

이산화탄소 냉동사이클에서 사이클 사양에 따른 최적충전량 변화에 관한 실험적 연구

조 홍 현*, 류 창 기**, 이 호 성**, 김 용 찬†

*삼성전자 DA연구소, **고려대학교 기계공학과 대학원, † 고려대학교 기계공학과

Experimental Study on the Variation of the optimal charge with cycle option in the CO₂ Refrigeration

Honghyun Cho*, Changgi Ryu**, Hoseong Lee**, Yongchan Kim†

*DA R&D Center, Samsung Electronics Co. LTD., Suwon 442-742, Korea

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

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

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 with a change of cycle option. The applied cycle options are the single-stage compression system, two-stage compression with 1-EEV system, and two-stage compression with 2-EEV system. The optimum normalized charge were 0.363, 0.297, and 0.282 for the two-stage compression with 2-EEV system, two-stage compression with 1-EEV system, and single-stage compression system, respectively.

Key words: Carbon dioxide(이산화탄소), Refrigerant charge amount(냉매충전량), Two-stage compression cycle (이단압축 사이클)

1. 서 론

환경규제에 대한 관심과 제약이 증가됨에 따라 새로운 냉매에 대한 관심이 증대되고 있으며, 그 중 자연냉매가 그 관심의 대상이 되고 있다. 자연냉매는 환경적인 측면에서 오존층 파괴와 지구 온난화에 미치는 영향이 매우 적다. 자연냉매 중에서 이산화탄소는 열역학적 물성이 우수하여 급탕 및 난방에 적용할 때는 기존 시스템에 비하여 성능향상이 기대된다. 또한 시스템의 크기와 냉매의 충전량에서도 유리한 조건을 가지고 있다.

이에 현재 국내외에서 이산화탄소를 이용한 사이클에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

일반적으로 이산화탄소를 이용한 냉동 사이클은 외기 조건과 냉매충전량에 크게 영향을 받으며 기존 냉매를 적용한 아임계 사이클보다 낮은 성능을 보인다^(1,2). 따라서 이산화탄소 사이클의 특성 파악과 이러한 현상을 극복하여 사용이 가능케 하는 이산화탄소용 열펌프를 개발하기 위한 연구가 진행되고 있다⁽³⁻⁵⁾. 특히 냉매충전량의 변화에 따른 사이클의 최적화 연구와 여러 가지 성능향상을 위한 사이클 개발 및 개발된 사이클의 최적화에 많은 연구가 집중되어 있다.

국내의 이산화탄소를 이용한 시스템에 대한 연구는 아직 초기단계에 있고, 성능향상 관련 연구와 사이클에 대한 자료가 많이 부족한 현실이다.

† Corresponding author

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

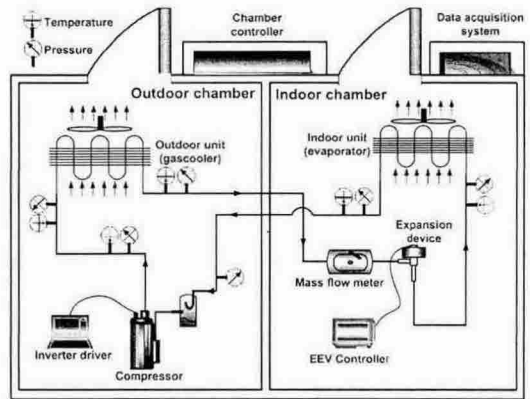
E-mail address : yongckim@korea.ac.kr

따라서 이를 발전시킬 수 있는 기초적인 자료와 체계적인 연구가 요구된다. 특히, 이산화탄소 사이클은 냉방 성능이 다른 사이클 보다 낮게 나타나기 때문에 에너지 절약을 위한 냉방성능 개선에 관한 연구가 시급하다. 따라서 본 연구에서는 이산화탄소를 이용한 여러 가지 운전 사이클에서 여러 운전 변수에 따른 특성을 파악하기 위하여 냉방 실험을 실시하였으며, 이를 통하여 각 사이클의 최적 충전량 및 사이클 특성을 비교·고찰하고자 한다.

