스템에 흐르는 냉매유량이 계속적으로 증가하지는 않는다. 그러나 적절한 냉매의 충전은 이산화탄소 사이클의 최적의 운전 압력까지 가스쿨러 압력을 상승시키며, 이에 최대의 성능을 보인다. 하지만 더 많은 냉매의 충전은 냉방용량의 상승을 가져올 수 있으나 과도한 압축기 일의 증가로 인하여 시스템의 성능은 감소하게 된다. 냉매충전량 변화에 따른 시스템 성능계수의 변화는 압축기 소요동력과 냉방용량의 변화가 가장 민감했던 이단압축-단일팽창 시스템이 가장 큰 것으로 나타났으며 넓은 냉매충전량 운전범위에서 시스템 성능의 변화가 가장 적었던 이단압축-이단팽창 시스템이 가장 적은 성능의 감소를 보여주고 있다. 이단압축-이단팽창 시스템의 경우 냉매의 일부가 일단의 압축기와 이단의 압축기 사이

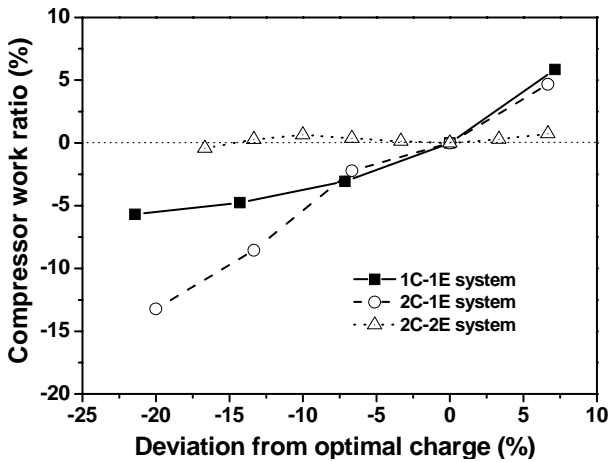


Fig. 2 Comparison of compressor work with the deviation from optimal charge.

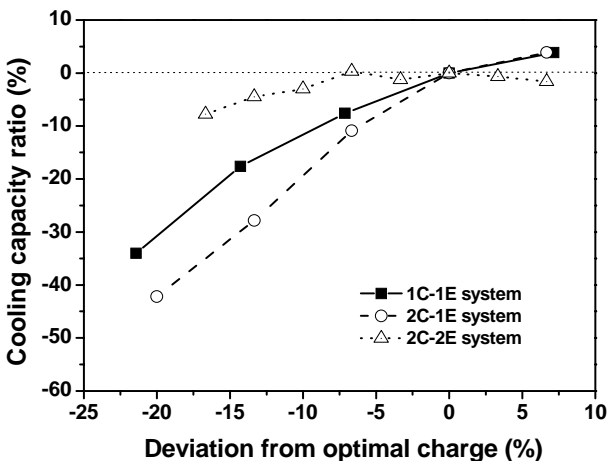


Fig. 3 Comparison of cooling capacity with the deviation from optimal charge.

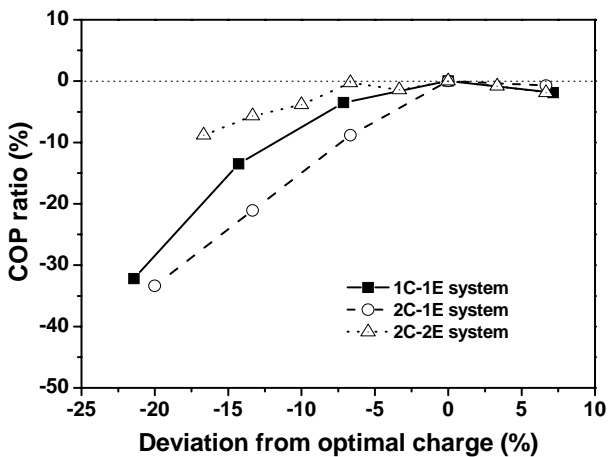


Fig. 4 Comparison of cooling COP with the deviation from optimal charge.

로 주입됨으로써 이단 압축기 입구의 냉매온도를 감소시켜 압축기의 체적효율을 증가시키며 가스쿨러에 유입되는 냉매의 유량의 증가로 인하여 냉방용량은 증가하게 된다. 따라서 냉방용량의 변화와 압축기 소요동력의 변화가 넓은 냉매충전량 영역에서 작게 나타나기 때문에 상대적으로 냉매충전량 변화에 시스템 성능은 안정적이며 이에 이산화탄소 냉방시스템 성능의 신뢰성이 높음을 확인할 수 있다.

