

7 mm 수평관 내 R-1234yf의 증발열전달에 관한 실험적 연구 Experimental study of evaporation heat transfer of R-1234yf in 7 mm horizontal smooth tube

손창효* · 이준혁** · 윤정인* · 설성훈* · 차승윤** · 김남욱****
Chang-Hyo Son*, Jun-Hyuk Lee**, Jeong-In Yoon*, Sung-Hoon Seo*
Seung-Yun Cha** and Nam-Wook Kim****

(Received 10 February 2021, Revised 9 April 2021, Accepted 12 April 2021)

Abstract : Refrigerant, which is a heat transfer medium of a refrigeration system, has been continuously developed from the early refrigeration system to the present. However, as refrigerants with high ODP and GWP are regulated, HFO-based refrigerants and natural refrigerants are attracted attention. In this study, the heat transfer coefficient of R-1234yf, which has low GWP and similar properties to R-134a, was experimentally analyzed according to the vapor quality, heat flux, mass flux, and saturation temperature in the evaporation heat transfer process. As a result, the heat transfer coefficient increased as the vapor quality increased. The heat transfer coefficient increased even with the increasing heat flux, mass flux, and saturation temperature. Experimental results in this paper are provided as data on the design of heat exchangers for R-1234yf.

Key Words : R-1234yf, Heat transfer coefficient, Evaporation heat transfer

**** 김남욱(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-9631-6111)
: 연구원, LG전자
E-mail : namwook2.kim@lge.com, Tel : 051-629-6183
*손창효(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-2143-0515) :
부교수, 부경대학교 냉동공조공학과
**이준혁(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-4575-8099) :
박사과정, 부경대학교 냉동공조공학과
*윤정인(ORCID:http://orcid.org/0000-0002-1099-3435) :
정교수, 부경대학교 냉동공조공학과
*설성훈(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-9724-9707) :
조교수, 부경대학교 냉동공조공학과
**차승윤(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5733-1957) :
대학원생, 부경대학교 냉동공조공학과

**** Nam-Wook Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-9631-6111)
: Researcher, LG electronics.
E-mail : namwook2.kim@lge.com, Tel : 051-629-6183
*Chang-Hyo Son(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-2143-0515)
: Professor, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.
**Joon-Hyuk Lee(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-4575-8099)
: Doctor course, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.
*Jung-In Yoon(ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1099-3435) :
Professor, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.
*Sung-Hoon Seo(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-9724-9707)
: Professor, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.
**Seung-Yun Cha(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5733-1957)
: Graduate student, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.

— 기 호 설 명 —

- q : Heat flux [kW/m²]
- T : Temperature [°C]
- h : Heat transfer coefficient [kW/m²K]
- x : vapor quality
- i : Enthalpy [kJ/kg]
- i_{lv} : Latent heat [kJ/kg]
- G : Mass flux [kg/m²s]

하첨자

- i : Inner
- w : Wall
- sat : Saturation
- l : Liquid

1. 서 론

냉동시스템의 열전달 매체인 냉매는 초기 냉동 시스템에서부터 현재에 이르기까지 지속적으로 개발되어 왔다.¹⁾ 특히 낮은 ODP(Ozone Depletion Potential)를 가진 HFC(Hydro Fluoro Carbons)계 냉매는 CFC(Chloro Fluoro Carbon)와 HCFC(Hydro Chloro Fluoro Carbon)계 냉매의 대체 냉매로써 냉동기와 자동차용 에어컨 등과 같이 다양한 냉동공조 분야에 적용되었다. 그러나 지구온난화가 심각한 환경문제로 떠오르면서 높은 GWP(Global Warming Potential)로 인하여 HFC계 냉매는 교토의정서(1997년)에서 온실가스로 규정했으며, 킬리 개정의정서로 인해 HFC계 냉매를 단계적으로 감축하는 것을 결정했다. 그 예로 우리나라의 경우 HFC계 냉매의 사용을 2024년부터 2045년까지 80% 감축해야 한다. 따라서 새로이 개발되는 대체냉매는 지구 환경을 파괴하지 않으면서 기존의 냉매와 열역학적 성질이 비슷해야 한다.²⁾ 이에 대한 대안으로 HFO(Hydro Fluoro Olefin)계 냉매와 자연냉매가 주목을 받게 되었다. 특히 HFO계 냉매 중 R-1234yf는 GWP가 4로 환경문제에 큰 영향을 주지 않고 HFC계 냉매인 R-134a와 물성치가

비슷하여 대체 냉매로 사용되고 있으며, 관련 연구가 활발히 진행되고 있다.

