

CO₂ 냉동시스템의 오일 분리기에서 PAG오일 분리 특성에 관한 실험적 연구

조 은 영, 이 성 광, 강 병 하^{*†}, 김 석 현^{*}
국민대학교 대학원, ^{*}국민대학교 기계자동차 공학부

An Experimental Study on PAG Oil Separation Characteristics of an Oil Separator for a CO₂ Refrigeration system

Eun Young Cho, Sung Kwang Lee, Byung Ha Kang^{*†}, Sukhyun Kim^{*}

ABSTRACT: The oil trap in oil separator is one of the most important characteristics for normal operation of compressor. In this study, oil separation characteristics has been investigated for CO₂/PAG mixture using a gravity type of oil separator. The experimental study has been carried out in the range of oil concentration 0 to 5 weight-percent and the mixture temperature range of 0°C to 15°C. The results obtained indicate that oil separation ratio in oil separator is increased with an increase in the oil concentration and mixture temperature.

Key words: Concentration(농도), Oil(오일), PAG(Poly Alkylene Glycol), Density(밀도), Carbon dioxide(이산화탄소), Oil separator(오일분리기)

기 호 설 명

- R : 오일 분리율
- 그리스 문자**
- ρ_o : 순수 CO₂ 밀도 [g/ml]
- $\rho_{separator}$: 오일 분리기 부착시 밀도 [g/ml]
- $\rho_{no-trap}$: 오일 분리기 탈착시 밀도 [g/ml]

1. 서 론

최근 CFC(Chloro Fluoro Carbon), HCFC(Hydro Chloro Fluoro Carbon) 및 HFC(Hydro Fluoro Carbon) 계열의 냉매를 사용하는 것에 의한 오존층 파괴와 지구온난화 같은 환경변화가 국제적 문제로 인식되고 있다. 1987년 몬트리올 의정서에 의한 CFC 계열과 HCFC 계열 물질의 규제에 이어 1999년 교토의정서에 의한 지구 온난화 물질에 대한 규제는 HCFCs의 대체물질로 준비되어온 HFCs를 사용하지 말고 탄화수소, 이산화탄소, 암모니아, 질소 물 및 공기와 같은 환경 친화적인 자연냉매를 사용할 것을 요구하고 있다. 특히, 자연냉매중 이산화탄소는 공기중에서 쉽게 얻을 수 있어 비용이 저렴하고, 비열과 열전도율이 높고 비체적이 작으며 낮은 점도를 갖고 있어

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

열역학적으로 좋은 특성을 가지고 있다. 또한 무취, 무독하고 가연성 및 폭발성이 없다는 장점과 지구온난화지수(GWP)는 '1' 이고 오존층 파괴지수(ODP)는 '0'으로 환경적인 장점까지 갖추고 있어 대체 냉매로서 관심이 집중되고 있다. ⁽¹⁾

이러한 대체냉매에 적합한 냉동기유를 개발하는 것은 많은 장점을 가진 CO₂ 대체냉매를 실제 시스템에 적용하기 위해 수행되어야 할 중요한 일 중 하나이다. 냉동기유는 압축기의 접촉부위에 공급되는 윤활유로서 냉각, 세정, 실링, 부식방지 등의 역할을 한다. 이러한 냉동기유는 압축기의 파손을 방지할 뿐 아니라 증발기 및 냉동장치 전체의 성능에 영향을 끼친다.

특히, 압축기를 떠난 오일의 양보다 회수되는 오일의 양이 적을 경우 압축기 내에 오일의 양이 줄어들게 되고 부족한 윤활유로 운전되는 베어링은 마찰에 의한 과열로 고착되며 크랭크 샤프트와 베어링과 로터가 손상을 입고 고착되어, 최종적으로 압축기의 파손을 가져오게 된다.

따라서 냉매와 오일 혼합물에서 오일을 분리해서 압축기로 다시 보내어 주는 오일분리기의 역할은 매우 중요하다. 오일분리기를 적용함으로써 압축기에 오일을 적정 수준으로 유지시켜 주고 오일 슬러지를 감소시켜 주며, 증발기 효율을 증가시킬 수 있다.

