

CO₂ 냉동시스템에서 압축기의 흡입온도와 운전주파수가 오일 순환량에 미치는 영향

김 경 재, 이 익 수, 강 병 하^{*}, 김 석 현^{*}
국민대학교 대학원, *국민대학교 기계자동차 공학부

Effect of Suction Temperature and Compressor Frequency
on Oil Circulation Ratio in a CO₂ Refrigeration System

Kyung Jae Kim , Ik Soo Lee , Byung Ha Kang^{*} , Sukhyun Kim^{*}

ABSTRACT: The quantity of discharged oil from a compressor is one of the most important issues for proper operation of refrigeration system. If the oil is increased in the system not only pressure drop is increased in other components, such as evaporator and gas cooler but also heat transfer coefficient in the heat exchangers is decreased. In addition, the lack of oil in the compressor may cause a critical of the system failure. In this study, one stage single rotary compressor is used for measuring oil circulation ratio(OCR). Carbon dioxide and PAG oil are used as refrigerant and lubricant. Using a U-tube densimeter, mixture density is measured. Characteristics of oil circulation ratio have been investigated for CO₂ rotary compressor in the range of operation frequency 45 Hz to 63 Hz and the suction temperature range of 0°C to 15°C. The results obtained indicate that the oil circulation ratio is increased as the suction temperature or compressor operating frequency is increased.

Key words: Oil Circulation Ratio(오일순환율), Refrigeration Oil(냉동오일), Density(밀도), Carbon dioxide(이산화탄소), CO₂ compressor(이산화탄소 압축기)

———— 기 호 설 명 ————

OCR : 오일 순환량 [%]

mix : 혼합물
o : 오일
r : CO₂ 냉매

그리스 문자

ρ : 밀도 [g/ml]

하첨자

1. 서 론

세계적으로 환경문제에 대한 관심이 높아지면서 서 오존층 파괴와 지구온난화 영향을 피하기 위해 지구상에 자연적으로 존재하는 가스들을 냉매로 사용하는 것에 관심이 집중되고 있다. 자연냉매는 환경적인 측면에서 상당히 우수하고, 인체에 무해하며, 독성이 없고, 화학적으로 안정하며,

† Corresponding author
Tel.: +82-2-910-4681; fax: +82-2-910-4839
E-mail address: bhkang@kookmin.ac.kr

기존의 냉동기 재료를 그대로 사용할 수 있는 장점이 있다.⁽¹⁾ 자연냉매 중 이산화탄소는 다른 냉매들과는 달리 인화성과 악취 및 독성이 없어 안전성이 뛰어나며, 높은 비열과 체적열용량을 가지고 있으므로 냉매로서도 탁월한 열역학적 물성을 가지고 있어 차세대 대체냉매로서의 관심이 집중되고 있다.

대체냉매의 개발과 병행하여 필수적으로 수행해야 할 연구과제는 대체냉매에 적용할 수 있는 적절한 압축기를 개발하는 것이다. 일반적인 냉동 시스템의 구성요소 중에서 압축기가 차지하고 있는 소비전력의 비율은 90%에 이르기 때문에 압축기의 고효율화 및 성능향상에 관한 연구는 매우 필요한 실정이다. 또한 압축기는 냉방시스템에서 매우 폭 넓은 용도로 쓰이고 있으나 압축기의 신뢰성 향상에 관한 연구는 아직까지 미비한 실정이다. 그 중 압축기 신뢰성과 관련하여 압축기의 유토출량 측정은 압축기 및 시스템의 성능 및 수명에 결정적인 영향을 미치는 인자로서 작용한다.

정상상태의 냉동 시스템내를 순환하는 오일/냉매 혼합물의 오일순환량은 시스템 내에 적체되어 있는 오일의 양이 일정하다고 가정하면 압축기에서의 오일토출량과 같다. 오일토출량이 과도한 경우에는 증발기나 응축기와 같은 구성요소에 압력하강이 발생하고, 토출된 오일이 열교환기에 축적될 경우에는 열교환 표면에 유막(oil film)을 형성시켜 열전달계수를 감소시키므로 시스템의 성능을 저하시키는 주요한 원인이 된다. 또한 압축기 내부의 오일양이 줄어들게 되면 베어링 및 접촉면적의 윤활능력이 부족하게 되어 오일펌프 및 크랭크샤프트의 과열로 인해 부품들의 마모와 고착현상이 생기게 되고 최종적으로는 압축기의 파손을 초래하게 된다.