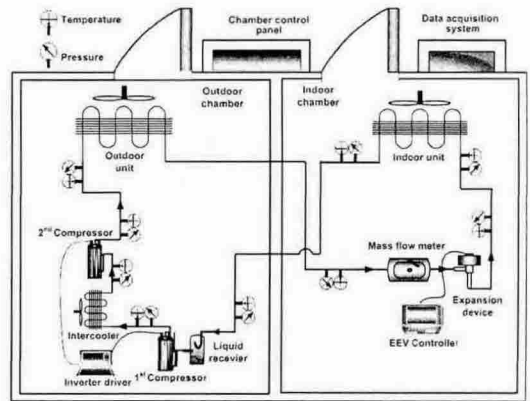
2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 최적의 충전량과 성능을 고찰하기 위한 이산화탄소를 이용한 냉방사이클 사양으로는 단일압축 시스템, 이단압축 단일팽창 시스템, 그리고 이단압축 이단팽창 시스템 등이 설계되었다. 냉매충전량의 변화에 따른 사이클의 특성을 파악하기 위한 각 사이클의 개략도들을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 단일압축 시스템은 하나의 압축기와 하나의 팽창장치로 이루어져 있으며, 이단압축 단일팽창 시스템은 직렬로 연결된 두 개의 동일한 압축기와 하나의 팽창장치로 구성되어 있다. 또한 이단압축 이단팽창 시스템은 두 개의 직렬로 연결된 압축기와 두 개의 팽창장치, 그리고 플래쉬 탱크(Flash tank)와 혼합기(mixer box)로 이루어져 있다.

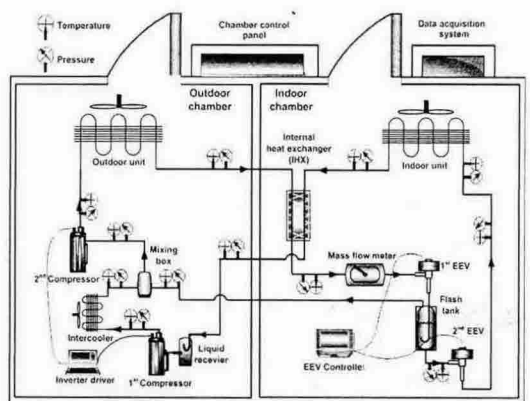
이산화탄소 사이클의 성능 측정을 위하여 열 펌프를 두 개의 챔버로 구성된 열량계에 설치하였다. 실험에 사용된 두 개의 동일한 압축기는 덴소(Denso)사의 스크롤형 가변속 압축기로 난방 용량 4.5 kW 정도를 가지는 소형 압축기이며, 실내 및 실외에 사용된 열교환기는 핀튜브 형태의 열교환기로 내경 4 mm, 외경 5 mm로 고압에 견딜 수 있도록 설계하였다. EEV는 후지코끼(Fujikoki)사의 제품으로 시스템 설계 용량에 맞게 구성하였다. 또한 사이클 각 부분의 온도와 압력의 상태량을 확인하기 위하여 열전대와 압력계를 시스템의 주요 부위에 설치하였다. 본 실험에 시스템 각 부분의 물성치를 측정하기 위한 실험장치의 정확도와 이를 통하여 얻어진 냉동용량 및 성능계수의 불확실도를 Table 1에 나타내었다.



(a) Single-stage compression system



(b) Two-stage compression with 1-EEV system



(c) Two-stage compression with 2-EEV system

Fig. 1 Schematics of cycle option.

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%

이산화탄소 시스템의 냉방 실험 조건을 설정하기 위하여 우선 단일유닛 시험 조건인 ASHRAE STANDARD 116⁽⁶⁾에 근거하여 온도와 습도 등의 조건을 설정하였다. 본 실험에서 설정된 각 사이클 사양에 따른 EEV 개도와 압축기 회전수, 그리고 설정된 외기조건을 Table 2에 나타내었다. 설계된 시스템의 열량은 냉매 엔탈피법을 이용하여 계산하였다.

설계된 시스템의 최적 충전량을 결정하기 위하여 작동조건에서 충전량을 변화시키며 시스템이 안정적으로 운전되는 경우의 성능을 일정시간 적산하였다. 설계된 각 사이클 사양에 따른 충전량은 주어진 총 체적에서 25°C 대기압 상태의 이산화탄소가 기상으로 이루어져 있을 때를 0으로 액상으로 채워졌을 때를 1로 표현하여 무차원화하였다. 주어진 냉매충전량에 대한 무차원화는 다음과 같이 표현된다.

$$\text{Normalized charge} = \frac{m_{\text{actual}} - m_{\text{vapor}}}{m_{\text{liquid}} - m_{\text{vapor}}} \quad (1)$$

각각의 사이클에서 냉매충전량에 따른 무차원화된 충전량을 Table 3에 나타내었다. 또한 사이클의 운전 특성을 파악하기 위하여 압축기 회전수, 전자팽창밸브의 개도를 변화시켰으며, 이에 따른 사이클 변화를 고찰하였다.

