

# R-1234yf의 관경 변화에 따른 응축 열전달 특성

설성훈<sup>1</sup> · 윤정인<sup>1</sup> · 이준혁<sup>2</sup> · 차승윤<sup>3</sup> · 하수정<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>부경대학교 냉동공조공학과, 교수

<sup>2</sup>부경대학교 냉동공조공학과, 박사

<sup>3</sup>부경대학교 냉동공조공학과, 석사과정

<sup>4</sup>한국폴리텍대학교 충주캠퍼스 에너지설비학과, 교수

## Condensation Heat Transfer Characteristics of R-1234yf with the Variation of Tube Diameter

Seol Sung-Hoon<sup>1</sup> · Yoon Jung-In<sup>1</sup> · Lee Joon-Hyuk<sup>2</sup> · Cha Seung-Yun<sup>3</sup> · Ha Su-Jeong<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Professor, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University

<sup>2</sup>Professor, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University

<sup>3</sup>MS Candidate, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University

<sup>4</sup>Professor, Department of Energy Facility, Korea Polytechnic University Chungju Campus

\*Corresponding author: h0452@kopo.ac.kr

### Abstract

In this study, the condensation heat transfer characteristics of the R-1234yf refrigerant were analyzed according to the variation in tube diameter, which were then considered as condenser design data. The inner diameter of the experimental tube was varied from 3.7 mm to 5.3 mm. Subsequently, the heat transfer coefficient of R-1234yf was analyzed according to the changes in vapor quality, mass flux, saturation temperature, and pipe diameter. Slug flow was observed at a low mass flux, and annular flow was observed at a high mass flux. Furthermore, it was observed that the heat transfer coefficient's value increased with increase in the vapor quality and mass flux, whereas it decreased with increase in the tube diameter and saturation temperature. By comparing the heat transfer coefficients of the refrigerants R-134a and R-1234yf, it was found that the heat transfer coefficient of R-134a is higher. Furthermore, four correlations were conducted, and it was found that the correlation of Dobson and Chato and the correlation of Bashar can predict the experimental condensation heat transfer coefficient within an error range of  $\pm 10\%$ .

**Keywords:** 응축 열전달계수(Condensation heat transfer coefficient), 유동양식(Flow pattern), 관경 변화(Variation of tube diameter), R-1234yf

### 기호설명

$c_p$  : Specific heat at constant pressure (kJ/kg·K)

$d$  : Diameter (m)

$dz$  : Length of test section (m)



Journal of the Korean Solar Energy Society  
Vol.41, No.4, pp.161-171, August 2021  
<https://doi.org/10.7836/kjes.2021.41.4.161>

pISSN: 1598-6411

eISSN: 2508-3562

Received: 22 July 2021

Accepted: 15 August 2021

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

- G : Mass flux ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ )
- h : Heat transfer coefficient ( $\text{kW}/\text{m}^2\text{K}$ )
- i : Enthalpy ( $\text{kJ}/\text{kg}$ )
- m : Mass flow rate ( $\text{kg}/\text{h}$ )
- Q : Heat capacity ( $\text{kW}$ )
- q : Heat flux ( $\text{kW}/\text{m}^2$ )
- T : Temperature (K)

## 하첨자

- c : Condenser, Condensation
- cw : Cooling water
- i : Inner
- in : Inlet
- out : Outlet
- w : Wall

## 1. 서론

1987년 오존층 파괴를 일으키는 CFC들을 규제하기 위한 몬트리올 의정서가 세계 주요 국가들에 의해 조인되었다<sup>1)</sup>. 그 결과 차량용 및 가정용 냉동설비에 쓰이던 R-12를 대체할 수 있는 R-134a가 등장하게 되었는데 이 냉매는 증기압 및 성능 면에서 기존 R-12와 비슷해 시스템 최적화를 거쳐 큰 문제 없이 현재 신규 자동차 공조기와 가정용 냉장고 등에 적용되고 있다<sup>2)</sup>. 그러나 R-134a는 오존층 파괴 지수는 0이지만 지구온난화 지수가 1430으로 매우 높아 환경적 문제를 가지고 있으며, 이에 현재 교토 의정서에 의해 지구온난화 규제 물질으로 규정되어 사용이 제한되고 있다<sup>3)</sup>. 이런 상황 속에서 미국의 냉매 제조업체인 하니웰사(Honeywell)와 듀폰사(Dupont)는 R-134a를 대체할 수 있는 냉매로 R-1234yf를 개발하였으며, R-1234yf는 오존층 파괴 지수가 0이고 지구온난화 지수는 4로 R-134a와 비교해 매우 낮다<sup>4)</sup>. 따라서 R-1234yf는 R-134a의 대체냉매로써 다양한 연구가 진행되었다. Table 1은 CFC계 냉매 R-134a와 혼합냉매 R-410A, 자연냉매 R-717, R-290, R-744, HFO계 냉매 R-1234yf의 특성을 비교하였다.