3.2 외기온도 변화에 따른 시스템 사양별 냉방 성능 비교

이산화탄소 사이클은 외기온도 변화에 매우 민감하기 때문에 외기온도에 따른 시스템 성능변화를 고찰하는 것은 시스템의 신뢰성 향상을 위하여 매우 중요하다. 본 연구에서는 외기온도 변화에 따른 시스템 사양별 성능의 민감도를 비교하기 위하여 외기온도를 30°C에서 37.5°C까지 2.5°C씩 변화시키면서 성능을 측정하여 비교 및 고찰하였다. Fig. 5는 외기온도 변화에 따른 이산화탄소 냉방시스템 사양별 압축기 소요동력비의 변화를 보여주고 있다. 외기온도가 증가할수록 가스쿨러의 압력은 증가되어 압축비가 증가되고 압축과정중 누설의 증가와 압축효율의 감소로 소요동력은 증가하게 된다. 본 연구에서도 모든 사이클 사양에 대하여 이러한 경향이 잘 나타나고 있다. 외기온도가 낮은 운전조건에서는 모든 시스템들이 외기조건에 비슷한 민감도를 나타냈으며 외기온도가 높은 영역에서는 이단압축-일단팽창 시스템의 압축기 소요동력이 가장 크게 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 외기온도 변화에 따른 냉방용량비의 변화를 시스템 사양별로 비교하여 보여주고 있다. 외기온도가 35°C 보다 낮은 경우 냉방용량의 감소정도는 단일압축-단일팽창 시스템이 가장 크게 나타나는 것으로 확인되었으며 다음으로는 이단압축-일단팽창, 그리고 이단압축-이단팽창이 감소정도가 가장 적은 것으로 나타났다. 이단압축-이단팽창 시스템의 경우 고온이나 고압조건에서도 인젝션에 의하여 가스쿨러에서 일정 이상의 압력을 유지하고 시스템에 흐르는 냉매량의 확보로 냉방용량을 일정하게 유지하는 것으로 확인되었다. 또한 이단압축-이단팽창 시스템의 경우 최

적의 가스쿨러 압력도 다른 시스템에 비하여 낮게 형성되기 때문에 높은 외기온도에서도 냉방용량의 감소정도는 작게 나타난다. 단일압축-단일팽창 시스템의 경우 외기온도의 영향이 바로 시스템 운전조건 변화로 이어지기 때문에 외기온도의 변화가 직접적으로 나타나 외기온도 변화에 민감한 것으로 나타났다.

Fig. 7은 외기온도 변화에 따른 냉방성능계수의 변화를 시스템 사양별로 비교하여 보여주고 있다. 외기온도가 상승할수록 압축기의 소요동력은 증가하고 냉방용량은 감소하게 되어 시스템 성능계수는 감소하게 된다. 특히 이산화탄소 사이클에서 외기온도가 상승할 때 성능계수의 감소정도는 크게 나타난다. 본 연구에서는 외기온도 변화에 따른 시스템 민감도는 단일압축-단일팽창 시스템이 가장 큰 것으로 나타났으며 이단압축-이단팽창 시스템이 가장 신뢰성이 높은 것으로 나타났다. 이단압축-이단팽창 시스템에서는 인젝션에 의한 압축기 토출압력이 최적의 압력 이상 유지되며 증발기에서의 낮은 증발온도를 유지함으로써 시스템 성능이 넓은 외기온도 조건에서 유지될 수 있다.

본 연구에서 설명한 바와 같이 이단압축-이단팽창 시스템이 냉매충전량이나 외기온도 변화에 대하여 시스템 성능의 민감도가 가장 적으므로 나타났으며 넓은 영역의 운전조건에서 다른 아임계 사이클과 경쟁하기 위하여 신뢰성 있는 성능을 유지할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는 여러 가지 이산화탄소 냉방시스템들에서 성능의 민감도를 비교 및 고찰하기 위하여 외기온도와 냉매충전량 변화에 따라 시스템 성능을 측정하여 비교하였다. 이를 위하여 일단압축-일단팽창 시스템, 이단압축-일단팽창 시스템, 그리고 이단압축-이단팽창 시스템을 구성하였으며 각각의 시스템에서 최적충전량과 냉매충전량 변화에 따른 성능요소들을 비교·분석하였으며 최적의 냉매충전량에서 외기온도를 변화시키면서 성능을 고찰하였다. 이를 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 냉매충전량 변화에 따른 냉방시스템 성능

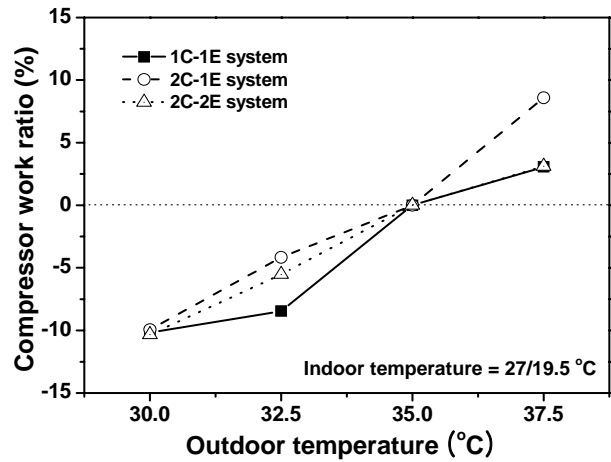


Fig. 5 Comparison of compressor work with outdoor temperature.