3. 결과 및 고찰

증기압축 사이클 구성시 시스템을 최적으로 운전하기 위해서는 적절한 냉매가 시스템에 충전되어야 한다. 충전량은 시스템 용량 매칭과 관련되어 있으므로 충전량 변화에 따른 시스템 성능 특성은 주로 시스템에 어떤 팽창장치를 사용하였

는지와 관련되어 연구되었다. 시스템의 각 구성 부품의 용적은 일정한 값을 가지지만, 비체적은 시스템의 운전 상태에 따라 변하므로 정확한 예측이 어려워 대부분의 경우 반복 실험을 통하여 시스템의 충전량을 결정한다. 본 연구에서는 정격 부하조건에서 압축기 회전수, 전자팽창밸브 개도, 충전량을 변화시켜가면서 실험을 수행하였으며, 이를 통하여 최적 충전량을 결정하였다.

Fig. 2는 단일압축 시스템에서 압축기 주파수가 50 Hz로 일정할 때, 충전량 변화에 따른 시스템의 냉방성능계수의 변화를 보여주고 있다. 충전량이 증가할수록 모든 EEV 개도에서 냉방성능계수 및 냉방용량은 증가하는 경향을 보인다. 그러나 EEV 개도가 35%와 42%의 경우 0.170~0.226에서 성능의 증가량이 확연히 둔화 또는 일정하게 유지되고, 49%와 56%에서는 0.282 이상의 무차원화된 충전량에서 성능계수가 감소하는 경향을 보인다. 낮은 압축기 회전수의 경우 작은 EEV 개도에서 높은 충전량으로 최적의 충전량이 결정되고, 높은 압축기 회전수의 경우 큰 EEV 개도에서 적은 충전량으로 최적의 충전량이 결정됨을 확인 할 수 있다. EEV 개도가 56%인 경우, 낮은 회전수에서 최적 사이클이 원하는 충분한 토출 압력이 발생하지 않으므로 압축기 입구의 과열도가 거의 발생하지 않는다. 따라서 시스템과 압축기의 신뢰성을 고려하여 더 낮은 압축기 회전수와 56%이상의 EEV 개도에서는 냉방성능 실험을 수행하지 않았다. 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.

동일한 압축기를 두 대를 사용하는 경우 저단축과 고단축의 압축비를 조절함으로써 두 대의 압축기의 효율을 증가시키고 원하는 고압을 원활히 형성시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 단일압축 시스템의 결과를 바탕으로 EEV 개도를 49%로 일정하게 유지시키고 여러 가지 압축비를 변화시켜 가면서 실험을 실시하였다. Fig. 3은 이단압축 일단팽창 시스템에서 냉매충전량 변화에

다른 냉방성능계수의 변화를 보여주고 있다. 냉매충전량에 따른 성능의 변화는 일단압축 시스템과 비슷한 경향을 가진다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 냉매충전량이 증가될수록 시스템 성능은 향상된다. 낮은 주파수인 35-30 Hz나 40-30 Hz의 경우 0.297에서 그 증가의 기울기가 약간 감소하는 경향을 보이거나 성능은 계속적으로 증가하는 모습을 보인다. 반면 높은 주파수인 50-30 Hz, 50-35 Hz, 50-40 Hz인 경우는 0.297에서 성능이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 1단과 2단의 압축기 주파수의 합이 증가할수록 시스템 성능은 감소하는 경향을 보이며, 특히 1단의 압축기의 주파수가 50 Hz인 경우 그 감소 정도가 더 크게 나타난다. 또한 1단의 압축기의 주파수가 50 Hz인 경우, 2단의 압축기의 주파수가 시스템 성능에 영향을 미치하여 2단의 압축기 주파수변화에 따른 성능 감소가 그다지 크게 나타나지 않았다. 일반적으로 냉방성능은 압축기 주파수가 저하될수록 감소한다. 이는 압축기 주파수가 증가할수록 열교환기의 효율성의 감소와 배관 및 밸브에서 압력강하의 증가로 인한 사이클 손실이 크게 증가하기 때문이다.

