

핀-튜브 열교환기에서 PVE오일이 증발/응축 열전달 성능에 미치는 영향

이 현 우, 정 영 만, 이 재 근[†], 박 내 현*

부산대학교 기계공학과, *LG 전자

The Effect of PVE Oil on the Evaporation/Condensation Heat Transfer Performance of Fin-tube Heat Exchanger

Hyunwoo Lee, Youngman Jeong, Jaekeun Lee[†], Naehyun Park*

School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

^{*}Digital Appliance Laboratory, LG Electronics, Gyeongnam 641-711, Korea

ABSTRACT: In vapor compression systems which use refrigerant as a working fluid, the oil is commonly used for compressor lubrication. Since the presence of lubrication oil can change the characteristics properties of refrigerant, the oil affects the heat transfer performance of heat exchanger to a large extent. In this paper, we focus on the effect of PVE oil experimentally on heat transfer performance of the fin-tube heat exchangers which use R410A as a refrigerant. To evaluate the heat transfer performance, the refrigerant to air type test facility chamber has been used. Fin-tube heat exchanger with grooved has been tested while according to the oil mass fraction variation from nearly zero to 1.7 wt%. It was found that the low level of oil mass fraction has an obvious effect on heat transfer performance, while the high level seems no significant influence. The influence of the oil mass fraction to heat transfer performance, however, is different between evaporation and condensation.

Key words: Fin-tube heat exchanger(핀-튜브 열교환기), Oil mass fraction(오일 함유량), Heat transfer performance(열전달 성능), Evaporation(증발), Condensation(응축)

기 호 설 명

A : 보정계수
 C_p : 정압비열 [kJ/kg K]
 h : 냉매 엔탈피 [kJ/kg K]
 \dot{M}_a : 공기측 풍량 [m^3/h]

\dot{M}_r : 냉매측 유량 [kg/h]
 m : 냉매 무게 [kg]
 n : 굴절률값
 Q : 열전달 성능 [kW]
 T : 온도 [°C]

그리스 문자

x : 질량 분율 [wt%]
 β : 부피 분율 [vol%]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-51-510-2455; fax: +82-51-582-6368

E-mail address: jklee@pusan.ac.kr

ρ : 밀도 [kg/m³]

하첨자

air : 공기
mix : 냉매-오일 혼합물
ref : 냉매
oil : 오일
i : 입구
o : 출구

1. 서론

최근 냉동 공조 시스템에서는 냉매 이송장치로 정속으로 회전하는 압축기 대신에 부하의 변화에 따라 반응 할 수 있는 인버터 압축기(inverter-compressor)를 많이 사용하고 있다. 부하가 커지거나 혹은 작아지면 이에 따라 압축기의 회전수의 변화로 냉매를 토출하게 된다. 일반적으로 압축기에는 오일이 들어있는데, 이 오일은 압축기 내 기계요소의 마모를 방지하거나 냉각 작용의 역할을 하지만, 소량의 오일이 냉매와 함께 압축기에서 토출되어 시스템을 순환하면서 냉매의 물성치에 영향을 주고, 또한 관내벽에 흡착되어 관내 유동의 패턴을 변화 시킨다. 이로 인해 열전달 성능과 압력강하에 영향을 미친다. 인버터형 압축기를 사용하면, 압축기의 회전수가 높아질수록 오일이 냉매와 함께 토출되는 양이 많아지게 되고, 자연스럽게 열전달 성능과 압력강하에 미치는 영향 또한 커지게 된다.⁽¹⁾