Del Col et al.<sup>5)</sup>은 질량 유속이  $200 \sim 1000 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}$ , 포화온도  $40^\circ\text{C}$ , 관경이  $0.96 \text{ mm}$ 인 원형 미니채널 내부에서 R-1234yf와 R-134a의 응축 열전달계수를 실험적으로 연구했다. Wang et al.<sup>6)</sup>은 질량 유속이  $100 \sim 400 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}$ 이며,  $40^\circ\text{C}$ ,  $45^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$ 의 포화온도 조건에서 내경이  $4 \text{ mm}$ 인 수평관내 R-1234yf의 응축 열전달 계수

를 R-134a와 R-32의 결과와 비교하였다. Illan-Gomez et al.<sup>7)</sup>은 내경 1.16 mm의 미니채널 내에서 질량 유속 350 ~ 940 kg/m<sup>2</sup>s, 포화온도 30 ~ 55°C의 R-1234yf와 R-134a의 응축 열전달에 대해 실험하였다. Longo et al.<sup>8)</sup>은 R-134a, R-152a, R-1234yf 와 R-1234ze(E)를 4 mm 수평관 내에서 응축 열전달에 대하여 비교하였으며, Bashar et al.<sup>9)</sup>은 2.5 mm의 동관 내 R-1234yf의 응축 열전달을 실험하였다. 지금까지의 종래연구를 분석한 결과, 환경 변화에 대한 R-1234yf 응축 열전달 특성의 실험적 연구가 부족한 실정이고, 이론적인 응축 열전달 특성이 명확하게 규명되지 않았다.

따라서 본 논문은 R-134a를 대체할 수 있는 R-1234yf를 종래연구에서 규명되지 않은 다양한 내경 3.7, 5.3 mm인 평활관 내에서 응축 열전달 특성에 대해 실험적으로 연구하여 R-1234yf 용 응축기 설계에 대한 기초자료로 제공하고자 한다.

**Table 1** Characteristic of refrigeration

Refrigerants	R-134a	R-410A	R-717	R-290	R-744	R-1234yf
ODP	0	0	0	0	0	0
GWP	1,00	1,730	0	3	1	4
Chemical formula	CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub> /CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	NH <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	CO <sub>2</sub>	CF <sub>3</sub>
Natural refrigerant	No	No	Yes	Yes	Yes	No
Flammable or explosive	No	No	Yes	Yes	No	Yes
Toxic/irritation decomposition products	Yes	-	No	No	No	No

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

Fig. 1은 응축 열전달의 실험 장치로 마그네틱 기어펌프, 예열기, 시험부, 수액기 등으로 구성된 장치도이다. 장치도는 냉매 순환 경로와 열원수 순환 경로로 구분된다. Fig. 2는 시험부의 상세도를 나타낸 것이다. 냉매의 순환 경로는 수액기에서 나온 냉매 액이 마그네틱 기어 펌프를 통해 질량 유량계를 통과하며, 냉매의 유량을 측정한다. 예열기에서 냉매 액은 가변 전압조정기로 인해 냉매 증기로 증발하며, 이때 일정 유량으로 조절하기 위해 유량 조절밸브와 바이패스를 사용한다. 냉매 증기는 시험부로 들어가서 열원수와 열교환하여 응축되며, 응축된 냉매 액은 수액기를 거쳐서 재순환한다. 열원수는 열원수 순환 펌프를 통해 순환하며, 냉동기 칠러로 온도를 일정하게 조절한다. 열원수의 유량은 질량 유량계를 통해 측정한 후 일정유량을 조절하며, 시험부의 외관과 내관 사이의 공간에서 냉매와 대향류로 흐른다. 실험은 Table 2를 바탕으로 진행하였다.