압축기의 오일토출량에 관한 기존의 연구로서 Dreimen and Bunch⁽²⁾는 트윈 로터리 압축기를 이용하여 오일분리기를 장착했을 때와 하지 않았을 때의 오일순환량을 비교하였고 운전주파수의 변화에 따른 유량과 압축기 토출온도의 관계를 분석하였고, Navarro et al.⁽³⁾은 냉매로서 R290을 사용하는 왕복동식 압축기를 이용하여 증발온도와 응축온도를 변화시키며 압축효율의 변화를 측정하였다. 또한 R407C와 R209를 사용하는 다른 종류의 압축기를 이용하여 증발온도, 압축비, 압

축방식을 변수로 적용하여 그에 따른 체적효율, 냉각능력, 오일순환량의 변화를 측정 및 계산하였다.

압축기 내부에서 일어나는 오일토출에 대한 메카니즘을 규명하고, 오일토출량에 대한 정량적인 데이터를 확보하기 위하여 Cho et al.⁽⁴⁾은 로터리 압축기 내부의 오일거동을 분석하기 위한 테스트 모델을 제작하여 여러 조건에 따른 오일토출량을 CCD카메라를 이용하여 측정하였고, 실제 압축기에 가시화부를 설치하여 압축기 출구의 압력과 온도에 따른 오일토출량을 분석하였다. 가시화기법을 이용한 다른 연구로서 Toyama et al.⁽⁵⁾는 스크롤 압축기에서 오일입자의 거동현상을 가시화기법을 이용하여 측정하였다. 본 연구에서는 압축기 모델의 상부와 하부 및 오일냉매 혼합물의 토출배관에 가시화부가 설치된 압축기 모델을 제작하였고, 오일입자의 크기와 속도 및 오일유동에 따른 오일토출량의 관계를 분석하였다.

압축기의 내부의 오일토출에 관한 메카니즘 분석뿐만 아니라, 유토출량을 줄이기 위해 압축기의 구성요소들을 개선하고 그에 대한 수치해석 결과를 통하여 Ogata et al.⁽⁶⁾는 압축기의 피스톤 접촉면적과 길이의 최적설계와 오일/냉매 혼합물의 분리를 위해 관형 분리커버를 부착함으로써 오일토출량을 감소시킬 수 있다는 결과를 나타내었고, Christen et al.⁽⁷⁾는 로터리 압축기를 이용하여 다양한 흡입압력과 토출압력의 변화 및 압축비의 변화에 따른 압축기의 유토출량, 체적효율 및 소요동력 대하여 측정을 하였고 또한 왕복동식 압축기와의 비교를 통하여 정량적인 데이터를 제시하였다.

본 연구에서는 대체냉매인 이산화탄소를 사용하는 로터리 압축기를 이용하여 압축기의 흡입온도와 운전주파수에 따른 오일/냉매 혼합물의 밀도변화를 측정하고, 이를 토대로 오일순환량의 변화를 분석하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