오일이 열전달 계수와 압력강하에 미치는 영향에 대한 선행연구는 단일관, 히트펌프, 에어컨 등의 시스템 그리고 열교환기 단품에서 그 영향성을 연구가 진행되었다. 특히 단일관에서 오일의 영향성을 많이 연구했는데, Hu et al.⁽²⁾은 내경이 7 mm 마이크로핀관(micro-fin tube)에서 R410A/오일 혼합물을 사용하여 열전달 특성에 미치는 오일의 영향성에 대해 연구를 하였다. 오일이 열전달 특성에 미치는 영향은 낮은 건도 영역에서는 좋은 영향을 미쳤지만, 높은 건도 영역에서는 안 좋은 영향을 미치는 것으로 나왔고, 높은 건도 영역에서 오일 농도가 증가 할수록 열전달 계수가 급격히 감소했다. Wei et al.^(3,4)은 관내 직경이 큰 원형관과 직경이 작은 원형관에서 오일

의 영향성에 대해 연구하였다. 관내 직경이 큰관보다 작은 관의 경우 오일의 영향성이 더 크다는 결과가 나왔다. Chen et al.⁽⁵⁾은 R410A를 이용하여 U-곡관을 가진 단일관에서 압력강하에 미치는 오일의 영향성에 대해 연구를 수행하였고, 유량에 따라서 관의 입출구 압력 차이를 분석하고 이전의 연구와 비교하여 상관식을 제시하였다. Dang et al.⁽⁶⁾은 CO₂/PAG 혼합물의 이용하여 원형관에서 실험을 수행하였다. CO₂의 경우도 관직경이 작을수록 오일이 열전달 계수와 압력강하에 미치는 영향을 많이 미치는 것으로 확인하였다. 시스템전체에서 오일이 COP와 성능에 미치는 영향성에 대해 실험한 연구로는 대표적으로 Lottin et al.^(7,8)이 수행한 연구가 있다. 시뮬레이션(simulation)을 통해 시스템을 순환하는 오일이 증가 할수록 시스템전체의 COP는 감소하는 것을 확인했으며, 오일 순환량이 0.5wt%이하의 영역에서는 COP의 감소가 없이 일정했지만, 이상의 영역에서는 COP가 급격히 감소하는 것으로 결과가 나왔고, 오일순환량이 증가 할수록 5-13%의 성능 감소가 나타났다. Yoshioka et al.⁽⁹⁾은 열교환기 단품에서 연구를 수행하였고, 오일함유량이 증가 할수록 열전달 성능은 감소하는 것을 확인했고, 그루브(grooved)가 있는 열교환기의 경우에는 오일 순환량이 1.0 wt%이상의 영역에서는 최대 50%까지 성능이 감소하는 결과를 확인했고, 증발기와 응축기에서의 오일 잔류량을 측정된 결과 순환량에 따라 열교환기 속 오일 잔류량이 많은 것으로 분석했다.

이처럼 오일이 열전달 특성과 압력강하에 미치는 영향에 대해 연구가 많이 이루어졌지만, 주로 단일관에서 연구가 수행되었고, 시스템 전체와 열교환기 단품에 대해서는 간헐적으로 연구가 수행되었다.

본 연구의 목적은 R410A를 사용하는 열교환기 성능평가 장치를 이용하여 핀-튜브 열교환기(fin-tube heat exchanger)에서 PVE오일 함유량에 따른 증발/응축 열전달 성능의 변화에 미치는 영향에 대해 알아보려고 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

열전달 성능을 평가하기 위해 공기 대 냉매 방식의 공기조화 챔버를 사용하였으며, Fig. 1은 실험 장치(psychrometric wind tunnel facility) 개략도 이다. 이 장치는 크게 항온/항습 챔버, 풍동 그리고 냉매 공급라인으로 크게 3부분으로 구성되어 있다. 챔버에는 공기 조절 장치와 공기 샘플링(sampling)장치가 구비되어 있어, 공기의 상태나 풍량을 조절할 수 있으며, 풍동은 노즐이 부착되어 풍속을 조절할 수 있다. 실험은 ASHRAE(1987,1992)^(10,11)을 기준으로 ± 0.1 K의 오차를 가지는 RTD(PT100) 온도센서를 통해 건구온도, 습구온도를 측정하였으며, 공기측 입구온도는 ARI standard⁽¹²⁾를 기준으로 선정하였다. 냉매공급라인의 경우는 R410A용 인버터형 압축기가 사용되며, 압축기 회전수 조절을 통해 오일 함유량에 따른 증발과 응축 성능 평가를 수행할 수 있으며, 압축기 출구쪽에 3개의 오일 분리기 가 설치되어 있어 오일 함유량이 거의 0 wt%인 실험이 가능하다. 오일 샘플링 포트(oil sampling port)와 오일센서(oil sensor)는 팽창밸브 전단에 설치되어 액상일 때 오일 함유량을 측정하였다. 열전달 성능 실험 시 열교환기 단품과 외부와의 열손실을 줄이기 위해 배관 주위로 단열재를 부착하였다. 본 연구에서 사용된 열교환기 단품은



