

플레인 핀을 사용한 플레이트 핀 열교환기 내 HFO-1234yf의 흐름 비등 열전달 특성

Flow Boiling Heat Transfer of HFO-1234yf in a Plate-fin Heat Exchanger with Plain Fins

손창효* · 윤정인* · 설성훈* · 강동익***
Chang-Hyo Son*, Jeong-In Yoon*, Sung-Hoon Seol*
and Dong-Ik Kang***

(Received 19 July 2021, Revision received 6 August 2021, Accepted 9 August 2021)

Abstract : Interest in hydrofluoroolefins (HFOs) based refrigerants, which have significantly lower global warming potential compared to currently used hydrofluorocarbons (HFCs) refrigerants, is increasing. However, heat transfer experiments of HFO refrigerants are limited in double-tube heat exchangers and square channels. Therefore, in this study, the flow boiling heat transfer characteristics and pressure drop of HFO-1234yf in a plate-fin heat exchanger were analyzed. The main results are as follows. The flow boiling heat transfer coefficient increases as the vapor quality increases; however, at certain point of high vapor quality, it decreases rapidly. As the mass flux, heat flux and saturation temperature increase, the flow boiling heat transfer coefficient increases.

Key Words : HFO-1234yf, Heat transfer coefficient, Flow Boiling heat transfer, Plate-fin heat exchanger

— 기 호 설 명 —

G : Mass flux [$\text{kg/m}^2\text{s}$]

h : Heat transfer coefficient [$\text{kW/m}^2\text{K}$]

k : Thermal conductivity

Nu : Nusselt number [-]

Pr : Prantl Number [-]

Q : Heat load [kW]

q : Heat flux [kW/m^2]

Re : Reynolds number [-]

*** 강동익(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-9777-9377>) :
총무, 유일콜드

E-mail : roki39@naver.com, Tel : 051-629-6173

*손창효(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-2143-0515>) :
부교수, 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

*** Dong-Ik Kang(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-9777-9377>)
: Assistant Manager, YOUIL COLD.

E-mail : roki39@naver.com, Tel : 051-629-6173

*Chang-Hyo Son(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-2143-0515>)
: Associate Professor, 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 Seol(ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-9724-9707>)
: Assistant Professor, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.

- T : Temperature [°C]
- t : Fin thickness
- U : Overall heat transfer coefficient [kW/m²K]

하첨자

- c : Cold
- h : Hot
- sat : Saturation
- lmtcd : Log mean temperature difference

1. 서 론

최근 세계적으로 환경 보호에 대한 관심이 높아지고 있는 가운데, EU는 지구 온난화 영향을 고려하여 2017년 1월 1일 이후 생산되는 모든 차량에 대하여 지구 온난화 지수(GWP, Global Warming Potential)가 150 이상인 냉매의 사용을 금지하였다.¹⁾ 따라서 그동안 일반적으로 사용되어 왔던 GWP 1430의 HFC-134a를 대체하기 위해 이와 열역학적 특성이 유사하고 GWP가 4로 현저히 낮은 냉매 HFO-1234yf가 개발되었다.²⁾ 이러한 상황에서 HFC-134a 대신 HFO-1234yf를 다양한 열역학 사이클에서 활용하려는 시도가 늘어나고 있다.³⁾

일반적인 열역학 사이클에서는 냉매의 증발과 응축 과정 중 열교환기를 통한 열 교환이 필수적인데, 이때 냉매의 열전달 특성을 파악하여 열역학 사이클을 설계하는 것이 환경 보호 측면에서 중요하다. 이에 따라 HFO-1234yf 냉매의 열전달 특성을 파악하기 위한 다양한 연구가 진행되었다.