폐회로 시스템에서 냉매/오일 혼합물이 액체 또는 기체 상태로 혼합되어 유동할 수 있게 시스템을 설계 제작하였다. 본 연구의 실험 장치는

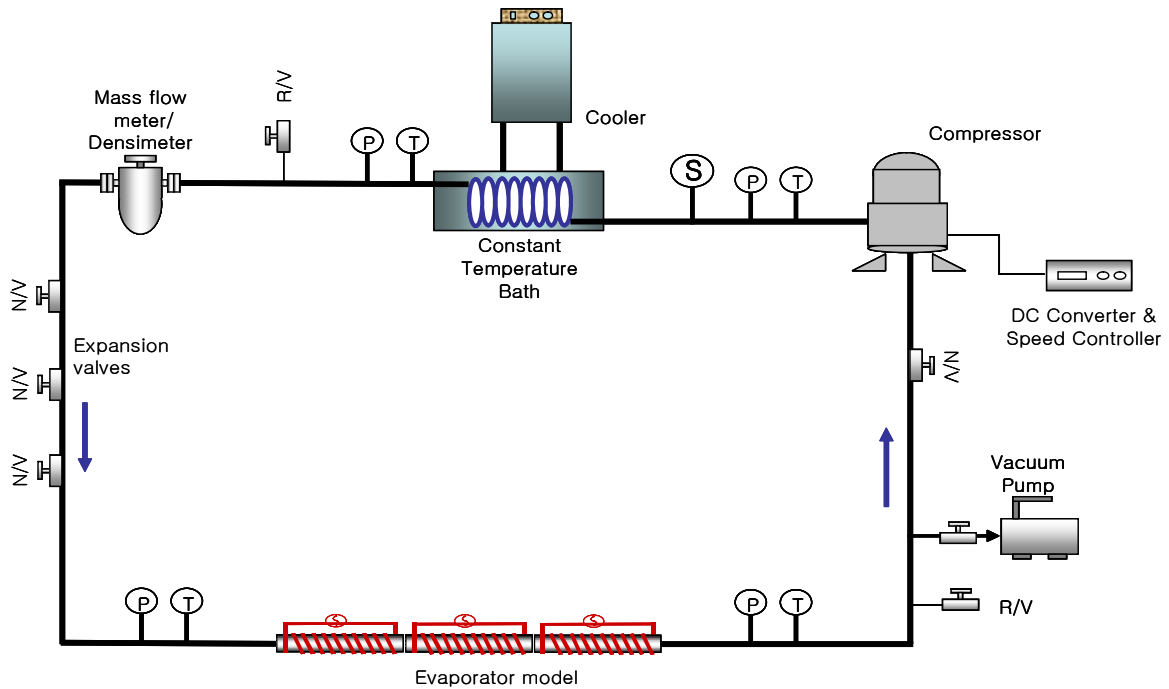


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus.

초월임계사이클을 갖는 CO₂ 냉동시스템을 모사하였다. 또한 높은 임계 압력을 갖는 CO₂냉매의 특성을 고려하여 실험 장치의 각 부분을 고압 피팅으로 연결하였다. Fig. 2는 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 실험 장치는 크게 CO₂압축기, 가스쿨러, 팽창밸브, 증발기모델, 질량유량계 그리고 밀도계로 구성된다. 본 실험에 사용된 압축기는 CO₂를 냉매로 사용하는 1단 압축 로터리 방식의 Daikin사의 제품을 사용하였다. CO₂냉매를 응축시키기 위해 에틸렌글리콜/물을 브라인으로 사용하는 냉 향온조 순환부를 가스쿨러로 이용하였으며, 팽창효과를 위해 팽창밸브를 설치하여 시스템내의 저압부를 형성하였다. 압축기 흡입부측에는 전기가열기를 이용하여 증발기모델을 제작하고 냉매로의 열전달을 위해 가변전압기를 이용, 전압을 조정하여 온도를 설정하였다. 시스템 각 부분의 압력과 온도를 측정하기 위해 압력 센서와 T-type 온도센서를 장착하였고, 데이터 취득기를 이용하여 데이터를 취득하였다. 또한 압축기에서 토출되는 오일/냉매 혼합물의 밀도와 질량유량을 측정하기 위해 본 실험에서는 U-tube 밀도계/질량유량계를 이용하였다.

2.2 실험조건 및 방법

실험에 사용된 오일은 CO₂냉매와 상용되며 극성 냉동기유인 PAG(Poly Akylene Glycol) 오일을 사용하였다. 이 오일은 화학적 안정성, 윤활성이 우수한 합성오일이다. 실험의 조건으로서 압력조건은 흡입압력 30 bar, 토출압력 90 bar 로 설정하였고 압축기의 흡입온도는 0-15℃ 범위 내에서 5℃ 간격으로 실험을 수행하였다. 또한 운전주파수에 따른 밀도변화를 측정하기 위해 인버터를 이용하여 45 Hz-63 Hz의 범위 내에서 실험이 수행되었다.