Saitoh 등³⁾은 R-1234yf 냉매를 재질이 스테인리스이고 2 mm 내경인 수평관에서 증발 열전달계수를 실험적으로 연구하였고, Oh 등⁴⁾은 1.5, 3.0 mm 내경의 스테인리스 재질인 수평관에서 R-1234yf 냉매의 2상 유동 증발열전달 과정의 열전달계수와 압력강하에 대해 연구하였다. Del Col 등⁵⁾은 1 mm 내경의 원형 마이크로 채널에서 국부 열전달계수를 측정하고 R-1234yf의 측정값을 R-134a와 비교하였으며, Lu 등⁶⁾은 3.9 mm 내경의 수평관에서 R-134a와 R-1234yf의 2상 대류 증발열전달계수에 대해 질량유속과 열유속의 영향을 연구했다. Kim 등⁷⁾은 1.5, 3.0 mm 내경인 수평관에서 R-1234yf의 증발열전달에 대한 실험을 진행하였으며, Diani 등⁸⁾은 미니 마이크로-핀 튜브 내부의 R-1234yf와 R-134a의 증발열전달에 대한 실험을 하였다. Anwar 등⁹⁾은 1.6 mm 내경의 수직관에서 R-1234yf 및 R-134a의 압력강하와 증발열전달 특성을 분석하였고, Yang 등¹⁰⁾은 4 mm 내경의 수평관에서 R-134a 및 R-1234yf의 증발열전달을 분석하였다.

종래 연구를 보면 R-1234yf의 열전달과 관련해서 다양한 연구가 진행되었지만, 대부분의 연구는 소 구경관에서 연구했음을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 7 mm 관경의 수평관 내 R-1234yf 증발열전달의 열전달계수를 분석하여 다소 큰 관경을 사용하는 열교환기의 설계자료로 제공하고자 한다.

2. 증발 열전달 실험

2.1 증발 열전달 실험 장치 및 방법

Fig. 1은 실험장치의 개략도이다. 본 논문의 실험장치는 R-1234yf의 증발열전달계수를 측정하기 위해 구성되었다. 실험장치는 마그네틱 기어펌프를 사용하였기에 냉동기유가 없어 냉매만의 유동 특성을 파악하였다. 구성기기로는 시험부, 플레이트 열교환기, 질량유량계, 예열기, 수액기와 수액기에 삽입된 열교환기로 구성되었다.

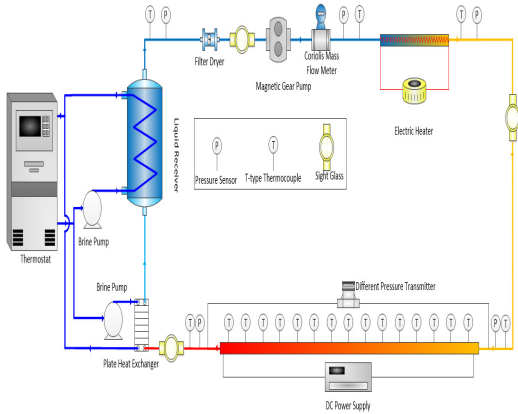


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental equipment

플레이트 열교환기와 수액기에 삽입된 열교환기에서 냉매는 과냉각 상태가 된다. 과냉각된 냉매는 기어펌프로 인해 토출되며, 토출된 냉매의 질량유량은 질량유량계에서 측정된다. 토출된 냉매는 예열기를 이용하여 시험부 입구의 설정 조건으로 건도를 맞춘 후 시험부에서 증발과정을 거쳐 플레이트 열교환기와 수액기로 되돌아 온다. 되돌아온 냉매는 다시 과냉각되며 이 과정을 반복한다. 이 순환과정에서 시험부에는 직접가열방식을 사용하였다. 그 이유는 열유속을 균일하게 가해 주어 실험의 정확도를 높이기 위해서이다. 또한, 질량유량계와 시험부의 전단에 약 50 cm와 3 m의 유동 안전 구간을 두었으며, 이는 측정되는 실험값의 오차를 줄여 실험의 신뢰성을 높이기 위해서이다.

시험부는 길게 설계하여 낮은 열유속에서도 고 건도의 자료를 얻을 수 있도록 하였다. 시험부는 소구간을 15 cm씩 20구간으로 구성하여, 총 3 m로 만들어졌으며, Fig. 2는 그 개략도를 나타낸다.

시험부는 DC 파워서플라이의 성능을 고려하여 SUS316재질을 사용하였으며, 이음매를 없애 전기 저항이 일정하고 열적 균일함을 유지하였다.