Fig. 2 Shape of test heat exchanger; fin-tube heat exchanger with grooved

Fig 2. 와 같은 관내 핀이 있는 원형관 열교환기로 표면에 친수 코팅처리를 통해 증발과 응축 모두 사용할 수 있는 열교환기이다. 관내측의 핀 타입(fin-type)은 루버핀(louver fin)이 부착되어 있으며, 외경은 9.52 mm로 2열로 구성되어 있다. 자세한 세부 내용은 Table 1. 에 나타나 있다. 증발과 응축 성능 평가 실험 조건은 앞서 언급한 것처럼 증발 성능 평가는 실내조건, 응축 성능평

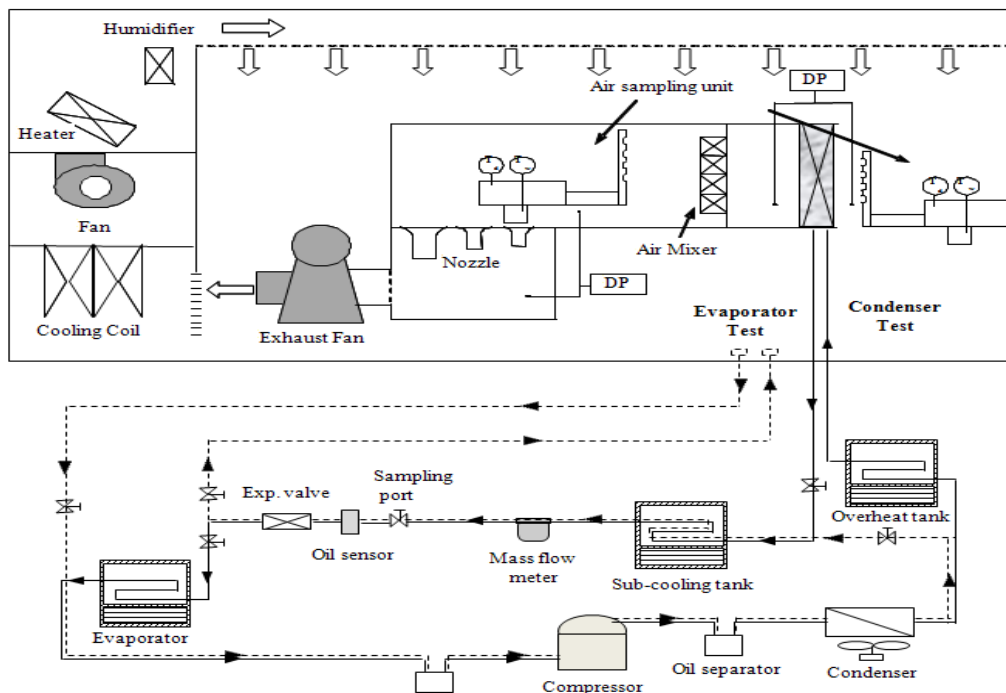


Fig. 1 A schematic diagram for psychrometric wind tunnel facility

Table 1 Geometrical characteristics of the fin-tube heat exchanger

W x H x D (mm)	400 x 305 x 39
Row	2
Column	12
Outer diameter (mm)	9.52
Fin type	Louver

가는 실외조건인 ARI "A" 조건으로 선정하였다. 풍속은 증발일 때, 1.4 m/s와 1.8 m/s, 응축의 경우는 풍속이 3.5 m/s와 4.0 m/s로 실험을 수행하였으며, 이때 오일 함유량의 범위는 최대 1.7 wt%까지 실험을 진행하였다. 자세한 실험 조건은 다음의 Table 2에 잘 나타나 있다.