Fig. 4는 이단압축 이단팽창 시스템의 냉매충전량에 따른 시스템 성능의 변화를 보여주고 있다. 본 연구에서는 2개의 압축기와 팽창장치를 이용하는 가스 인젝션 사이클 중 프레쉬 탱크와 혼합기를 이용한 상분리(phase-separate) 사이클을 구성하여 실험을 실시하였다. 일반적으로 가스 인젝션 사이클은 냉방용량의 증가에 큰 효과를 보임으로 냉방사이클 성능향상을 위하여 많이 적용된다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 냉매충전량이 증가함에 따라 시스템 성능은 증가하는 경향을 보이며, 무차원화된 냉매충전량이 0.3근처에서 그 기울기는 크게 감소하였다. 또한 무차원화된 최적 충전량은 0.364로 나타났다. 상분리 사이클에서는 냉매의 일부가 1단의 압축기와 2단의 압축기 사이로 주입됨으로써 2단의 압축기 입구의 냉매의 온도를 감소시켜 압축기의 체적 효율을 증가시키며 가스쿨러에 유입되는 냉매의 유량의 증가로 인하여 사이클 성능은 증가된다.

각 사이클 사양에 따른 성능 특성을 비교하기 위하여 단일압축 시스템의 경우 압축기 주파수를 50 Hz, EEV 개도를 49%로, 이단압축 일단팽창 시스템의 경우 50-30 Hz, 49%로, 이단압축 이단

팽창 시스템의 경우 40-40 Hz, 56-42%로 선정된 후 각 시스템의 성능을 고찰하였다. Table 4는 각각의 사이클의 성능을 비교하여 나타내고 있다. 무차원화된 최적 충전량의 경우 일단압축 시스템이 0.282, 이단압축 일단팽창 시스템이 0.297, 그리고 이단압축 이단팽창 시스템이 0.364로 나타났다. 일단압축 시스템과 이단압축 일단팽창 시스템의 최적 충전량은 이단압축 이단팽창 시스템이 약간 크게 나타났지만 그 양의 차는 작게 나타났다. 그러나 이단압축 이단팽창 시스템의 경우 단일압축 시스템에 비하여 약 30% 증가된 충전량에서 최적화됨을 확인하였다. 냉방성능의 경우, 일단압축 시스템이 이단압축 일단팽창 시스템보다 성능이 높게 나타났는데, 이는 두 대의 압축기를 동시에 사용함으로써 압축기의 효율이 두 배로 감소하고 그 만큼 압축기 일이 증가됨에 그 원인이 있다. 반면에 상분리 사이클의 경우 앞에서 설명한 것과 같이 사이클 성능이 증가되어 냉방성능계수가 2.89로 단일 압축시스템에 비하여 약 32% 증가된 값을 나타냈다.

각각의 사이클의 토출압력을 보면 이단압축 단일팽창이 가장 크게 나타났으며 이단압축 이단팽창이 가장 낮은 8.1 MPa로 나타났다. 따라서 상분리 사이클의 경우 낮은 토출압력에서도 충분한 냉방용량을 확보할 수 있고 압축기 일의 감소로 시스템 성능이 크게 증가하게 된다. 가스쿨러에 흐르는 냉매의 질량유량을 비교해 보았을 때, 상분리 사이클이 가장 큰 값을 보였다. 1단의 압축기와 2단의 압축기 사이에 차가운 냉매가 주입됨으로써 가스쿨러를 지나는 냉매의 양이 크게 증가함을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 이산화탄소를 적용한 냉방 시스템의 성능 특성을 여러 가지 사이클 사양에 따라 실험을 통하여 알아보았다. 이를 위하여 일단압축 시스템, 이단압축 일단팽창 시스템, 그리고 이단압축 이단팽창 시스템을 구성하였으며 각각의 사이클에 따른 최적 충전량과 여러 가지 냉방성능을 비교·고찰하였다. 이를 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 일단압축 시스템, 이단압축 일단팽창 시스템, 그리고 이단압축 이단팽창 시스템의 무차원

화된 최적의 냉매충전량은 각각 0.282, 0.297, 그리고 0.364로 나타났다.

(2) 상분리 사이클의 경우 냉방성능이 다른 사이클에 비하여 크게 향상되었으며 낮은 토출압력에서도 충분한 냉방성능을 나타냄을 확인하였다.