시험부의 외벽온도는 상, 하, 좌, 우에 각각 열전대를 부착하여 평균값을 사용하였으며, Fig. 3은 시험부의 단면도이다. 실험조건은 Table 1에 표시하였다.

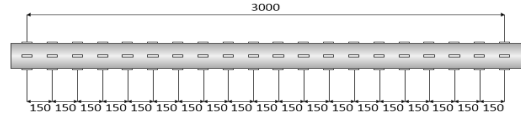


Fig. 2 Schematic diagram of test section

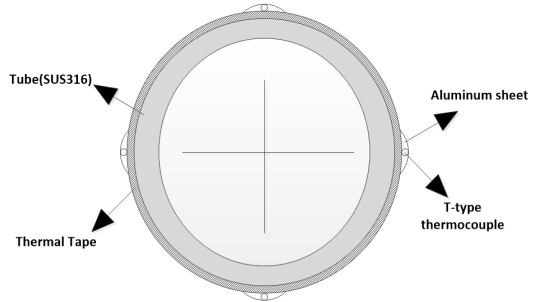


Fig. 3 Detail view of test section

Table 1 Experimental conditions

Parameter	Value
Refrigerant	R-1234yf
Quality	0 ~ 1
Saturation temperature	5°C, 10°C
Mass flux	100 ~ 400 kg/m ² s
Heat flux	3 ~ 24 kW/m ² s
Tube length	3,000 mm
Tube diameter	6.95 mm

2.2 데이터 정리

2.2.1 열전달

시험부에 가해지는 열량은 파워서플라이의 전압과 전류를 곱한 값이며, 열유속은 열량을 전 열면적으로 나누어 계산하였다. 관 외벽면의 온도는 열전대를 부착한 상, 하, 좌, 우 측정온도의 평균값을 사용한다. 1차원 열전도 방정식을 사용하여 간접적으로 관 내벽면의 온도를 구한 후 관내벽면의 온도와 냉매의 열유속, 포화온도를 식 (1)에 대입하여 열전달계수를 계산한다. 이때 포화온도는 ‘REFPROPI’¹⁾ 프로그램을 사용하여 시험부에서 측정된 압력과 차압을 이용해 구하였다.

$$h = \frac{q}{T_{wi} - T_{sat}} \quad (1)$$

건도는 식 (2)를 통해 계산하며 각 지점의 비엔탈피는 열유속에 측정 지점의 전열면적을 곱한 뒤 질량유속을 나누고 입구 엔탈피를 더하여 계산한다.

$$x = \frac{i - i_{L,sat}}{i_{lv}} \quad (2)$$

3. 실험 결과

3.1 열전달계수

3.1.1 질량유속의 영향

Fig. 4는 질량유속을 변화시킨 경우의 열전달계수의 변화를 나타낸 그래프로, 10°C의 포화온도에서 실험하였다. 열전달계수는 건도가 증가함에 따라 전반적으로 증가하였지만 고건도 영역에서는 급감하는 영역이 발생했다. 전반적으로는 건도의 증가로 기체의 비율이 증가하여 난류가 형성되며 환상류가 발달하여 열전달계수가 증가한 것으로 예상된다. 이후 고건도 영역에 들어서며 액막이 전부 증발하여 가열면의 온도가 상승해 열전달계수가 급감하는 현상이 발생한 것으로 판단된다.

열전달계수는 질량유속의 증가와 함께 증가하며, 이는 냉매의 유속이 빨라져 레이놀즈수가 높아져 빠르게 유동이 발달한 것으로 판단된다. 저건도의 영역에서는 핵비 등이 활발하기 때문에 질량유속의 영향을 적게 받는다. 그러나 고건도의 영역에서는 대류비 등이 활발하기 때문에 질량유속의 영향을 크게 받는 것을 볼 수 있다.

3.1.2 열유속의 영향

Fig. 5는 열유속을 변화시킨 경우의 열전달계수의 변화를 나타낸 그래프로, 포화온도 10°C의 조건에서 실험하였다. 열전달계수는 열유속의 증가와 함께 증가한다. 저건도의 영역에서는 핵비등이 활발하여 열유속의 영향이 크고 고건도의 대류비등이 활발한 영역에서는 작게 나타난다. 가해 주

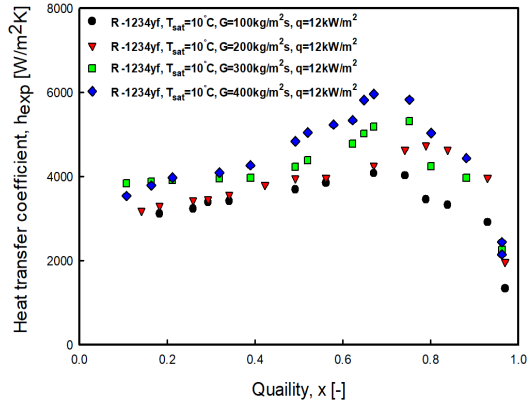


Fig. 4 R-1234yf evaporation heat transfer coefficient according to mass flux at saturation temperature 10°C