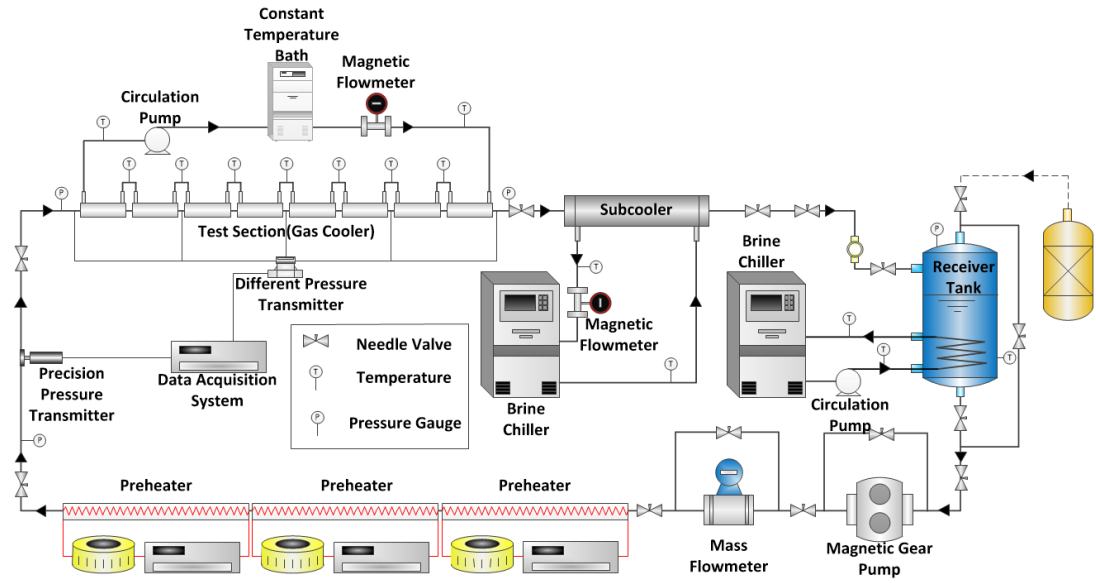


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

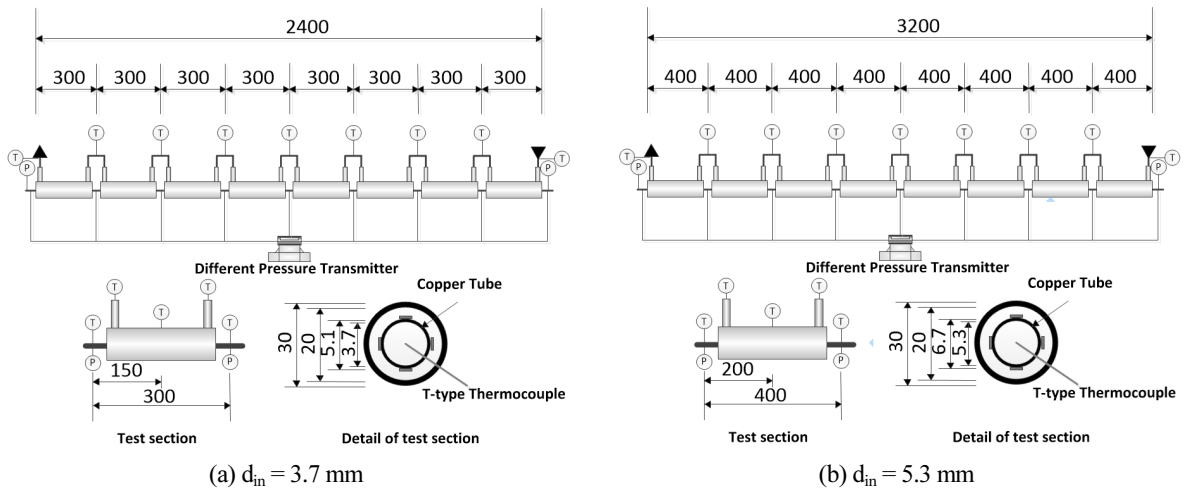


Fig. 2 Detail view of the test section

Table 2 Experimental condition

Refrigerant	R-1234yf		Unit
Test section	Horizontal smoothed tube		-
Inner Diameter of Test section (Outer Diameter of Test section)	3.7 (5.1)	5.3 (6.7)	mm
Max flux of refrigerant	100, 200, 300, 400		kg/m <sup>2</sup> s
Saturation temperature of condenser	40, 45, 50		°C
Temperature of cooling water	15		°C

## 2.2 데이터 정리

시험부에서 관 외벽면의 냉각수가 잃은 열량( $Q_{cs}$ )과 관내를 흐르는 냉매가 얻은 열량( $Q_c$ )을 알아야 하며, 그 수식들은 다음과 같다.

$$Q_{cw} = m_{cw} \cdot c_{p,cw} \int_{T_{cus,in}}^{T_{cus,out}} dt \quad (1)$$

$$Q_c = m_c \cdot (i_{c,in} - i_{c,out}) \quad (2)$$

시험부에서의 열유속( $q_c$ )은 식(3)으로 부터 계산하였다.

$$q_c = \frac{Q}{\pi \cdot d_i \cdot dz} \quad (3)$$

$Q$ 는 식(1), (2)로 계산한 시험부에서의 열량이며, 대류 열전달 계수는 다음 식으로부터 계산할 수 있다.

$$h_c = \frac{q_c}{T_c - T_{c,w.in}} \quad (4)$$

관 내벽온도는 정상 상태에서의 1 차원 전도 방정식을 사용하여 계산하였고, 관 외벽온도는 관의 상, 하, 좌, 우에서 측정된 표면 온도의 평균을 사용하였다. 실험결과에 대한 불확실도 예측은 Kline과 McClintock<sup>10)</sup>이 제안한 식으로 계산하여 Table 3에 나타내었다.