Yang 등⁴⁾은 내경 4 mm의 수평관에서 HFO-1234yf와 HFC-134a의 흐름 비등 열전달 및 압력 강하에 대해 분석하였다. Saito 등⁵⁾은 내경 2 mm 수평관에서 HFO-1234yf의 비등열전달을 실험적으로 분석하였다. Oh 등⁶⁾은 내경 1.5 mm, 3.0 mm 수평관 내에서 HFO-1234yf의 비등 열전달을 분석하고 HFC-134a와 비교하였다. Del Col 등⁷⁾은 직경 1 mm 채널에서 HFO-1234yf에 대해 연구하고, 이를 HFC-134a와 비교하였다. Lu 등⁸⁾은 직경 3.9 mm 수평관에서 HFO-1234yf의 2상 대류 비등에

대해 조사하고, HFC-134a와 비교하였다. Diani 등⁹⁾은 내경 3.4 mm 마이크로 핀 튜브 내에서 HFO-1234yf의 흐름 비등 열전달을 연구하였다. Mortada 등¹⁰⁾은 수력직경이 1.1 mm인 6개의 직사각형 채널에서 HFC-134a와 HFO-1234yf의 비등 열전달과 압력강하를 저 질량 유속 상태에서 조사하였다.

현재까지의 종래연구는 HFO-1234yf에 대한 증발 열전달 특성에 관해 수평관에서 주로 이루어져 왔고, 열교환기에 대해서는 사각 채널 등에서만 제한적으로 이루어졌음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 고효율 열교환기인 플레이트 핀 열교환기에서 친환경 냉매 HFO-1234yf의 비등 열전달 특성을 분석하여 효율적인 열교환기 설계자료를 제공하고자 한다.

2. 증발 열전달 실험

2.1 증발 열전달 실험 장치 및 방법

Fig. 1는 플레이트 핀 열교환기 내 HFO-1234yf의 비등 열전달 성능을 측정하기 위한 실험장치의 개략도이다. 본 장치의 실험 냉매는 마그네틱 기어펌프를 통해 유로를 순환하고, 내장되어 있는 인버터를 통하여 유량이 조절된다. 또한 기어펌프에서 토출된 냉매는 코리올리 유량계를 통과하여 유량이 측정되도록 하였고, 과냉상태의 냉매를 실험 조건의 포화액 혹은 2상 구간으로 만들기 위해 10 kW급 전기히터를 설치하여 냉매를 가열할 수

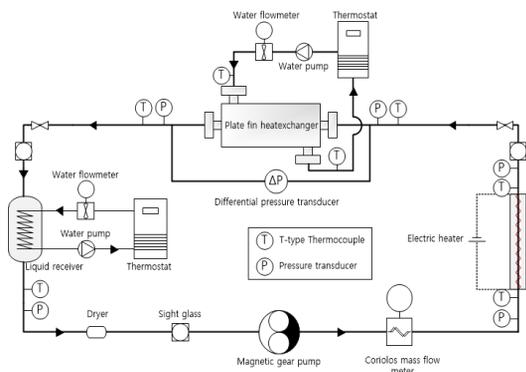


Fig. 1 Schematic diagram of experiment equipment

있도록 하였다. 이때 전기히터의 용량제어는 실리 콘 제어 정류기를 사용하였다. 히터를 통과한 냉매는 주 시험 부인 플레이트 핀 열교환기를 통과하며 고온 브라인(물)과 열교환 하여 가열 및 증발하여, 후단에 설치된 코일 튜브 열교환기가 내장된 수액기에서 과냉상태로 냉각되어 저장되도록 하였다. 전체 실험장치는 외부 열 침입으로 인한 오차를 방지하기 위해 발포고무소재의 단열재로 단열하였다.

Fig. 2과 Table 1은 주 시험부인 플레이트 핀 열교환기의 사양을 나타낸다. 열교환기 내부 핀의 사양은 Table 2에 나타내었다. 열교환기의 유효길이는 250 mm, 유효 폭 140 mm이며, 열교환기 내부 핀은 높이 6.4 mm, 두께 0.5 mm의 플레인 핀이 사용되었다. 본 논문에서는 HFO-1234yf의 비등 열전달 특성을 분석하기 위하여 열 유속, 질량 유속, 포화온도를 변화시키며 냉매의 열전달계수를 측정하였고, 실험 조건은 Table 3에 나타내었다.