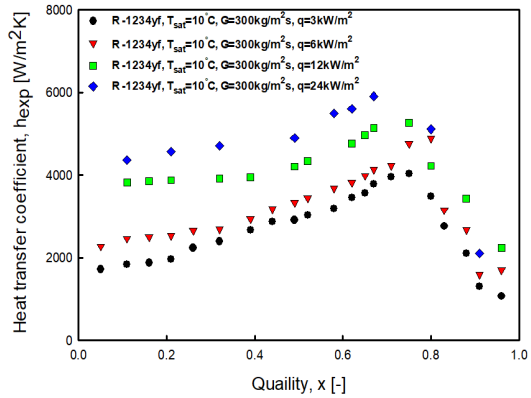


Fig. 5 R-1234yf evaporation heat transfer coefficient according to heat flux at saturation temperature 10°C

는 열량을 높이면 열유속이 높아지고 가열면의 과열도가 상승하여 기포의 생성과 성장이 활발해지는 것이 원인으로 판단된다. 건도가 상승하면 유동양식이 기포류와 슬러그류를 지나 환상류의 형태가 된다. 이때 얇은 액막을 통해 가열면에서 공급된 열유속을 액체와 기체의 계면으로 전도와 대류로 인해 전달된다. 그러므로 액체와 기체의 계면은 지속적으로 액막이 증발하고 가열면의 과열도는 기포의 생성조건을 만족하지 못한다. 핵비등을 유지하기 위해서는 액막이 두껍거나 액상 냉매의 열전도도가 낮아야 한다. 그래프를 보면

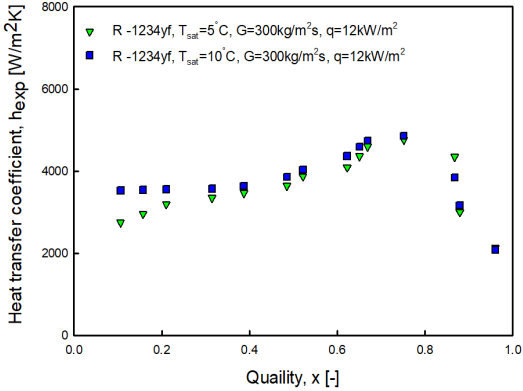


Fig. 6 R-1234yf evaporation heat transfer coefficient according to saturation temperature

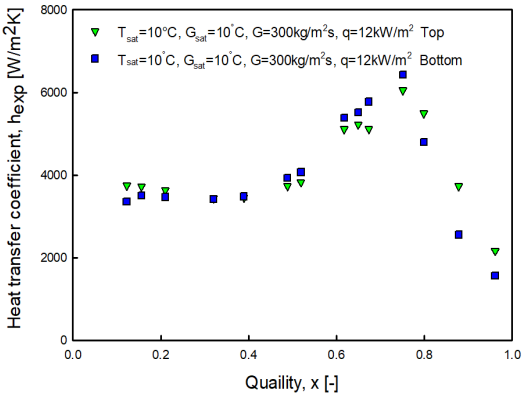


Fig. 7 Heat transfer coefficient of top and bottom side

R-1234yf는 고건도 영역에서 대류비등이 핵비등보다 활발하며 유동양식이 환상류의 형태가 된다는 결과를 알 수 있다.

3.1.3 포화온도의 영향

Fig. 6을 보면, 열전달계수에 대한 포화온도의 영향은 대류비등이 활발한 고건도 영역보다 핵비등이 활발한 저건도 영역에서의 영향이 크다. R-1234yf는 포화온도의 상승에 따라 표면장력이 감소하며 낮아진 표면장력으로 인해 기포의 발생과 성장에 요구되는 과열도가 감소한다. 이러한 이유로 같은 조건에서 포화온도의 상승은 핵비등 영역에서 열전달계수의 증가라는 결과를 보인다.