2.2 실험결과 처리 방법

열교환기 성능평가 장치에서 열교환기 단품의 열전달 성능과 압력 강하는 정상상태에 도달한 상태에서 공기측과 냉매측의 에너지 평형에서 $\pm 3\%$ 이내의 값을 읽어 계산한다.

에너지 평형을 평가하기 위해 공기측 열전달 성능과 냉매측 열전달 성능은 다음과 같이 계산된다.

$$Q_{air} = \dot{M}_a C_{p,air} (T_{air,i} - T_{air,o}) \quad (1)$$

$$Q_{ref} = \dot{M}_r (h_i - h_o) \quad (2)$$

위 식에서 구한 공기측 열전달 성능과 냉매측 열전달 성능을 이용하여 열교환기 단품에서의 열전달 성능을 다음과 같이 구한다.

$$2 \times \frac{(Q_{ref} - Q_{air})}{(Q_{ref} + Q_{air})} \quad (3)$$

오일함유량은 오일샘플링과 오일센서를 이용하여 측정한다. 오일 샘플링 방법의 경우에는 ASHREA standard 41.4⁽¹³⁾를 참고하여 샘플링 실린더 방법(sampling cylinder method)으로 오일 샘플링 포트에서 약 400g 정도의 액상의 R410A/PVE 혼합물을 추출하여 오일함유량을 측

정하였다. 오일센서를 이용한 오일 함유량 측정은 Fukuta et al⁽¹⁴⁾을 참조하여 측정하였으며, 냉매속 오일함유량은 다음과 같이 계산 된다. 먼저, 식(4)에서 냉매-오일 혼합물의 부피 분율을 구하게 된다.

$$n_{mix} = \beta n_{ref} + (1 - \beta) n_{oil} + A\beta(1 - \beta) \quad (4)$$

여기서 A는 보정계수이고, n_{mix} 는 오일센서에서 읽어 들이는 냉매-오일 혼합물의 굴절률값이고, n_{ref} 과 n_{oil} 은 각각 온도에 따른 냉매와 오일의 굴절률값이다. 냉매-오일 혼합물의 부피분율을 구하고 식(5)을 통해 냉매의 질량 분율을 구한다.

$$\beta = \frac{\chi}{\chi + (\rho_{ref}/\rho_{oil})(1 - \chi)} \quad (5)$$

온도에 따른 냉매 밀도 ρ_{ref} 와 오일의 밀도 ρ_{oil} 는 실험을 통해 상관식을 만들어 사용하였다. 여기서 구한 χ 값을 이용하여 최종적으로 오일 함유량을 계산할 수 있다.

$$Oil\ Mass\ Fraction[wt\%] = (1 - \chi) \times 100 \quad (6)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 증발 열전달 실험결과

오일함유량에 따른 증발 열전달 성능과 열전달 성능비가 Fig. 3과 Fig. 4에 나타나 있다. 공기 풍속이 1.4 m/s와 1.8 m/s 두 경우에 대해 각각의 오일의 영향성에 대해 실험을 수행하였고, 오일함

Table 2 Experiment conditions

Properties	Evaporation	Condensation
Air inlet temp. (°C)	Dry 27 Wet 19.5	Dry 35 Wet 24
Ref. sat. temp. (°C)	5.6	46
Ref. pressure (MPa)	0.95	2.8
Air flow velocity (m/s)	1.4, 1.8	3.5, 4.0
Oil mass fraction (wt%)	nearly zero to 1.7 wt%	