**Table 3** Parameters and estimated uncertainties

Parameters	Uncertainty	Unit
Length, width and thickness	±0.53%	m
Area	±0.8%	m <sup>2</sup>
Temperature	±0.11	°C
Temperature difference	±0.2	°C
Pressure	±0.002	MPa
Pressure difference	±200	Pa
Water flowrate	±2%	kg/s
Mass flux of refrigerant	±2%	kg/m <sup>2</sup> s
Heat transfer rate	±2.3%	kW
Vapor quality	±0.03%	-
Heat transfer coefficient	±18%	kW/m <sup>2</sup> K

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 응축 유동 양식

Fig. 3은 Yang과 Sheih의 유동 양식 선도<sup>11)</sup>에서 관경이 3.7, 5.3 mm일 때 질량 유속에 따른 R-1234yf와 R-134a를 나타낸 것으로, 질량 유속이 높을수록 유동은 환상류 형태를 보이며, 질량 유속이 감소할수록 유동은 슬러그류 형태를 보였다. 또한, 관경이 감소할수록 유동이 환상류인 구간으로 넓어지며, 이는 관경이 작아 냉매 증기의 속도가 증가한 것으로 사료된다.

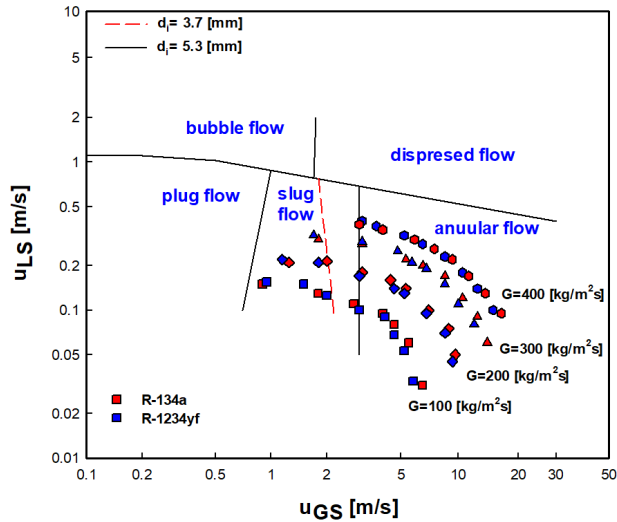


Fig. 3 R-1234yf and R-134a flow pattern by Yang and Shieh

#### 3.2 응축 열전달 특성

##### (1) 건도와 질량 유속의 영향

Fig. 4는 내경 3.7 mm, 5.3 mm인 관에서 건도와 질량 유속에 따른 응축 열전달 계수를 나타낸 그래프로 질량 유속이 증가할수록 열전달 계수가 증가하는 경향을 보였다. 이는 질량 유속의 증가에 따라  $Re$ 도 증가하여 난류가 촉진되기 때문에 열전달이 촉진된 것으로 사료된다. R-1234yf가 질량 유속이  $100 \sim 400 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 의 범위에서의 응축 열전달계수는 질량 유속에 따라 다른 유동 양식을 보였다.  $100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 에서 유동 양식은 전체적인 건도 영역에서 슬러그류 형태를 보였으며, 이때 열전달은 중간 유동과 중력에 좌우된다.  $200 \sim 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 에서 유동 양식은 전체적인 건도에서 절반 이상이 환상류 형태를 보였다. 열전달은 유동 양식에 좌우되며, 유동 양식은 저건도에서 중력에 좌우되고 고건도에서 전단력에 좌우된다.  $400 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 에서는 전체적인 건도 영역에서 환상류 형태를 보였으며, 유동 양식은 주로 전단력에 의해 좌우된다. 모든 질량 유속에서 건도와 함께 열전달계수가 상승하였다. 건도 상승에 따른 상승폭은 관경이 작아질수록 커지며, 이는 관경이 작아지면 환상류에서 표면장력으로 인해 응축 액막이 더 얇아져 열전달 성능이 높아진 것으로 사료된다.

