

CO₂ 냉동시스템용 액상배관에서 PAG 및 POE 오일회수 특성에 관한 실험적 연구

(An Experimental Study on Oil Return of PAG and POE from a Liquid Line for a CO₂ Refrigeration System)

이성광

(주)우원엠앤이(tka710@300302.com)

서론

근래의 산업 사회는 인류의 삶의 질을 향상시키기 위해 기술 개발뿐만 아니라 환경보호문제를 함께 고려하고 있다. 이러한 지구환경 문제들 중 대표적인 문제로서 오존층 파괴와 지구 온난화의 문제가 심각하게 대두되고 있다. 이러한 인식아래 1987년 몬트리올 의정서에서 CFC 계열과 HCFC 계열 물질의 규제에 이어, 1999년 교토의정서에 의한 지구 온난화 물질에 대한 규제는 HFC계열 냉매의 사용에도 제동을 걸게 되었다. 이러한 문제에 근본적으로 대처하기 위한 방법으로 환경론자들은 자연에 존재하는 물질을 냉매로 사용하는 자연 냉매의 도입을 요구하고 있다. 이에 따라 암모니아, 질소, CO₂, 프로판 등의 자연물질이 관심의 대상이 되고 있으며, 이 중 CO₂는 오존층 파괴지수(ODP)가 '0' 이고, 지구온난화지수(GWP)가 '1' 로서 환경적인 장점이 있다. 또한 안정성이 뛰어나고, 무취, 무독하며 폭발성이 없어 대체 냉매로서 관심이 집중되고 있다.

새로운 대체냉매를 시스템에 적용하기 위해서는 그에 따라 수행해야 할 여러 가지 중요한 일들이 있는데 그중의 하나가 대체냉매에 적합한 냉동기유를 개발하는 것이다. 냉동기유는 압축기의 접촉 부위에 공급되는 윤활유이며 냉각, 세정, 실링, 부식방지 등의 기능을 수행한다. 이러한 냉동기유는 대부분 압축기 내에 존재하나, 오일이 냉매의 유동

에 의해 냉동시스템 내부를 순환하여 다시 압축기로 돌아오게 된다.

그러나 냉동시스템의 구성 형태나 냉매/오일 혼합물의 용해도 및 상용성 등에 영향을 받아 압축기를 떠난 오일의 양보다 회수되는 오일의 양이 적을 경우 압축기 내에 오일의 양이 줄어들게 되어, 최종적으로 윤활에 문제가 발생하여 압축기의 파손을 가져올 수 있다. 고장 난 압축기를 개방했을 때 고장원인 중 가장 손쉽게 찾을 수 있는 요인 중의 하나는 윤활유의 부족이다. 베어링 표면에 윤활유가 없는 상태에서 운전되며 마찰에 의한 과열로 고착되게 된다. 또한 크랭크 샤프트와 베어링 그리고 로터가 손상을 입고 고착이 되어 거의 파손 직전에 이른 것을 알 수 있으며 오일펌프가 장착 되었다면 오일펌프 또한 심하게 손상되고 마모된다. 그리고 오일이 냉매와 함께 혼합되어 냉동시스템을 순환하게 되면 열교환기나 팽창장치의 성능에 영향을 끼친다.

따라서, 본 연구에서는 U관 밀도계를 이용한 비추출식 방법으로 냉매/오일 혼합물의 오일 농도, 온도, 질량 유량, 액상배관의 관경, 길이를 변화시키면서 밀도를 측정하여 CO₂를 냉매로 사용하는 냉동시스템의 액상배관에서의 오일 회수 특성을 제시하고자 한다.

실험장치

냉매/오일 혼합물이 항상 액체 상태로 혼합되어



유동할 수 있는 폐회로 시스템을 설계 제작 하였다. CO₂는 다른 냉매에 비하여 낮은 임계온도에서 높은 임계압력을 갖기 때문에 초월 임계사이클을 이루게 된다. 따라서 본 연구의 실험장치는 CO₂냉매의 특성을 고려하여 실험장치의 각 부분을 고압 피팅으로 연결하였다. 그림1은 실험장치의 개략도를 나타내었다.