3.1.4 상부와 하부의 열전달계수 차이

Fig. 7은 시험부의 상부와 하부의 열전달계수를 나타낸 것으로, 하부의 열전달계수는 건도 0.2 이하와 0.8 이상인 범위에서 높으나 상부의 열전달계수는 0.2~0.8 사이의 범위에서 높다. 건도가 0.2 이하인 범위에서는 핵비등이 활발하여 비교적 밀도가 작은 기포가 떠오르며 하부의 핵비등이 상부보다 활발하여 열전달계수는 하부가 높다는 것으로 판단된다. 건도 0.2~0.8의 범위에서 환상류가 형성된 이후는 관 하부의 액막이 중력으로 인해 상부에 비해 두꺼워진다. 이때 액막이 두꺼워지면서 열저항이 커지게 되고 비교적 얇은 액막을 가진 상부가 높은 열전달계수로 측정된다고 판단된다. 건도 0.8 이상의 범위에서 상부의 액막이 얇은 만큼 Dry-out 현상 또한 빠르게 일어나 열전달 계수가 급격히 감소하는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문은 7 mm 구경 수평관 내 R-1234yf의 증발열전달에서 열전달계수에 관한 실험을 진행하였고 그 실험에 대한 결론은 아래와 같다.

건도의 상승으로 인해 유동양식이 환상류 형태가 되었고 대류비등으로 인해 열전달계수가 높아지나 고건도 영역에 진입하면 액막의 증발로 인해 가열면의 온도가 급격히 상승하게 되고 열전달기구가 기체단상열전달로 변화하여 열전달계수가 감소한다. 또한 질량유속과 열유속, 포화온도가 증가하면 열전달계수가 증가했다. 이 질량유속의 증가로 냉매의 유속이 빨라지고 난류의 형성이 일어나 유동양식이 환상류로 바뀌었으며, 시험부 벽면의 과열도가 열유속의 증가로 인해 증가하였고 포화온도가 상승하며 표면장력이 낮아져 핵비등이 활발하게 일어났기에 열전달계수가 상승하였다고 판단된다.

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이다.

(NO. 2019R1F1A1059974). 본 연구는 ‘김남욱’의 ‘Low-GWP 냉매 R-1234yf의 7 mm 수평평활관 내 증발열전달 및 압력강하에 관한 실험적 연구’의 석사 논문의 일부입니다.

Author contributions

C. H. Son; Supervision. J. H. Lee; Methodology. J. I. Yoon; Conceptualization. S. H. Seol; Investigation. S. Y. Cha; Writing - original draft. N. W. Kim; Project administration.

References

1. B. H. Shon and T. Y. Kang, 2016, "Condensation heat transfer and pressure drop characteristics of low GWP refrigerants in heat exchangers", Proceedings of the SAREK 2016 Summer Annual Conference, pp. 617-620.
2. H. K. Ku, 2010, "Study on Heat Transfer Characteristics of Evaporator with Horizontal Small Diameter Tubes using Natural Refrigerant Propane", Journal of the Korean Society For Power System Engineering, Vol. 14, No. 4, pp. 11-16.
3. S. Saitoh, C. Dang, Y. Nakamura and E. Hihara, 2011, "Boiling heat transfer of HFO-1234yf flowing in a smooth small-diameter horizontal tube", International Journal of Refrigeration, Vol. 34, No. 8, pp. 1846-1853. (<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2011.05.018>)
4. K. W. Kim, N. B. Chien, K. I. Choi and J. T. Oh. 2012, "Measurement and correlation of boiling heat transfer coefficient of R-1234yf in horizontal small tubes", Proceedings of the KSME Conference, Vol. 2012, No. 11, pp. 742-746.
5. D. Del Col, S. Bortolin, D. Torresin and A. Cavallini. 2013, "Flow boiling of R1234yf in a 1 mm diameter channel", International journal of refrigeration, Vol. 36, No. 2. pp. 353-362. (<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2012.10.026>)
6. M. C. Lu, J. R. Tong and C. C. Wang. 2013, "Investigation of the two-phase convective boiling of HFO-1234yf in a 3.9 mm diameter tube", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 65, pp. 545-551.
7. K. W. Kim, N. B. Chien, K. I. Choi and J. T. Oh. 2014, "Measurement and correlation of boiling heat transfer coefficient of R-1234yf in horizontal small tubes", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 28, No. 10, pp. 4301-4308.
8. A. Diani, S. Mancin and L. Rossetto. 2015, "Flow boiling heat transfer of R1234yf inside a 3.4 mm ID microfin tube", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 66, pp. 127-136. (<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.03.019>)
9. Z. Anwar, B. Palm and R. Khodabandeh. 2015, "Flow boiling heat transfer, pressure drop and dryout characteristics of R1234yf: Experimental results and predictions", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 66, pp. 137-149. (<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.03.021>)
10. C. Y. Yang, H. Nalbandian and F. C. Lin. 2018, "Flow boiling heat transfer and pressure drop of refrigerants HFO-1234yf and HFC-134a in small circular tube", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 121, pp. 726-735. (<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.161>)