CO₂냉매/오일 혼합물과 오일분리기에 대한 기존 연구들을 살펴보면 다음과 같다. 우선 CO₂냉매/오일 혼합물에 관한 연구로써 Schlager et al. ⁽²⁾은 냉매/오일 혼합물의 micro-fin tube에서 오일의 회수 양을 측정하고, 질량 유속, 오일 분율, 혼합물 점도, 증발기 출구의 상태에 따라 오일의 회수양이 변함을 제시하였다. Reyes-Gavilan et al. ⁽³⁾은 가정용 냉장고의 다른 증발 온도에서 오일회수와 윤활유의 유동 특성을 실험적으로 밝히고, R-134a/POE 혼합물과 R-134/MO 혼합물의 오일 회수 특성을 비교 실험하였다. 이 실험에서 압축기로의 오일 회수에 냉매 유속의 중요한 역할을 제시하였다. Sumida et al. ⁽⁴⁾은 액관에서 R-410A/AB 혼합물의 유동 특성과 오일 회수 특성을 분석하였다. 이 실험에서 액관에서는 오일 유속이 냉매유속보다 더 적음을 알고, 1 wt.% 이하의 오일 순환 농도에서 오일은 100% 회수됨을 보였다. 오일분리기에 관한 연구로써 Kim et al. ⁽⁵⁾은 기액이상류 원심분리기 내부의 유동 특성을

수치해석적으로 해석하여 분리기에서 석출되는 수분의 양과 속도와 원심분리기 길이와의 관계를 규명하고 원심분리기 내부에서의 압력 분포에 대한 경향을 제시하였다. 또한 Andresen and Richard ⁽⁶⁾은 중력을 이용한 분리기를 입구 형태를 달리하며 유액과 물방울 크기 분포에 따른 안정성에 대한 연구를 수행하여 입구 형태에 따른 분리기의 효율을 실험적으로 분석하고 지속적으로 유액이 유입되는 것이 압력강하와 유량에 의존한다는 연구 결과를 보였다.

이러한 연구로부터 HFC/오일 혼합물의 오일 분리 특성에 관한 연구와 CO₂/오일 혼합물의 오일회수 특성에 관한 연구 및 원심력을 이용한 오일분리기의 분리 특성에 관한 연구는 다양하게 이루어졌지만 중력을 이용한 오일분리기의 분리 특성 및 CO₂ 냉매를 사용한 오일분리기에 관한 연구는 미비한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 중력을 이용한 오일분리기를 사용하고 극성을 갖는 냉동기유인 PAG 오일을 선택하여 원형관내에서 CO₂ 와 혼합하여 압축액 상태로 유동시키는 경우의 유동상태를 가시화하고, U관 밀도계를 이용하여 냉매/오일 혼합물의 오일 농도와 온도를 변화시키면서 밀도를 측정하여 오일 분리기에서의 냉매/오일 혼합물의 오일 분리 특성을 규명하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

폐회로 시스템에서 냉매/오일 혼합물이 항상 액체 상태로 혼합되어 유동할 수 있게 시스템을 설계 제작하였다. 본 연구의 실험 장치는 높은 임계 압력을 갖는 CO₂ 냉매의 특성을 고려하여 실험 장치의 각 부분을 고압 피팅으로 연결하였다. Fig. 1 은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다.

실험장치는 크게 CO₂냉매 순환부와 냉매의 설정온도를 유지시키기 위해 에틸렌글리콜/물을 사용한 냉향온조 순환부, 냉매와 오일을 분리시키는 오일분리기 등으로 구성되어 있다. 에틸렌 글리콜/물순환부에 의해 설정 온도로 유지되어 수액기내에 저장되어 있는 CO₂냉매는 마그네틱 기어펌프에 의해서 순환을 하게 되며, CO₂오일 혼

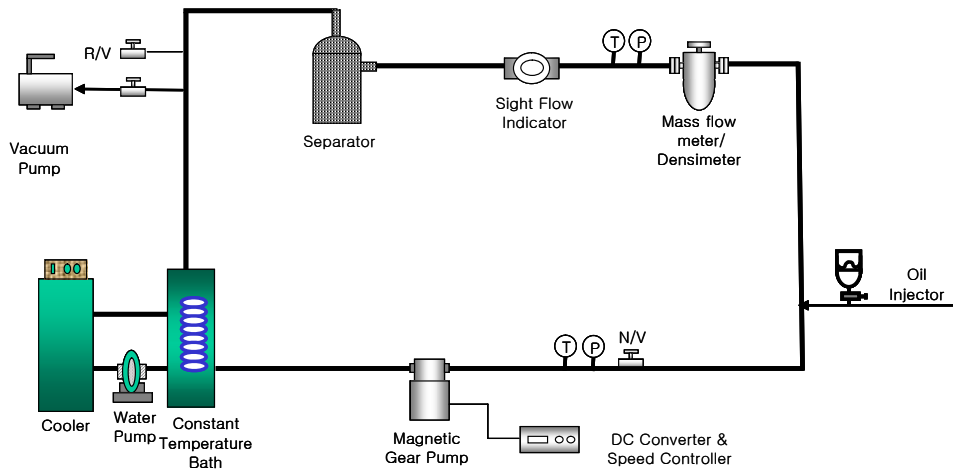


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system.