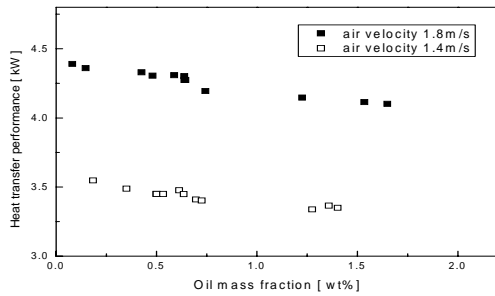


Fig. 5 Effect of oil mass fraction on heat transfer performance in evaporation

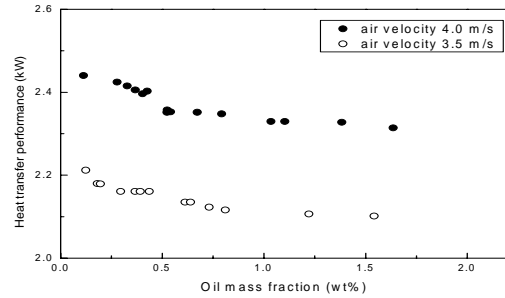


Fig. 5 Effect of oil mass fraction on heat transfer performance in condensation

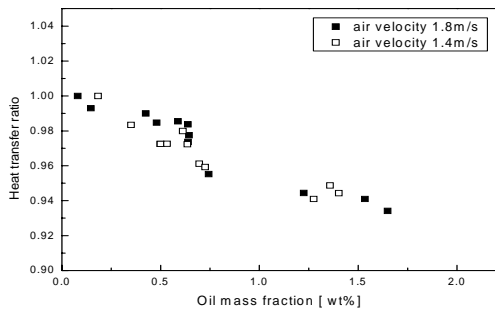


Fig. 6 Effect of oil mass fraction on heat transfer ratio in evaporation

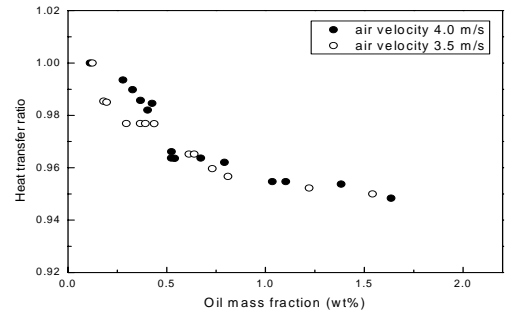


Fig. 6 Effect of oil mass fraction on heat transfer ratio in condensation

유량이 0.5 wt%이하의 저농도 영역에서 급격한 열전달 성능감소가 나타났고, 0.74 wt%일 때, 초기값 대비 열전달 성능이 5%이상 감소한 결과가 나왔다. 또한 풍속이 1.8 m/s 이고, 오일함유량이 1.65 wt%일 때, 열전달 성능은 최대 7.7% 감소한 결과를 확인 하였다. 초기값 대비 열전달 성능을 표시한 Fig. 4에서 확인 할 수 있듯이 오일함유량이 1.0 wt%이하의 영역에서 열전달 성능이 급격히 감소하는 것을 알 수 있고, 1.0 wt%이상의 영역에서도 열전달 성능이 감소하지만 그 폭은 상대적으로 작다.

3.2 응축 열전달 실험결과

Fig. 5는 풍속이 3.5 m/s와 4.0 m/s 일 때, 오일함유량에 따라서 응축 열전달 성능의 변화를 나타낸 것이다. 풍속이 4.0 m/s 일 때, 오일함유량이 1.63 wt%에서 열전달 성능은 초기값 대비