실험방법은 초기에 CO₂를 관내에 충전하기 전에 진공펌프를 이용하여 관내를 진공으로 유지시키면서 적절한 양의 냉매를 충전포트에 연결하고 밸브를 열어 압력차를 이용하여 주입시켰다. 냉매 주입 후 액압축을 방지하기 위해 증발기모델을 예열시킨 후 압축기의 주파수를 인버터를 이용하여 구동시켰다. 그 후 인버터의 출력을 조절하여 압축기의 설정주파수를 설정하였고, 흡입온도를 조정하기 위해 증발기 모델에 가변전압기를 이용 420-500 V의 전압을 인가하여 압축기의 흡입온도를 설정하였다. 시스템 가동 후 정상상태가 되었을때 유동중인 혼합물의 온도, 압력, 밀도와 질량유량을 측정한다.

오일순환량(정상상태인 경우 압축기의 오일토

출량)을 결정하기 위해 본 연구에서는 혼합물의 밀도를 이용한 관계식을 제시하였다.

$$OCR = \frac{\dot{m}_o}{\dot{m}_{mix}} = \frac{\dot{m}_{mix} - \dot{m}_r}{\dot{m}_{mix}} = 1 - \frac{\dot{m}_r}{\dot{m}_{mix}} \quad (1)$$

여기서 오일의 체적유량은 냉매의 체적유량에 비해 미소한 크기를 가지고 있으므로 해당 압력과 온도에 해당하는 순수냉매의 체적유량은 유동중인 혼합물의 체적유량과 같다는 가정을 하면 OCR은 식(2)와 같이 된다.

$$OCR = 1 - \frac{\rho_r}{\rho_{mix}} \quad (2)$$

여기서 순수 이산화탄소의 밀도는 NIST webbook의 Thermophysical Properties of CO₂를 이용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축기의 운전주파수에 따른 오일순환량 변화

Fig. 3은 압축기 흡입온도를 0°C-15°C로 일정하게 유지하면서 압축기의 운전주파수를 변화시켰을 때 냉동시스템 내에서 순환하고 있는 오일/냉매 혼합물의 밀도를 나타내고 있다. 압축기 흡입온도가 15°C로 설정되었을 경우, 혼합물의 밀도는 45 Hz일 때 0.9003 g/ml, 58 Hz일 때 0.9051 g/ml, 63 Hz일 때 0.9097 g/ml로 측정되었다. 혼합물의 밀도에 대한 전체적인 경향을 보면 압축기의 운전주파수가 증가함에 따라 오일/냉매 혼합물의 밀도가 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 흡입온도를 일정하게 유지하고 운전주파수를 변화시켰을 때의 오일순환량을 나타내고 있다. 흡입온도 15°C, 운전주파수 63 Hz일 때 오일순환량은 1.8%로 가장 높게 측정되었다. 전체적인 경향을 보면 압축기의 운전주파수가 증가됨에 따라 오일순환량이 높아지는 것을 알 수 있다. 운전주파수가 증가함에 따라 시스템 내에서 순환되는 오일/냉매 혼합물의 질량유량은 0.58에서 0.73 kg/min으로 증가되는 것으로 측정되었다. 이는 압축기에서 빠져나가는 오일/냉매 혼합

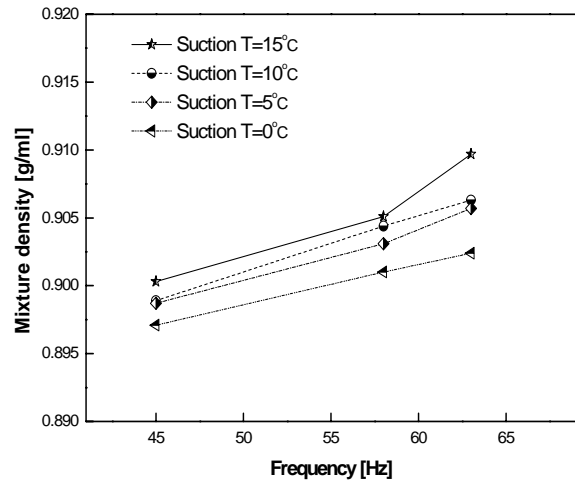


Fig. 3 Effect of frequency on mixture density for various suction temperatures.