Table 1 Specification of Plate-fin heat exchanger

Parameter	Value	Unit
Height	63 mm	mm
Length	364 mm	mm
Width	144 mm	mm
Effective Length	250 mm	mm
Effective width	140 mm	mm
Stacking pattern	A-B-A-B-A-B	-

Table 2 Specification of fins

Fins diagram	Parameter	Value	unit
	Fin type	Plain fin	-
	Fin height	6.4	mm
	Fin thickness	0.5	mm
	Fin frequency	590	fin/meter

2.2 데이터 정리

실험데이터는 선행적으로 연구한 물-물 단상 열전달 실험을 통해 얻은 물 측 열전달계수 상관식을 토대로 물-냉매 흐름 비등 열전달 실험을 진행하여 데이터를 취득하였다. 이때, HFO-1234yf의 물성치 계산은 NIST(National Institute of Standards and Technology)의 프로그램 ‘REFPROP21(Ver. 8.0)’을 사용하였다. 열전달 계산에 있어서 평균 증발온도는 대수 평균 온도 차이를 사용하여 결정하였다.

총괄열전달계수는 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$Q = UA\Delta T_{lmtd} \quad (1)$$

이때, 총괄 열전달계수 U는 고온유체와 저온유체 측의 대류 열저항과 전열관의 전도 열저항을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_h} + \left(\frac{t}{k}\right) + \frac{1}{h_c} \quad (2)$$

고온유체의 대류 열전달계수 h_h 는 선행연구에서 Modified wilson plot method를 통해 구한 물 측 열전달계수 상관식을 사용하여 계산할 수 있다.

$$Nu = 6.94 \times 10^{-5} Re^{0.7281} Pr^{0.3} \quad (3)$$

Table 3 Experimental conditions of boiling heat transfer experiment

Parameter	Range	Unit
Saturation temperature	5, 10, 15	℃
Heat flux	1.8, 5.8	kW/m ²
Mass flux	15 ~ 45	kg/m ² s
Quality (Inlet - Outlet)	0 ~ 1	-

3. 실험 결과

3.1 흐름 비등 열전달계수

3.1.1 질량유속의 영향

Fig. 3은 포화온도 15°C에서 각각 질량 유속 15 kg/m²s, 30 kg/m²s, 45 kg/m²s에서의 비등 열전달계수를 나타낸 그래프이다. 실험 결과, 질량 유속이 증가할수록 비등 열전달계수가 더 높아지는 것을 확인할 수 있다. 질량 유속이 증가하면 관성력이 증가하여 레이놀즈수가 커지게 되고, 이는 곧 난류 유동의 촉진을 의미하여 환상류로의 천이를 빠르게 하기 때문에 열전달계수가 높아지는 것이다.

또한 질량 유속 변화의 영향은 고건도 영역에서 더 크게 나타났다. 이는 고질량 유속 및 고건도 조건에서는 냉매의 유속이 빨라지게 되어 난류의 형성을 촉진시키고, 핵 비등이 지배적인 저건도 영역과 달리 고건도 영역은 대류 비등이 지배적이기 때문에 그 영향을 더 많이 받은 것으로 판단된다.

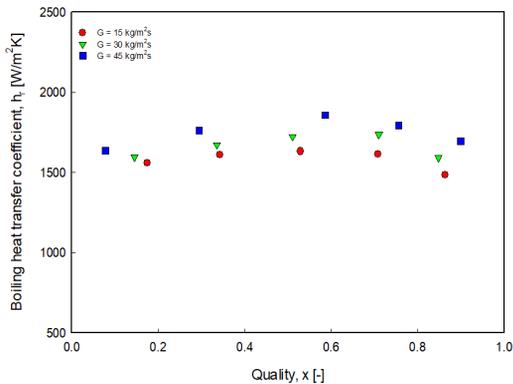


Fig. 3 HFO-1234yf heat transfer coefficient according to mass flux at saturation temperature 15°C and Heat flux 1.8 kW/m²