최대 5.16% 감소했으며, Fig. 6에서 결과를 분석해 보면 응축 열전달 성능의 경우도 증발과 마찬가지로, 오일 함유량이 0.5 wt%이하의 영역에서 급격한 성능 감소가 나타나고, 1.0 wt%이상의 영역에서는 성능이 감소하지만, 그 폭은 상대적으로 작은 것을 확인할 수 있다. 실험결과에서 증발과 응축의 성능에 미치는 오일의 영향성은 비슷하다고 볼 수 있으며, 상대적으로 증발일 경우가 성능 감소가 더 컸는데, 액상일 때 오일이 냉매와 잘 섞이기 때문에 냉매의 물성치에 영향을 많이 주는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 핀-튜브 열교환기에서 오일 함유량이 증발 및 응축 성능에 미치는 영향에 대해 유속을 달리하면서 실험을 수행하였으며, 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 오일 함유량이 0.7 wt%이하의 범위에서는 증발/응축 열전달 성능이 모두 급격히 감소하였으며, 1.0 wt%이상의 범위에서는 감소폭이 줄어들었다.

(2) 증발/응축 열전달 성능에 대한 오일의 영향을 분석한 결과 응축 열전달 성능과 비교하여 증발 열전달성능이 약 2.5% 더 크게 감소한 것을 확인했다.

참고문헌

1. Youbi-Idrissi, M. and Bonjour, J., 2008, The effect of oil in refrigeration: Current research issues and critical review of thermodynamic aspects, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 31, No. 2, pp. 165-179.
2. Hu, H., Ding, G. and Wang, K., 2008, Heat transfer characteristics of R410A-oil mixture flow boiling inside a 7 mm straight microfin tube, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 31, No. 6, pp. 1081-1093.
3. Wei, W., Ding, G., Hu, H. and Wang, K., 2007, Influence of lubricant oil on heat transfer performance of refrigerant flow boiling inside small diameter tubes. Part I: Experimental study, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, Vol. 32, No. 1, pp. 67-76.
4. Wei, W., Ding, G., Hu, H. and Wang, K., 2007, Influence of lubricant oil on heat transfer performance of refrigerant flow boiling inside small diameter tubes. Part II: Correlations, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, Vol. 32, No. 1, pp. 77-84.
5. Chen, I. Y., Wu, Y. J. and Wang, C. C., 2005, Influence of oil on R410A two-phase frictional pressure drop in a small U-type wavy tube, *Int. Commun. Heat mass Transfer*, Vol. 32, No. 6, pp. 797-808.
6. Dang, C., Iino K., Fufuoka, K. and Hihara, E., 2007, Effect of lubricating oil on cooling heat transfer of supercritical carbon dioxide, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 30, No. 4, pp. 724-731.
7. Lottin, O., Cuillemet, P. and Lebreton, J.M., 2003, Effects of synthetic oil in a compression refrigeration system using R410A. Part I: modeling of the whole system and analysis of its response to an increase in the amount of circulating oil, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 26, No. 7, pp. 772-782.
8. Lottin, O., Cuillemet, P. and Lebreton, J.M., 2003, Effects of synthetic oil in a compression refrigeration system using R410A. Part I: quality of heat transfer and pressure losses within the heat exchangers, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 26, No. 7, pp. 783-794.
9. Yoshioka, S., Kim, H.Y. and KASAI, K., 2008, Effect of PAG oil circulation rate on the heat transfer performance of air-cooled heat exchanger in carbon dioxide heat pump system, *Proceedings, IEA 9th HeatPump Conference*, switzerland, s3. p10
10. ASHRAE Standard Committee, 1987, Standard methods for laboratory air flow and measurement, ASHRAE
11. ASHRAE Standard Committee, 1992, Standard methods for laboratory air flow and measurement, ANSI/ASHRAE Publications Scales, Atlanta, GA.
12. ARI Standard Committee, 1981, Standard for forced circulation air cooling and air heating coils, ARI Standard 410-81.
13. ASHRAE Standard Committee, 1996, Standard Methods for Measurement of Proportion of Lubricant of Liquid Refrigerant, ANSI/ASHRAE 41.4.
14. Fukuta, M., Yanagisawa, T., Shimasaki, M. and Ogi, Y., 2006, Real-time measurement of mixing ratio of refrigerant/refrigeration oil mixture, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 29, No. 7, pp. 1058-1065.