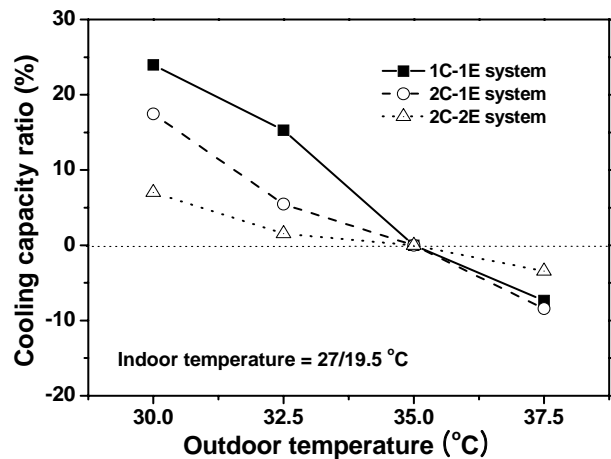


Fig. 6 Comparison of cooling capacity with outdoor temperature.

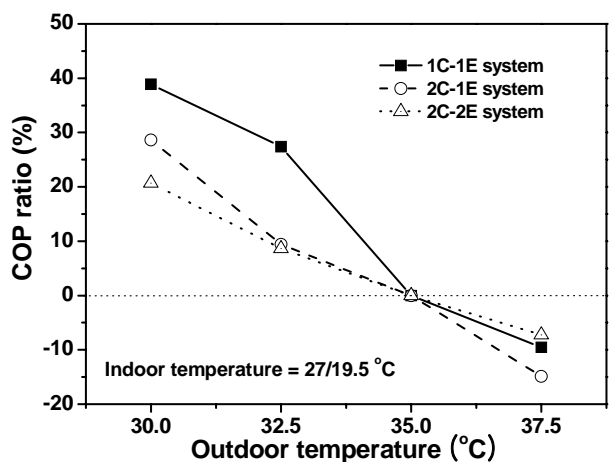


Fig. 7 Comparison of cooling COP with outdoor temperature.

의 민감도는 이단압축-일단팽창 시스템이 가장 큰 것으로 나타났으며 이에 반하여 이단압축-일단팽창 시스템은 넓은 냉매충전량 변화에 대하여 성능의 감소정도가 작은 것으로 나타났다.

(2) 외기온도 변화에 따른 시스템 성능의 변화 정도는 일단압축-일단팽창 시스템이 가장 크게 나타났으며 이단압축-일단팽창 시스템의 경우 일정 이상의 토출압력의 확보로 성능저하가 작게 나타났다.

(3) 냉매충전량이나 외기온도 변화에 따른 시스템의 신뢰성은 이단압축-일단팽창 시스템이 가장 높은 것으로 나타났으며 이를 통하여 넓은 운전조건 변화에도 일정한 성능을 유지할 수 있는 것으로 확인되었다.

후 기

본 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 학술진흥재단의 지원(KRF-2008-313-D00112)을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Neksa, P., Rekstad, H., Zakeri, R., Schiefloe, P., 1998, CO₂-heat pump water heater: characteristics, system design and experimental results, Int. Journal of Refrigeration, Vol. 21(3). pp.172-179.
2. Hrnjak, P., Richeter, M., Song, S., Yin, J., Kim, M., Bullard, C., 2000, Transcritical CO₂ heat pump for residential application, 4th IIR-Gustav Lorentzen Natural Working

- Fluids Conference at Purdue, pp.9-16.3.
3. Sarkar J., Bhattacharyya S., Gopal M., 2004, Optimization of a transcritical CO₂ cycle for simultaneous cooling and heating applications, Int. Journal of Refrigeration, Vol. 27(8), pp.830-838.
4. Sarkar J., Bhattacharyya S., Gopal M., 2006, Simulation of a transcritical CO₂ heat pump cycle for simultaneous cooling and heating applications, Int. Journal of Refrigeration, Vol. 29(5), pp.735-743.
5. Chen, Y., Gu, J., 2005, The optimum high pressure for CO₂ transcritical refrigeration systems with internal heat exchangers, Int. Journal of Refrigeration, Vol. 28(8), pp.1238-1249.
6. Hwang, Y., Radermacher, R., 2002, Options for a two-stage transcritical carbon dioxide cycle, 5th IIR-Gustav Lorentzen Natural Working Fluids Conference at Guangzhou, pp.143-149.
7. Masahiro Kobayashi, 2008, CO₂ Heat Pump Heating and Water Heater System for Cold Area, 9th Int. IEA Heat Pump Conference.
8. Hidemine Murahashi, 2008, Development of Multi-Function CO₂ Heat Pump Water Heater, 9th Int. IEA Heat Pump Conference.
9. ASHRAE, 1983, Methods of testing for seasonal efficiency of unitary air-conditioner and heat pumps, ASHRAE Standard 116.