합물의 유량은 기어펌프의 회전속도를 변환시키는 속도조절기로 조절되며 유량은 질량 유량계로 측정하였다. 오일혼합을 위한 오일의 주입은 오일주입기(oil injector)를 사용하였다. CO₂를 관내에 충전하기 전에 진공펌프를 이용하여 관내를 진공으로 유지시키면서 실험 조건 농도에 해당하는 오일이 주입된 오일주입기를 반대편 충전포트에 연결하고 밸브를 열어 압력차를 이용하여 주입시켰다.

펌프에서 배출된 냉매는 밀도 측정을 위해 밀도계를 통과한다. 밀도가 측정되는 혼합물의 상태를 확인하기 위해 밀도계 출구에 설치된 가시화부(sight glass)를 통과한 후 최종적으로 수액

기로 모아지는 순환과정을 거치게 된다. 가시화부는 외경 20 mm, 두께 10 mm의 강화유리가 전·후면에 설치된 형상이며 부식과 냉매와의 화학적 반응을 방지하기 위해 SUS-316을 사용하여 제작되었다. 실험에 사용된 오일분리기는 유입되는 물질의 밀도차를 이용하는 것으로 상대적으로 밀도가 작은 CO₂ 냉매는 위쪽 유동라인으로 연결된 관으로 배출되고 밀도가 큰 오일은 아래로 가라앉는 원리이며 Fig. 2 에 나타내었다..

2.2 실험 조건 및 방법

오일 분리기에서 PAG 오일의 회수 특성 실험을 하기 위하여 오일 분리기 탈부착 시, 온도 변화와 CO₂/오일 혼합물의 농도 변화에 따른 혼합물의 밀도 변화를 밀도계를 이용하여 측정하였다. 먼저 순수 CO₂인 경우 설정 온도를 유지시키기 위해 냉동기(cooler) 순환부를 가동하고 진공펌프를 이용하여 원형 유동관내를 진공으로 유지시킨다. 그 후 CO₂ 충전용기를 저울에 달아 초기 질량을 기록해둔 후 원하는 질량을 충전포트(charging port)를 통해 수액기로 주입한다. 주입 후에 마그네틱 기어펌프를 가동하여 CO₂ 냉매를 순환시킨다. 설정한 입구온도와 질량유량에서 정상상태를 이루도록 시간을 두어 순환시킨다.

CO₂/오일 혼합물의 경우 오일 농도는 질량비(wt%)로 설정하므로 충전하고자 하는 CO₂에 대한 오일의 질량을 오일주입기에 주입한 후, 순수

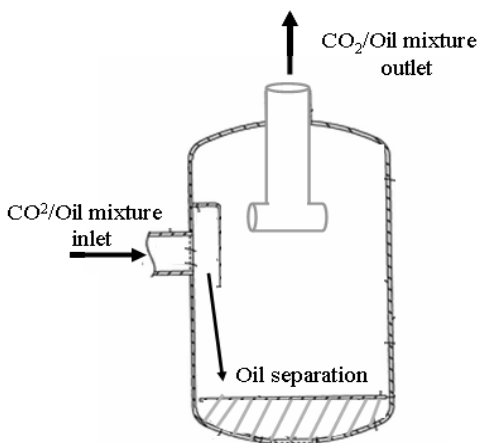


Fig. 2 Schematic diagram of oil separator.

Table 1 Typical properties of oil

Items	Property
Type	PAG oil
Manufacturer	CPI engineering
Model	RPAG-100
Specific gravity at 15°C	1.007
Pour point (°C)	-40
Flash point (°C)	168
Viscosity at 40°C (cSt)	100

CO₂인 경우의 실험과정에서 초기에 원형유동관 내를 진공펌프를 사용해 진공으로 유지시킬 때 오일 주입기를 반대편 충전포트에 연결하고 밸브를 열어 음압을 이용하여 주입시킨다. 실험과정은 순수 CO₂인 경우와 동일하며 데이터를 기록한다. 실험이 끝나면 유동관로를 모두 분리하여 관내와 구성품을 세척제를 이용하여 깨끗하게 세척한다. 실험에 사용된 오일은 CO₂냉매와 같이 상용되며 극성 냉동기유인 PAG 오일을 사용하였다. 이 오일은 화학적 안정성, 윤활성, 혼화성이 우수한 합성오일이며 오일의 물성은 Table 1 과 같다.