실험장치는 크게 CO₂냉매 순환부와 냉매의 설정 온도를 유지시키기 위해 에틸렌글리콜/물을 사용한 냉향온조 순환부, 혼합물 추출 장치 등으로 구성되어 있다. 에틸렌 글리콜/물 순환부에 의해 설정 온도로 유지되어 수액기내에 저장되어 있는 CO₂냉매는 마그네틱 기어펌프에 의해서 순환을 하게 되며, CO₂/오일 혼합물의 유량은 기어펌프의 회전속도를 변환시키는 속도조절기로 조절되며 유량은 질량 유량계로 측정하였다. CO₂를 관내에 충전하기 전에 진공펌프를 이용하여 관내를 진공으로 유지시키면서 실험 조건 농도에 해당하는 오일이 주입된 오일주입기를 반대편 충전포트에 연결하고 밸브를 열어 압력차를 이용하여 주입시켰다.

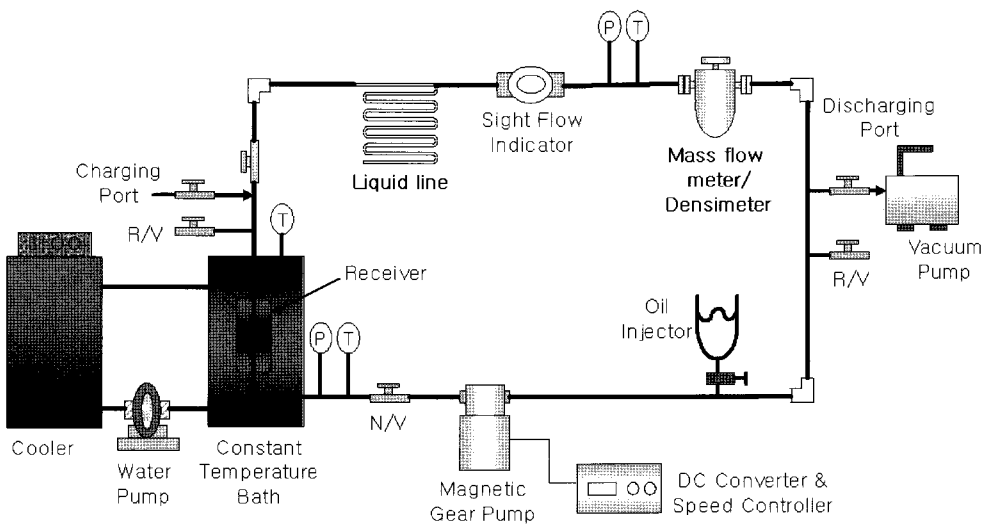
기어펌프에서 배출된 냉매는 밀도 측정을 위해 밀도계를 통과한다. 밀도가 측정되는 혼합물의 상태를 확인하기 위해 밀도계 출구에 설치된 가시화

부(sight glass)를 통과한 후 최종적으로 수액기로 모아지는 순환과정을 거치게 된다. 유동 라인중 직관부 부분에 액상배관을 설치하였다.

실험조건 및 방법

실험 조건은 표 1과 같으며, 실험순서는 다음과 같다. 순수 CO₂인 경우 설정온도를 유지시키기 위해 냉동기(cooler)순환부를 가동한다. 또한 진공펌프를 이용하여 원형 유동관내를 진공으로 유지시킨다. 그 후 CO₂ 충전용기를 저울에 달아 초기질량을 기록해둔 후 원하는 질량을 충전포트(charging port)를 통해 수액기로 주입한다. 주입이 끝나면 마그네틱 기어 펌프를 가동하여 CO₂냉매를 순환시킨다. 설정된 질량유량은 기어펌프에 부착된 속도조절기를 증감시키면서 조절할 수 있다. 설정한 입구온도와 질량유량에서 정상상태를 이루도록 시간을 두어 순환시킨다.

CO₂/오일 혼합물인 경우 시스템 내부를 진공펌프로 진공상태로 만든 후 오일 주입기로 차압을 이용하여 시스템 내에 오일을 주입한다. 그리고 시스템 내부의 체적, 압력과 온도 조건을 고려하여 냉매가 액상으로 순환할 수 있는 조건에 따라 실험



[그림 1] 실험장치 개략도

장치에 3 kg 정도의 CO₂ 냉매를 충전한다. 기어펌프와 항온조를 가동시키고 가시화부를 통해 액상태가 구현되었는지 확인하고 시스템 내부가 설정 온도로 균일하게 분포되었는지 확인한다. 시스템이 정상상태가 되었을 때 혼합물의 온도, 압력, 밀도 그리고 오일의 농도를 측정한다.