3.1.2 열유속의 영향

Fig. 4는 포화온도 15°C에서 각각 열 유속을 1.8 kW/m², 5.8 kW/m²로 주었을 때 비등 열전달계수를 나타낸 그래프이다. 모든 포화온도 조건에서 열 유속 5.8 kW/m²에서의 비등 열전달계수가 1.8 kW/m²에서의 비등 열전달계수보다 높은 것으로

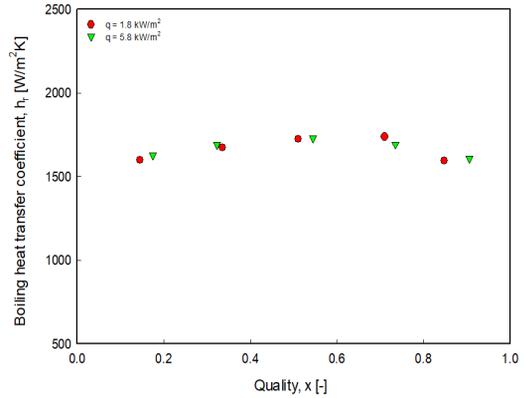


Fig. 4 HFO-1234yf heat transfer coefficient according to heat flux at saturation temperature 15°C and Mass flux 30 kg/m²s

나타났다. 이는 열 유속을 크게 하는 것이 단위 면적당 유체와의 열 교환량을 크게 하는 것을 의미하기 때문이다. 또한 서로 다른 열 유속 조건에서 비등 열전달 계수의 차이가 저건도 영역에서 미세하게 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 열 유속이 핵비등에 많은 영향을 주기 때문이다. 열 유속이 높아지면 가열 면의 과열도가 높아져 핵 성장이 활발해지는데, 이러한 핵비등이 지배적인 저건도 영역에서 고건도 영역에 비해 열 유속의 영향을 많이 받아 건도 간에 열 유속 영향의 차이가 생기는 것으로 판단된다.

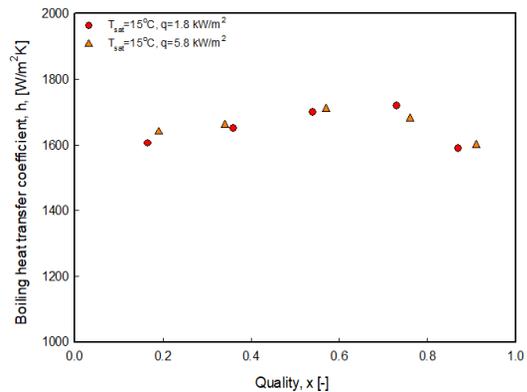


Fig. 5 HFO-1234yf heat transfer coefficient according to saturation temperature at Mass flux 30 kg/m²s and Heat flux 1.8, 5.8 kW/m²

3.1.3 포화온도의 영향

Fig. 5는 열 유속이 1.8 kW/m², 5.8 kW/m²일 때 포화온도 15℃에서의 비등 열전달계수를 나타낸 그래프이다. 냉매의 포화온도가 높을수록 비등 열매우 크게 감소하게 되는데, 이로 인해 냉매의 유속이 빨라지게 되어 비등 열전달계수가 증가하는 요인이 된다. 그러나 건도 별 포화온도의 영향 차이는 두드러지게 나타나지 않았다.

3.1.4 평균건도의 영향

전체적인 실험 결과, 평균 건도가 증가할수록 비등 열전달계수는 상승하는 경향을 보이거나, 건도 0.7~0.8 구간에서부터 열전달계수가 감소하는 것을 알 수 있었다. 저건도 영역에서 고건도 영역으로 갈수록 열전달계수가 증가하는 것은 건도가 증가할수록 기체 비율이 높아지고, 이로 인해 기체의 속도가 빨라져 난류가 형성되어 대류 현상이 촉진되고 환상류가 발달하기 때문으로 판단된다. 그러나 건도가 0.7~0.8 이상이 되었을 때에는 액막이 파괴되고, 가열 면의 온도가 높아져 열전달계수가 감소하는 Dry out 현상이 일어나는 것으로 판단된다.