시스템은 압력 50bar, 유속 1kg/min 로 유지시키고, 오일의 농도는 1~5 (wt%) 온도는 0~15°C 사이에서 5°C 간격으로 변화시키며 각각 밀도를 측정하였다. 온도 변화와 CO₂/오일 혼합물의 농도 변화에 따른 오일분리기의 오일 분리율(R)의 변화를 식(1)을 이용하여 계산하였다.

$$R = 1 - \frac{\rho_{separator} - \rho_o}{\rho_{no-trap} - \rho_o} \quad (1)$$

3. 실험결과 및 고찰

오일 분리기 탈부착 각각의 경우 CO₂/PAG 오일 혼합물의 농도의 변화에 따른 밀도 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 오일 분리를 부착했을 경우의 설정온도 5°C에서 오일농도가 1% 일 때 오일분리기를 거친 혼합물의 밀도는 0.8995 g/ml,

오일농도 3% 일 때 0.9030 g/ml, 오일농도가 5% 일 때의 혼합물의 밀도는 0.9041 g/ml 로 측정되었다. 모든 설정 온도에서 농도가 증가할수록 밀도가 증가함을 보였다. 또한, 오일분리기를 부착했을 경우의 밀도가 오일분리기를 탈착했을 때의 밀도보다 작음을 알 수 있다.

CO₂/PAG 오일 혼합물의 온도의 변화에 따른 밀도 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 오일농도가 3%이고 온도가 0°C일 때 밀도는 0.9366 g/ml 이고 5°C의 온도에서의 밀도는 0.9030 g/ml 이다. 온도가 10°C일 때의 밀도는 0.8679 g/ml 이며 1

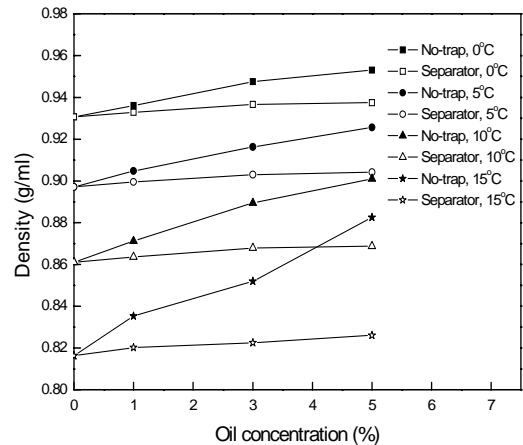


Fig. 3 Effect of oil concentration on mixture density for various temperatures.

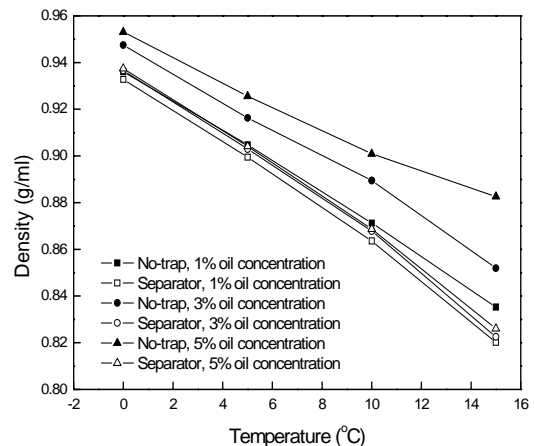


Fig. 4 Effect of temperature on mixture density for various oil concentrations.

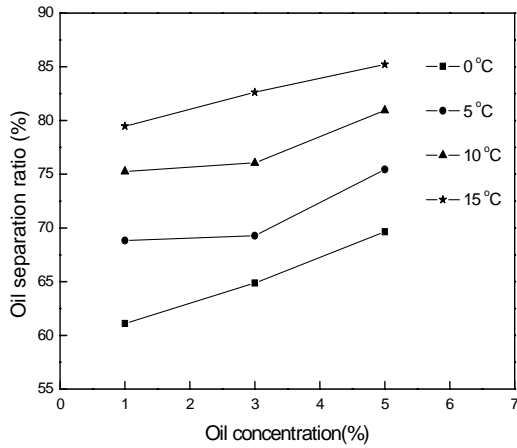


Fig. 5 Effect of oil concentration on oil separation ratio for CO₂/PAG oil mixture.