데이터 처리

CO₂/오일 혼합물에서 실험이 수행되는 오일 농도에 따라 주입해야 할 오일의 질량을 구하기 위해서 식 (1)을 사용하였다.

$$OC = \left(\frac{m_o}{m_r + m_o} \right) \times 100 \quad (1)$$

<표 1> 실험조건

Parameter	Value	
	PAG	POE
Oil	PAG	POE
Pressure (bar)	60	
Concentration (w.%)	1, 3, 5	
Temperature of Mixture (°C)	0~15 (5°C interval)	
Mass flow rate (kg/min.)	1.4 ~ 2.0	
Length (cm)	20, 25, 30	-
Diameter (inch)	1/4, 3/8, 1/2	-

여기서 OC는 혼합물에서의 오일의 농도이고 m_r 는 실험 장치에 들어가는 CO₂ 냉매의 질량이다. 그리고 m_o 는 농도에 따른 오일의 질량이다.

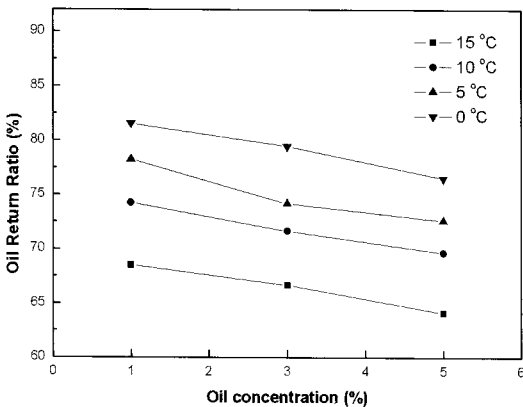
온도 변화와 CO₂/오일 혼합물의 농도 변화에 따른 액상배관에서의 오일회수율(OR, Oil Return ratio)의 변화를 식 (2)를 이용하여 계산하였다

$$OR = \left(\frac{\rho_{liquid\ line} - \rho_0}{\rho_{w/o-liquid\ line} - \rho_0} \right) \times 100 \quad (2)$$

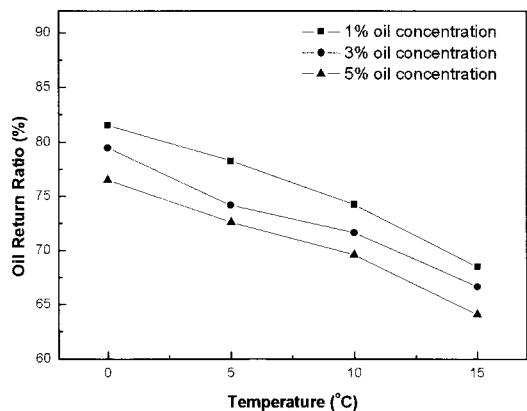
여기서 ρ_0 는 각 설정 온도에서 순수 CO₂ 냉매의 밀도 값이며 $\rho_{liquid\ line}$ 와 $\rho_{w/o-liquid\ line}$ 은 액상배관을 설치하였을 때와 설치하지 않았을 때의 설정 온도 및 농도에 대한 밀도 값이다.

결과 및 고찰

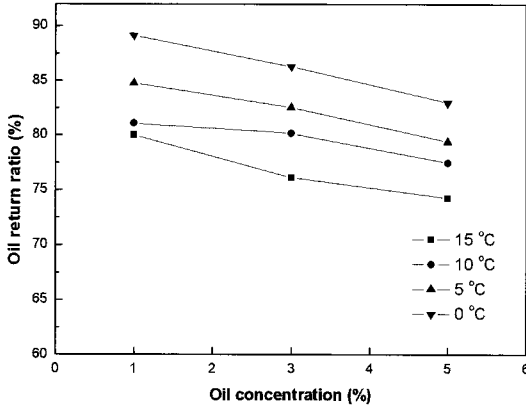
그림 2는 온도변화에 따른 PAG오일 회수율을 그림 3은 온도변화에 따른 PAG오일 회수율을 나타내었다. PAG오일 회수율은 CO₂/PAG 오일 혼합물의 상용성 영향으로 오일농도가 감소함에 따라, 온도가 감소함에 따라 오일 회수율이 증가하는 것으로 판단된다. 그림 4는 온도변화에 따른 POE오일 회수율을 그림 5는 온도변화에 따른 POE오일 회수율을 나타내었다. POE오일 회수율 또한 CO₂/POE 오일 혼합물의 상용성 영향으로 오일농도가