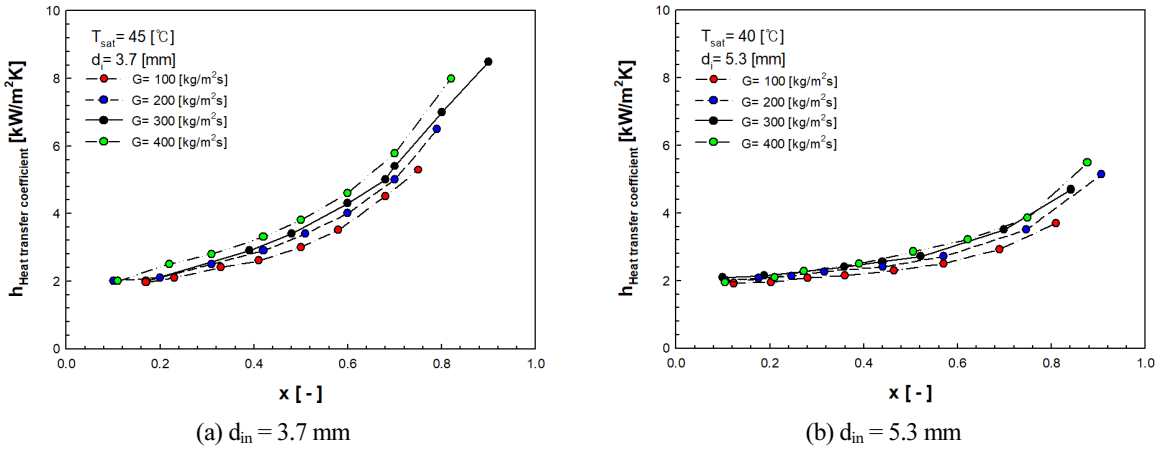


Fig. 4 Heat transfer coefficients with respect to mass flux

### (2) 포화온도의 영향

Fig. 5는 동일한 질량 유속에서 포화온도 변화에 따른 응축 열전달계수를 나타내며, 포화온도가 상승할수록 열전달계수는 감소하는 경향을 보였다. 포화온도의 상승에 따라 냉매 액과 냉매 증기의 밀도비와 냉매 액의 열전도도가 감소하다. 그 결과, 냉매 액의 열저항이 높아지며, 열전달계수 감소의 원인 된다. Lee<sup>12)</sup>의 보고에 따르면 포화온도의 상승에 따라 환산압력이 상승하며, 냉매의 환산압력이 상승하면 냉매는 이상류 특성이 사라지며, 단상 특성에 가까워져 열전달계수가 감소하는 것으로 판단된다.

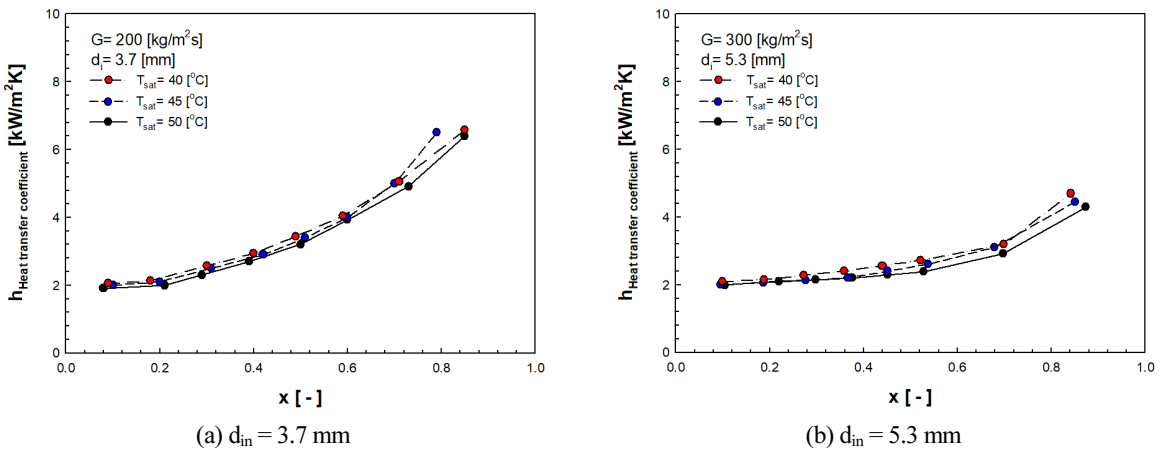


Fig. 5 Heat transfer coefficients with respect to saturation temperature

### (3) 관직경의 영향

Fig. 6은 내경이 3.7, 5.3 mm인 관에서 R-1234yf의 응축 열전달계수를 비교하였으며, 관경이 작아지면 응축 열전달계수는 상승하는 경향을 보였다. 두 관의 열전달 계수를 비교한 결과 3.7 mm관의 열전달계수가 5.3 mm

관의 열전달계수보다 10 ~ 40% 높았으며, 그 상승폭은 저건도보다 고건도에서 크게 나타났다. 관경이 작아지면 냉매의 전단 응력과 표면 장력의 영향이 증가하여 환상류 형태가 쉽게 나타난 것으로 사료된다. Cavalini et al.<sup>13)</sup>과 Son과 Lee<sup>14)</sup>는 관경 감소에 따른 결과에 대해 비슷한 경향을 보고하였다. 즉, 전체 건도에서 관경이 감소할수록 열전달 성능이 높아진다는 결과를 얻을 수 있다.