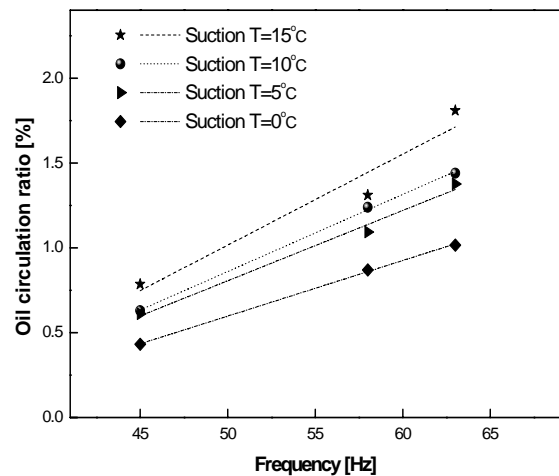


Fig. 4 Effect of frequency on OCR for various suction temperatures.

물의 질량유량이 증가함에 따라 압축기에서 빠져나가는 토출가스의 운동량이 증가하게 되고, 이러한 요인으로 인해 토출가스에 포함되는 오일의 양이 증가하는 것으로 판단할 수 있다.

3.2 압축기의 흡입온도에 따른 오일순환량 변화

압축기 운전주파수를 45 Hz-63 Hz로 일정하게 유지하면서 압축기의 흡입온도를 변화시켰을 때

냉동시스템 내에서 순환하고 있는 오일/혼합물의 농도를 Fig. 5에 나타내고 있다. 압축기 운전주파수가 63 Hz로 설정되었을 경우, 혼합물의 밀도는 압축기 흡입온도가 0℃일 때 0.9024 g/ml, 5℃일 때 0.9057 g/ml, 10℃일 때 0.9063 g/ml, 15℃일 때 0.9097 g/ml로 측정되었다. 오일/냉매 혼합물의 밀도에 대한 전체적인 경향을 보면 압축기의 흡입온도가 증가함에 따라 오일/냉매 혼합물의 밀도가 증가하는 경향을 나타낸다.

Fig. 6은 운전주파수를 45 Hz-63 Hz으로 일정하게 유지하고, 압축기의 흡입온도를 변화시켰을 때 시스템 내부의 오일순환량을 나타낸다. 운전주파수가 45 Hz로 유지되었을 때 시스템 내의 오일순환량을 측정해보면 흡입온도가 0℃일 때 0.43%, 흡입온도가 5℃일 때 0.61%, 흡입온도가 10℃일 때 0.63%, 흡입온도가 15℃일 때 0.78%로 측정되었고 주파수와 흡입온도가 증가함에 따라 오일순환량은 증가하는 경향을 나타내었다. 압축기의 흡입온도에 따른 압축기 토출가스의 온도를 측정해본 결과, 압축기의 흡입온도가 증가함에 따라 토출가스의 온도는 98℃-127℃까지 선형적으로 증가하는 것으로 측정되었다. 이는 압축기의 토출가스의 온도가 증가함에 따라 토출가스에 포함되어 있는 오일의 점성이 줄어들고, 오일의 증발성으로 인해 미립자 상태의 오일이 형성되어 시스템 내부로 유입되는 오일의 양이 증가하는 것으로 판단할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 압축기의 운전주파수와 흡입온도에 따른 오일/냉매 혼합물의 밀도를 측정하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 압축기에서 토출되는 오일/냉매 혼합물의 밀도를 U-tube 밀도계를 이용하여 측정하고, 밀도관계식을 이용하여 시스템 내의 오일순환량을 계산하였다.

(2) 압축기의 흡입온도가 일정할 때 압축기의 주파수가 증가할수록 질량유량은 증가하여 토출가스의 운동량을 증가시키므로, 시스템 내의 오일/냉매 혼합물의 밀도와 오일순환량은 증가한다.