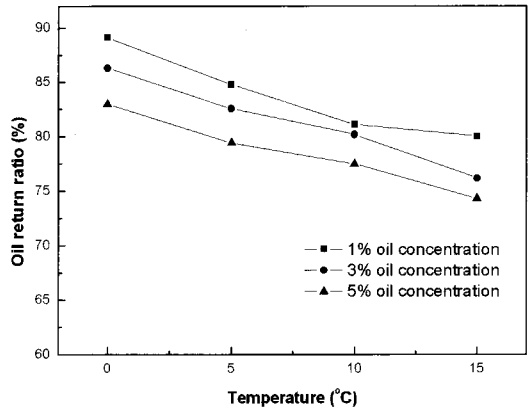
[그림 2] 오일농도 변화에 따른 PAG오일 회수율



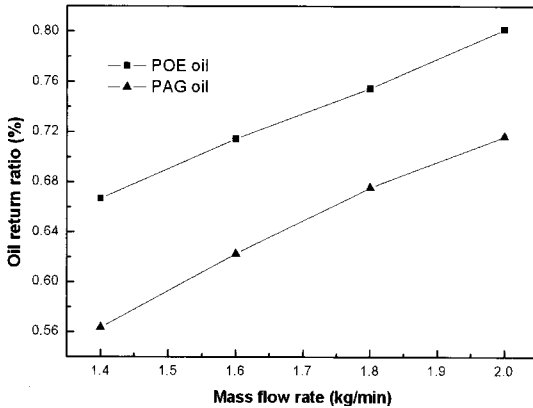
[그림 3] 온도변화에 따른 PAG오일 회수율



[그림 4] 오일농도 변화에 따른 POE오일 회수율



[그림 5] 온도변화에 따른 POE오일 회수율



[그림 6] 질량유량 변화에 따른 오일 회수율

감소함에 따라, 온도가 감소함에 따라 오일 회수율이 증가하는 것으로 판단된다.

그림 6은 질량유량 변화에 따른 오일 회수율을 나타내었다. 질량유량이 증가함에 따라 액상배관에 트랩되는 오일의 양이 감소하여 오일 회수율은 증가하는 것으로 판단된다. 또한, CO₂/PAG 오일 혼합물과 CO₂/POE 오일 혼합물의 회수율을 비교해 보면, POE 오일이 PAG 오일보다 회수율 면에서 더 우수함을 보였다.

결론

냉매/오일 혼합물의 오일 농도, 온도, 질량 유량,

액상배관의 관경, 길이를 변화시키면서 밀도를 측정하여 CO₂를 냉매로 사용하는 냉동시스템의 액상배관에서의 오일 회수 특성을 실험을 통하여 확인하였다. PAG오일과 POE오일의 회수특성을 확인한 결과 오일/CO₂ 혼합물의 상용성의 영향을 가장 많이 받는다고 판단된다. POE오일이 PAG오일보다 CO₂냉매와의 상용성이 우수하며, 오일회수 측면에서만 볼 때 POE오일이 PAG오일보다 CO₂냉매용 냉동기유로 적합하다고 판단된다. 하지만, 새로운 대체냉매에 적합한 냉동기유를 선정하기 위해서는 다른 중요한 실험들이 추가적으로 요구되며, 본 연구는 오일회수 측면에 대한 오일선정의 근거자료로 활용될 수 있으리라 생각된다.

참고문헌

1. Clodic, D., 2008, Latest HVAC&R development trends in European response to imminent HFC regulations, Preliminary Proceedings of the 12th International Refrigeration Conference at Purdue.
2. 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.
3. ASHRAE, 1998, Lubricants in Refrigerant Systems, ASHRAE Handbook, Refrigeration, SI ed., chapter 7, pp. 1-24.
 4. 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.
 5. Fung, K. and Sundaresan, S. G., 1994, Study of oil return characteristics in a display case refrigeration system. comparison of different lubricants for a HFC-Bend refrigerant, Proc. 5th International Refrigeration Conference at Purdue, pp. 121-128.
 6. Biancardi, F. R., Michels, H. H., Siemel, T. H, and Pandy, D. R.. 1996, Study of lubrication circulation in HVAC systems, The Air Conditioning and Refrigeration Technology Institute, ARTIMCLR project number 665-53100, DOE/CE/23810-71-Vol.1.
 7. 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.
 8. 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.
 9. Cremaschi, L., Hwang, Y. and Radermacher, R., 2004, Investigation of oil retention in residential heat pumps, In Proc. 10th International Refrigeration Conference at Purdue, R104.
 10. Cavestri, R. C., 1993, Measuring of the solubility, viscosity and density of synthetic lubricants with HFC-134a, Final Report for ASHRAE 716-RP. 