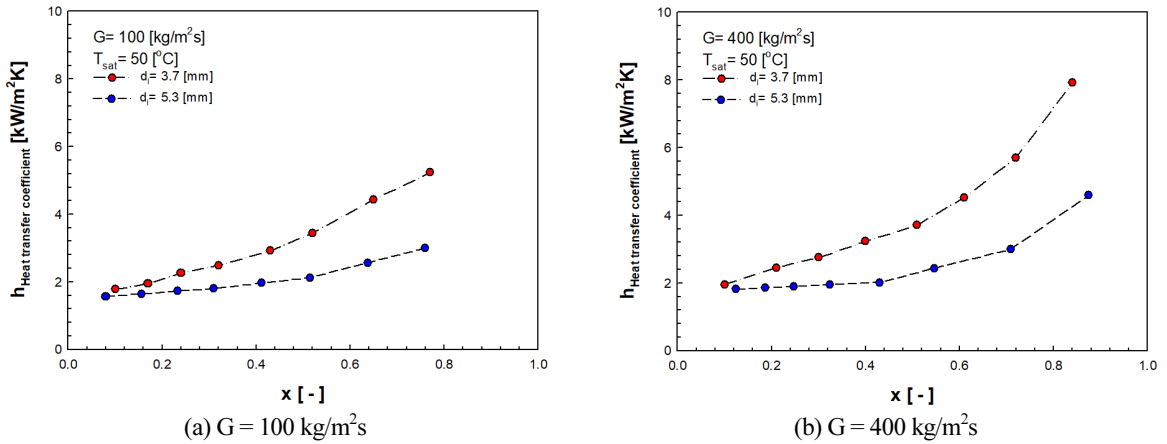


Fig. 6 Heat transfer coefficients with respect to inner diameter tube

#### (4) R-134a와 비교

Fig. 7은 포화온도와 질량 유속이 40 ~ 50°C, 100 ~ 400 kg/m<sup>2</sup>s인 조건에서 R-1234yf와 R-134a의 열전달 계수를 나타냈다. 응축 열전달계수는 R-134a가 R-1234yf보다 전체 건도에서 큰 경향을 보였다. R-1234yf가 R-134a보다 냉매 액의 밀도가 크기 때문에 R-134a가 R-1234yf보다 유속이 높아 R-134a의 난류 영향이 R-1234yf보다 큰 것으로 판단된다. 또한, R-134a보다 R-1234yf의 열전도도가 낮아 R-134a의 응축 열전달 계수가 R-1234yf 보다 큰 것으로 판단된다.

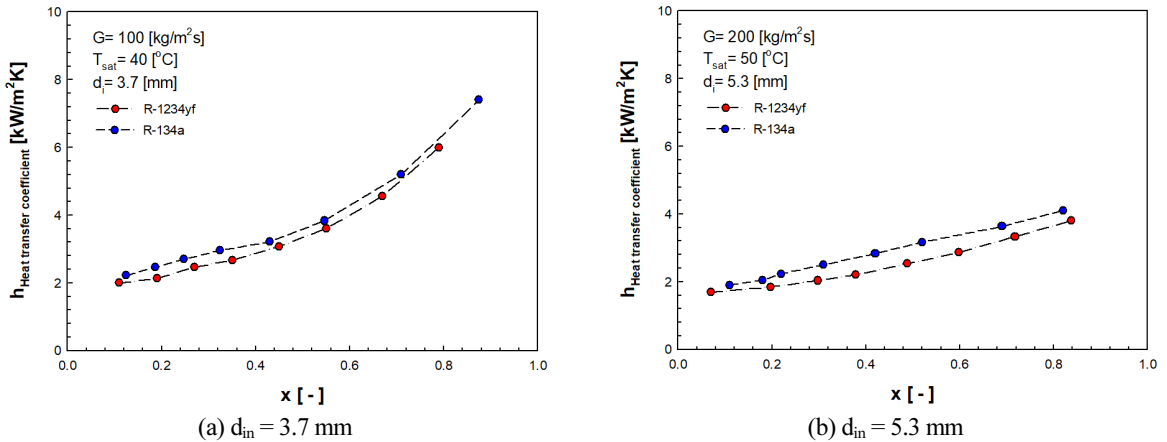


Fig. 7 Comparison of heat transfer coefficient of R-1234yf with that of R-134a



## (5) 상관식과 비교

Fig. 8은 상관식으로 구한 응축 열전달계수와 본 연구의 응축 열전달계수를 비교하였다. Dobson과 Chato<sup>15)</sup>는 내경 3.14 ~ 7.04 mm인 수평관내 R-12, R-22, R-134a 등의 응축 열전달을 연구하였으며, 유동양식을 환상류와 파형류로 구분하여 응축 열전달계수를 계산하는 상관식을 각각 제시하였다. Shah<sup>16)</sup>는 수증기, R-22, 메탄올 등의 유체를 수평관, 수직관, 경사관내에서 응축 열전달을 연구하여 상관식을 제시하였다. Bashar et al.<sup>17)</sup>은 내경 2.5 mm, 질량 유속 50 ~ 200 kg/m<sup>2</sup>s, 포화온도 20, 30°C 조건의 수평 마이크로 핀관내 응축 열전달을 실험하여 본인의 실험 데이터와 여러 연구자의 실험 데이터를 포함하여 15%의 평균편차를 가진 상관식을 제시하였다. Patel et al.<sup>18)</sup>은 내경 1 mm, 질량 유속 200 ~ 800 kg/m<sup>2</sup>s의 조건에서 수평관내 응축 열전달을 연구하여 상관식을 제시하였다. 상관식을 통한 예측값과 실험값을 비교한 결과 Dobson과 Chato의 상관식<sup>15)</sup>과 Bashar et al.의 상관식<sup>17)</sup>이 ±10%의 오차범위 내에서 가장 잘 예측하였다.