(3) 압축기의 운전주파수가 일정할 때 압축기의 토출가스의 온도는 압축기의 흡입온도에 영향을 받는다. 또한 온도의 증가에 따라 시스템 내

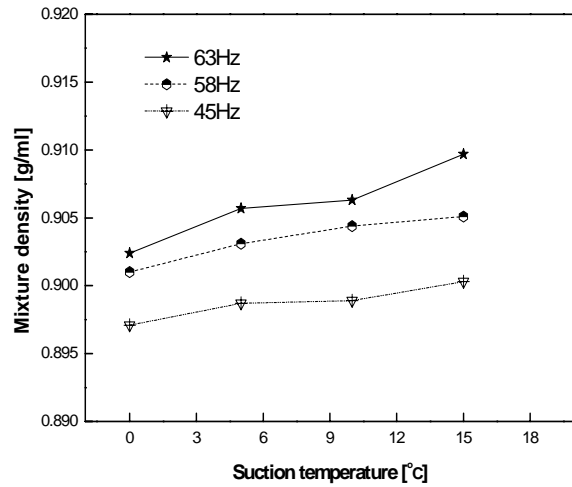


Fig. 5 Effect of suction temperature on mixture density for various frequencies.

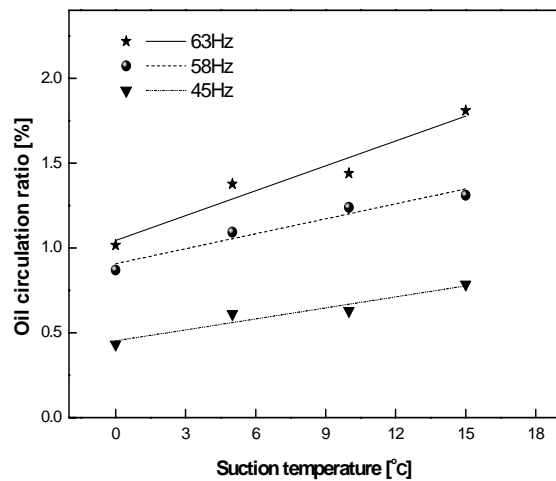


Fig. 6 Effect of suction temperature on OCR for various frequencies.

의 오일/냉매 혼합물의 밀도와 오일순환량은 증가한다.

후 기

본 연구는 산업자원부 차세대 신기술 개발사업 중 “환경친화적 자연냉매인 CO₂를 적용한 고효율 냉난방 시스템 개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Devotta, S., Padalkar, A. S., Joshi, S. N., Sawant, N. N., and Sane, N. K., 2000, Comparative assessment of CO₂ for window air-conditioners, Preliminary Proceedings of the 4th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids at Purdue, pp. 17-24.
2. Nelik, D. and Rick, B., 2006, Development of carbon dioxide rotary compressor, The 18th International Compressor Engineering Conference at Purdue, C014 pp. 1-8.
3. Navarro, E., Urchueguia, J. F., Gonzalvez, J. and Corberan, J. K., 2005, Test result of performance and oil circulation rate of commercial reciprocating compressors of different capacities working with propane(R290) as refrigerant, International Journal of Refrigeration Vol. 28 pp. 881-888.
4. Cho, P. J., Lee, S. K., Youn, Y. and Ko, H. S., 2005, Analysis of oil behavior inside upper part of rotary compressor using visualization technique, The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Vol. 17, No. 8, pp. 772-779.
5. Toyama, T., Matsuura, H. and Yoshiaki Yoshida, Y., 2006, Visual techniques to quantity behavior of oil droplets in a scroll compressor, The 18th International Compressor Engineering Conference at Purdue, C026 pp. 1-7.
6. Ogata, T., Hasegawa, H., Okaichi, A. and Nishiwaki, F., 2006, Reduction of oil discharge for rolling piston compressor using CO₂ refrigerant, The 18th International Compressor Engineering Conference at Purdue, C095 pp. 1-7.
7. Christen, T., Hubacher, B., Bertsch, S. S. and Groll, E., 2006, Experimental performance of prototype carbon dioxide compressors, The 18th International Compressor Engineering Conference at Purdue, C131 pp. 1-10.