후 기

본 논문은 산업자원부 차세대 신기술 개발사업의 지원에 의하여 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, No. 3. pp. 172-179.
- (2) Hwang, Y., 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., 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., Bullard, C., 2000, Transcritical CO₂ heat pump for residential application, 4th IIR-Gustav Lorentzen Conference, pp. 9-16.
- (6) ASHRAE, 1983, Methods of testing for seasonal efficiency of unitary air-conditioner and heat pumps. ASHRAE Standar 116.

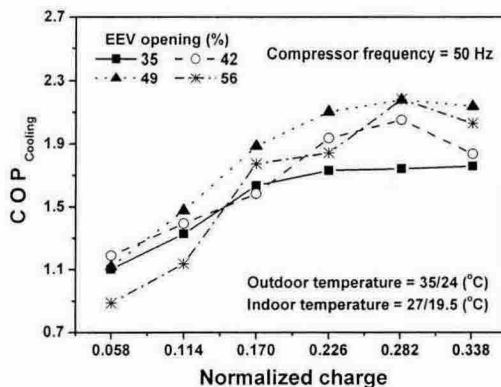


Fig. 2 Cooling COP variation with normalized charge (single-stage compression system).

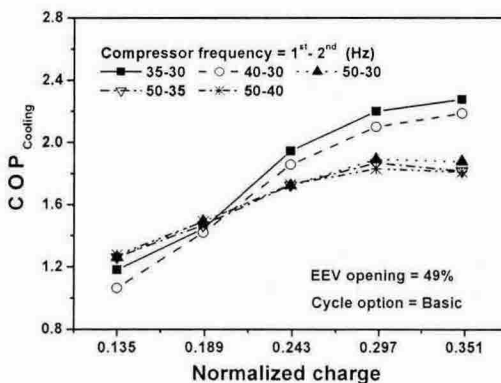


Fig. 3 Cooling COP variation with normalized charge (two-stage compression with 1-EEV system).

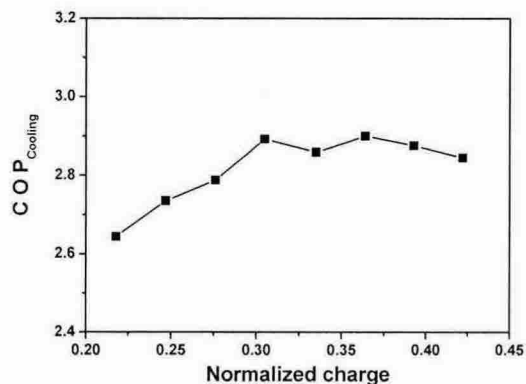


Fig. 4 Cooling COP variation with normalized charge (two-stage compression with 2-EEV system).

Table 2 Operating conditions

Parameters	Single-stage compression system	Two-stage compression with 1-EEV system	Two-stage compression with 2-EEV system
*EEV opening (%)	35, 42, 49, 56	49	56-42
**Compressor frequency (Hz)	50	35-30, 40-30, 50-30 50-35, 50-40	40-40
Operation conditions (db/wb)	Indoor = 27/19.5°C Outdoor = 35/24°C		

* Normalized by the full opening

** Normalized between 0 and 1 by the mass of saturation vapor and liquid at room temperature of 25°C

Table 3 Refrigerant charge amount vs. normalized charge

Charge amount (g)	Single-stage compression system	Two-stage compression with 1-EEV system	Two-stage compression with 2-EEV system
1100	0.114	0.081	-
1200	0.170	0.135	-
1300	0.226	0.189	-
1400	0.282	0.243	-
1500	0.338	0.297	-
1600	-	0.351	-
-	-	-	-
2500	-	-	0.218
2600	-	-	0.247
2700	-	-	0.276
2800	-	-	0.305
2900	-	-	0.335
3000	-	-	0.364
3100	-	-	0.393

Table 4 Comparisons of the performance with cycle option

Parameters (compressor frequency, EEV opening)	Single-stage compression system (50 Hz, 49%)	Two-stage compression with 1-EEV system (50-30 Hz, 49%)	Two-stage compression with 2-EEV system (40-40 Hz, 56-42%)
Optimum normalized charge	0.282	0.297	0.364
Cooling COP	2.18	1.88	2.89
Compressor discharge pressure (MPa)	8.75	8.82	8.10
Normalized mass flow rate (kg/min)	1.08	1.02	1.21