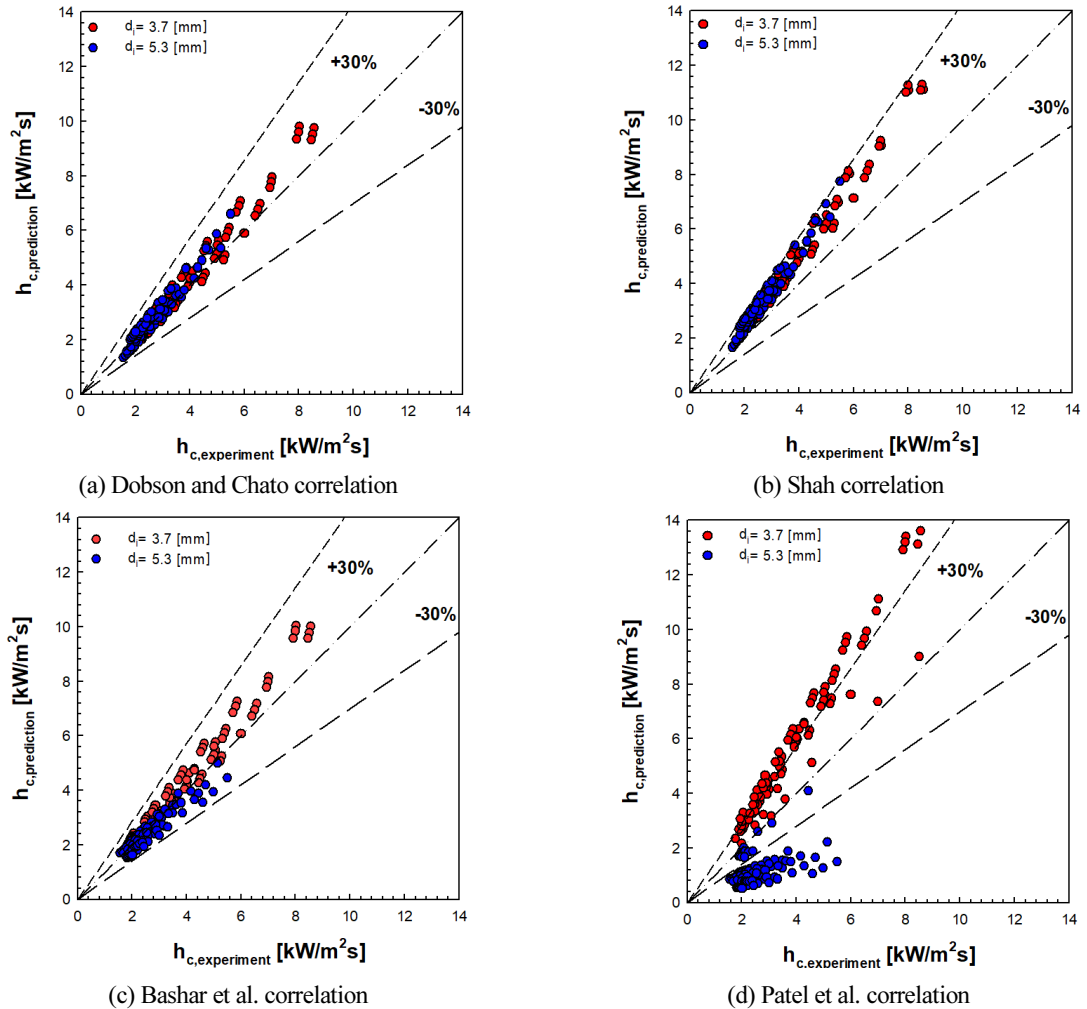


Fig. 8 Comparison between the experimental data and the predicted values

## 4. 결론

본 논문에서는 R-1234yf의 응축 유동 양식과 응축 열전달 특성에 대해 연구하였으며, 그 결론은 다음과 같다.

R-1234yf는 시험부에서 응축될 시 낮은 질량 유속에서 대부분 슬러그류 형태를 보이며, 높은 질량 유속에서는 대부분 환상류 유동 형태를 보였다. 열전달 계수는 질량 유속과 함께 증가했다. 질량 유속의 증가로 Re가 커지며 열전달 성능이 높아진 것으로 판단된다. 관경 변화에 따른 열전달계수의 경우 3.7 mm관이 5.3 mm관보다 10 ~ 40% 높은 열전달계수가 나타났으며, 이는 고건도에서 저건도보다 큰 영향을 보였다. R-134a와 R-1234yf의 열전달계수를 비교했을 때 냉매의 밀도와 열전도도로 인해 R-134a의 열전달계수가 R-1234yf보다 큰 것으로 판단된다. 4개의 상관식과 비교한 결과 Dobson과 Chato의 상관식<sup>15)</sup>과 Bashar et al.의 상관식<sup>17)</sup>은 실험상의 응축 열전달계수와  $\pm 10\%$ 의 오차범위 내에서 예측하였으므로 R-1234yf를 이용하는 응축기 설계에 이용할 수 있다고 판단된다.