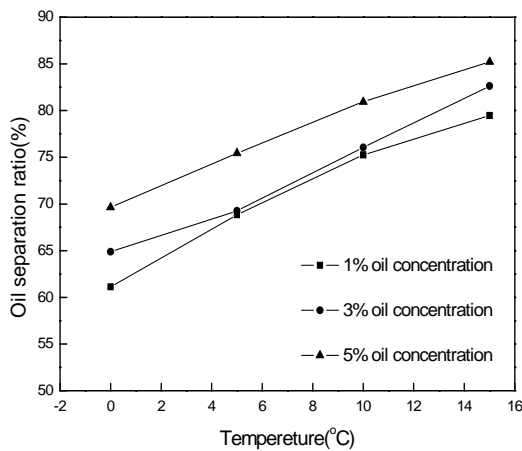


Fig. 6 Effect of temperature on oil separation ratio for CO₂/PAG oil mixture.

5°C의 온도에서의 밀도는 0.8225 g/ml 이다. 모든 농도 범위에서 온도가 증가함에 밀도는 감소하였다. 농도 변화에 대한 밀도값에서와 마찬가지로 오일분리기를 부착했을 경우의 밀도가 탈착했을 경우보다 작음을 알 수 있다.

혼합물의 농도변화에 따른 오일 분리율의 변화는 Fig. 5에 나타내었다. 온도가 15°C에서 오일 농도가 1% 일 때 오일 분리기에서의 오일 분리율은 79%, 오일농도 3%일 때 82%, 오일농도가

5%일 때 오일 분리율은 85%를 보였다. 모든 온도범위에서 CO₂/PAG 오일 혼합물의 농도가 증가함에 따라 오일분리기에서 분리되는 오일의 분리율은 증가하였다.

CO₂/PAG 오일 혼합물의 온도 변화에 따른 오일 분리율을 Fig. 6에 나타내었다. 오일농도가 3%이고 온도가 0°C일 때 오일분리기의 오일분리율은 65%, 5°C일 때 오일 분리율은 69%, 10°C일 때 76%, 15°C일 때 오일 분리율은 83%를 보였다. 모든 농도 범위에서 CO₂/PAG 오일 혼합물의 온도가 증가함에 따라 오일 분리기에서 분리되는 오일의 분리율은 증가하였다. CO₂/PAG 오일 혼합물의 상용성에 의하여 오일 농도가 증가하고 온도가 증가함에 따라 오일분리기에서 걸러지는 오일의 분리율이 증가하는 것으로 판단된다.

4. 결론

CO₂를 냉매로 사용하는 냉동시스템에서 유동 중인 냉매/오일 혼합물에서 오일 분리기에 의해 분리되는 오일의 분리량을 알아보기 위한 실험을 수행하였다. 오일 분리기 탈부착에 따른 혼합물의 밀도 변화를 온도와 농도를 변화시키면서 밀도계를 이용하여 측정하였다. 오일분리기를 부착하였을 때의 밀도가 오일분리기를 부착하지 않은 경우의 밀도보다 작게 측정되었다. 이는 오일 분리를 부착함으로써 그렇지 않은 경우보다 많은 양의 오일을 분리해 주고 있음을 확연히 보여주는 결과이다. 또한 PAG 오일은 오일 농도가 증가하고 온도가 높을수록 오일 분리기에서 분리되는 오일의 분리율이 증가함을 보였다. CO₂/오일 혼합물의 상용성에 따라 오일 분리기에서의 오일 분리율이 결정된다고 판단할 수 있다.

후 기

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

참고문헌

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. Schlager, L. M., Pate, M. B. and Bergles, A.E. 1990, Oil quantity measurements in smooth and micro-fin tubes during evaporation and condensation of refrigerant-oil mixtures, ASHRAE Trans., Vol. 1, pp. 465-469
 3. Reyes-Gavilan, J., Flak, G. T. and Tritcak, T. R. 1996, Lubricant return comparison of naphthenic and polyol ester oils in R-134a household refrigeration applications, ASHRAE Trans., Vol. 102(2), pp. 180-185.
 4. Sumida, Y., Nakayama, M., Suzuki, S. and Kawaguchi, S., 1998, Alkylbenzene for split air conditioner with R-410a part 2: Oil return characteristics, In Proc. 1998 International Compressor Engineering Conference at Purdue, pp. 471-476.
 5. Kim, J. M., Lee, J. H., Yoon, Y. K. and Kim, H. D. 2007, A study of the performance improvement of a centrifugal separator for gas-liquid two-phase flow, The Korean Society of Mechanical Engineers 2007.5 pp. 3352-3357.
 6. Andresen, P. A. K. and Richard, A. J. S., 2000, Stability of model emulsions and determination of droplet size distributions in a gravity separator with different inlet characteristics, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 170 pp. 33-44.