비등이 활발하게 일어나는 것이 원인으로 판단된다.

포화온도가 높아질수록 비등 열전달계수가 증가한다. 이는 HFO-1234yf의 물성치인 표면장력과 밀도에 의해 포화온도가 높아질수록 열전달계수가 상승하는 것으로 보인다.

건도가 증가할수록 비등 열전달계수는 증가하지만, 일정 이상의 고건도 영역에서부터는 감소하기 시작한다. 이는 건도가 높아질수록 난류가 촉진되고 유동이 환상류로 천이되어 열전달계수가 증가하고, 그 후 액막이 증발하기 시작하면서 Dry out 현상으로 인해 열전달계수가 감소하는 것으로 판단된다.

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이다. (NO. 2019R1F1A1059974). 또한 본 연구는 ‘강동익’의 플레인 핀을 사용한 플레이트 핀 열교환기 내 HFO-1234yf의 비등 열전달 및 압력강하’ 석사 학위 논문의 일부이다.

4. 결 론

본 논문에서는 플레인 핀을 사용한 플레이트 핀 열교환기에서 HFO-1234yf의 흐름 비등 열전달 및 압력강하 특성에 관한 실험을 수행하였다. 이를 통해 도출한 결론은 다음과 같다.

질량 유속이 증가할수록 비등 열전달계수가 높아진다. 질량 유속이 증가하면 난류 유동의 촉진으로 인해 환상류로의 천이가 빨라지기 때문이다. 또한 고건도 영역에서는 대류 비등이 지배적이기 때문에 저건도 영역에 비해 질량 유속의 영향을 더 많이 받는 것으로 판단된다.

열 유속이 증가할수록 비등 열전달계수가 증가한다. 열 유속이 크다는 것은 단위면적당 열교환량이 커지는 것이기 때문에 열전달계수와 직접적인 연관이 있다. 또한 열 유속의 영향은 저건도 영역에서 더욱 두드러졌는데, 열 유속에 의해 핵

Author contributions

C. H. Son; Project administration. J. I. Yoon; Data curation. S. H. Seol; Methodology. D. I. Kang; Validation.

References

1. Directive 2006/40/EC of the European Parliament and of the Council of 17 May 2006 relating to emissions from air-conditioning systems in motor vehicles and amending council directive 70/156/EEC Official Journal of the European Union, L161, 2006, pp. 12-18.
2. J. S. Brown, 2009, "HFOs new, low global warming potential refrigerants", ASHRAE Journal, Vol. 51, pp. 22-29.
3. C. M. Invernizzi, P. Iora, M. Preßinger and G.

- Manzolini, 2016, "HFOs as substitute for R-134a as working fluids in ORC power plants: A thermodynamic assessment and thermal stability analysis", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 103, pp. 790-797.
(DOI:10.1016/j.applthermaleng.2016.04.101)
4. 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.
(DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.161)
 5. 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.
(DOI:10.1016/j.ijrefrig.2011.05.018)
 6. J. T. Oh, K. I. Choi, C. B. Nguyen and K. W. Kim, 2012, "Boiling heat transfer of R-1234yf in horizontal circular small tubes", *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*.
 7. 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.
(DOI:10.1016/j.ijrefrig.2012.10.026)
 8. 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.
(DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.06.004)
 9. 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.
(DOI:10.1016/j.expthermflusci.2015.03.019)
 10. S. Mortada, A. Zoughaib, C. Arzano-Daurelle and D. Clodic, 2012, "Boiling heat transfer and pressure drop of R-134a and R-1234yf in minichannels for low mass fluxes", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 35, pp. 962-973.
(DOI:10.1016/j.ijrefrig.2012.03.004)