## REFERENCES

1. Yoo, H. K. and Jung, D. S., Computer Simulation Study for Analyzing Alternative Refrigerants in Residential Air-conditioners, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 15, No. 3, pp. 75-90, 1995.
2. Park, K. J., Lee, Y., Choe, D. S., and Jung, D. S., Performance of R1234yf and R1234yf/R134a Mixture under Mobile Air-conditioner Operating Conditions, Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 22, No. 12, pp. 837-844, 2010.
3. Jetter, J. J., Smith, N. D., Ratanaphruks, K., Ng, A. S., and Tufts, M. W., Evaluation of Alternatives for HFC-134a Refrigerant in Motor Vehicle Air Conditioning, Proceedings of the International Conference on Ozone Protection Technologies, Washington, D. C., USA, pp. 845-854, 1997.
4. Nielsen, O. J., Javadi, M. S., Sulbaek Andersen, M. P., Hurley, M. D., Wallington, T. J., and Singh, R., Atmospheric chemistry of CF<sub>3</sub>CFCH<sub>2</sub>: Kinetics and mechanisms of gas-phase reactions with Cl atoms, OH radicals, and O<sub>3</sub>, Chemical Physics Letters, Vol. 439, No. 1-3, pp. 18-22, 2007.
5. Del Col, D., Torresin, C. D., and Cavallini, A., Heat Transfer and Pressure Drop During Condensation of the Low GWP Refrigerant HFO1234yf, International Journal of Refrigeration, Vol. 33, No. 7, pp. 1307-1318, 2010.
6. Wang, L., Dang, C., and Hihara, E., Experimental Study on Condensation Heat Transfer and Pressure Drop of Low GWP Refrigerant HFO1234yf in a Horizontal Tube, International Journal of Refrigeration, Vol. 35, pp. 1418-1429, 2012.
7. Illan-Gomez, F., Lopez-Belchi, A., Garcia-Cascales, J. R., and Vera-Garcia, F., Experimental Two-Phase Heat Transfer Coefficient and Frictional Pressure Drop Inside Mini-channels During Condensation with R1234yf and R134a, International Journal of Refrigeration, Vol. 51, pp. 12-23, 2015.
8. Longo, G. A., Mancin, S., Righetti, G., and Zilio, C., Saturated Vapour Condensation of R134a Inside a 4 mm ID Horizontal Smooth Tube: Comparison with the Low GWP Substitutes R152a, R1234yf and R1234ze(E), International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 133, pp. 461-473, 2019.
9. Bashar, M. K., Nakamura, K., Kariya, K., and Miyara, A., Condensation Heat Transfer of R1234yf in a Small Diameter Smooth and Microfin Tube and Development of Correlation, International Journal of Refrigeration, Vol. 120, pp. 331-339, 2020.

10. Kline, S. J. and McClintock, F. A., Describing Uncertainties in Single Sample Experiments, *Mechanical Engineering*, Vol. 75, No. 1, pp. 3-12, 1953.
11. Yang, C. Y. and Shieh, C. C., Flow Pattern of Air-water and Two-phase R-134a in Small Circular Tubes, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 27, No. 7, pp. 1163-1177, 2001.
12. Lee, S. W., Condensation Heat Transfer and Pressure Drop of HFO-1234yf in 4 mm Horizontal Tube, Thesis for the Degree of Master, Department of Refrigeration and Air Conditioning Engineering, The Graduate School, Pukyong National University, 2021.
13. Cavallini, A., Censi, G., Del Col, D., Doretti, L., Longo, G. A., and Rossetto, L., Experimental Investigation on Condensation Heat Transfer and Pressure Drop of New HFC Refrigerants (R134a, R125, R32, R410A, R236ea) in a Horizontal Smooth Tube, *International Journal of Refrigeration*. Vol. 24, pp. 73-87, 2001.
14. Son, C. H. and Lee, H. S., Condensation Heat Transfer Characteristics of R-22, R-134a and R-410A in Small Diameter Tubes, *Heat Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 1153-1166, 2009.
15. Dobson, M. K. and Chato, J. C., Condensation in Smooth Horizontal Tubes, *Jornal of Heat Transfer*, Vol. 120, No. 1, pp. 193-213, 1998.
16. Shah, M. M., Chart Correlation for Saturated Boiling Heat Transfer Equations and Further Study, *ASHRAE Transactions*, Vol. 88, pp. 185-196, 1982.
17. Bashar, M. K., Nakamura, K., Kariya, K., and Miyara, A., Development of a Correlation for Pressure Drop of Two-Phase Flow Inside Horizontal Small Diameter Smooth and Microfin Tubes, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 11, pp. 80-91, 2020.
18. Patel, T., Parekh, A. D., and Tailor, P. R., Experimental Analysis of Condensation Heat Transfer and Frictional Pressure Drop in a Horizontal Circular Mini Channel, *Heat Mass Transfer*, Vol. 56, pp. 1579-1600, 2020.