

선박 냉동 시스템용 친환경 HFO 냉매의 응축 열전달 특성에 관한 실험적 연구

하 수 정[†]

[†]한국폴리텍대학(교수)

Experimental Study on Condensation Heat Transfer Characteristics of Eco-friendly HFO Refrigerants for Marine Refrigeration Systems

Soo-Jung HA[†]

[†]Korea Polytechnic College Chungju Campus(professor)

Abstract

This study applied the next-generation refrigerant R-1234yf to facilitate the eco-friendly transition of marine and fisheries refrigeration and air conditioning systems. By experimentally analyzing the condensation heat transfer characteristics within horizontal smooth tube, the following conclusions were drawn. As mass flux and vapor quality increased, annular flow developed, leading to an increase in the condensation heat transfer coefficient. Conversely, as the saturation temperature rose, the heat transfer coefficient decreased due to increased thermal resistance of the liquid film. Although R-1234yf exhibits a somewhat lower heat transfer coefficient compared to R-134a due to material limitations (high density, low thermal conductivity), it was demonstrated that this can be sufficiently overcome through tube diameter optimization and tube design. Furthermore, the study verified that the Dobson & Chato and Bashar correlations can be effectively utilized in practical design applications. The condensation heat transfer characteristics of R-1234yf and the correlation verification results presented in this study can serve as fundamental data for the thermal design and performance prediction of refrigeration and air conditioning condensers utilizing small-diameter horizontal smooth tubes. However, since this study was conducted within a single tube diameter and a limited range of mass flow rates and saturation temperatures, follow-up research considering various tube diameters, operating conditions, vibration and inclination, and actual marine operating environments is necessary to expand its application as design data for marine and fisheries refrigeration systems.

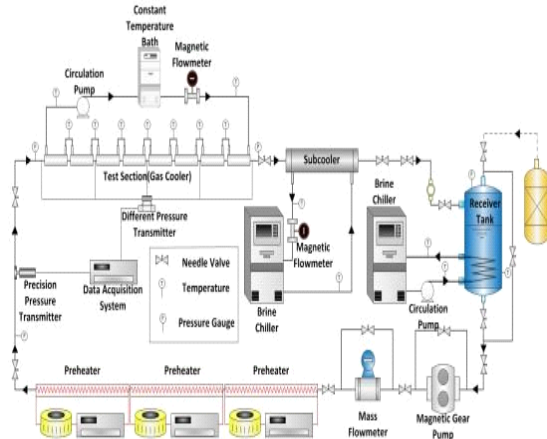
Key words : Ship refrigeration system, Condensation heat transfer coefficient, Flow pattern, R-1234yf, Eco-friendly refrigerant

I. 서 론

국제해사기구(IMO)의 환경 규제 강화와 지구 온난화에 따라 수산 및 해양 산업 분야에서도 친환경 기술 도입이 시급한 과제로 대두되고 있다.

특히 어선, 수산물 운반선 및 수산물 가공 저장 시설에 필수적인 냉동·공조 시스템은 기존에 널리 사용되던 하이드로플루오로카본(HFC) 계열 냉매인 R-134a는 MARPOL Annex VI 제12규칙에서 규제하는 오존층파괴물질에는 해당하지 않으나,

[†] Corresponding author: 043-850-4210, h0452@kopo.ac.kr

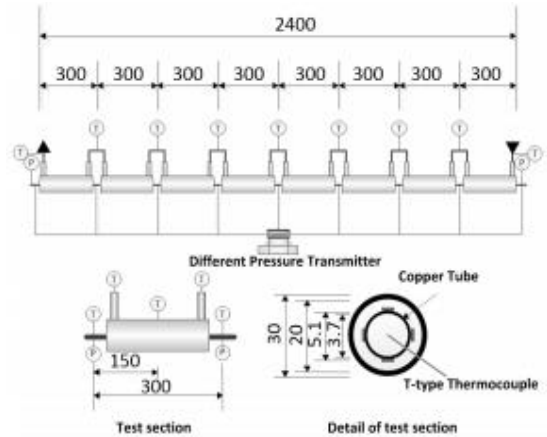


[Fig. 1] Schematic diagram of the experimental apparatus. Adapted from Ha's doctoral dissertation (2022) and Seol et al. (2021).

높은 지구온난화지수를 갖는 HFC 냉매로서 몬트리올의정서 기각리 개정서에 따른 국제적인 HFC 단계적 감축대상에 포함된다. 또한 IMO의 선박 온실가스 감축전략은 R-134a의 사용을 직접 금지하지는 않지만, 선박 시스템의 전반적인 온실가스 배출과 에너지소비 저감을 요구하고 있으므로 저GWP 냉매 및 고효율 냉동시스템 개발의 정책적 배경으로 작용한다(Yoo and Jung, 1995; Park et al., 2010).

이러한 높은 GWP 냉매를 대체하기 위해 하이드로플루오로올레핀(HFO) 계열의 R-1234yf가 유력한 대안으로 주목받고 있다. R-1234yf는 오존층 파괴지수(ODP)가 0이며, 지구온난화지수(GWP)가 4에 불과하여 우수한 친환경성을 자랑하며, 기존 R-134a 시스템과 유사한 열역학적 증기압 특성을 보여 시스템의 대대적인 수정 없이 적용 가능하다는 장점이 있다(Jetter et al., 1997; Nielsen et al., 2007).

해양 냉동 장치는 가혹한 염해 환경과 한정된 선내 공간이라는 특수성을 가지므로 고효율·소형화 설계가 필수적이다. 이를 달성하기 위해서는 응축기 튜브의 환경을 최적화하는 연구가 선행되어야 하나, 친환경 냉매 R-1234yf의 응축 열전달



[Fig. 2] Detail view of the test section. Adapted from Ha's doctoral dissertation (2022) and Seol et al. (2021).

특성에 대한 실험적 연구 및 이론적 분석은 여전히 부족한 실정이다(Del Col et al., 2010).

따라서 본 연구에서는 내경 3.7 mm 평활관을 대상으로 유량 변화, 포화온도 변화에 따른 R-1234yf의 응축 열전달 특성과 유동 양식을 실험적으로 규명하고자 한다. 나아가 기존 R-134a와의 비교 분석 및 대표적인 열전달 상관식들과의 검증을 통해, 소구경 응축기의 열설계와 성능 예측에 활용할 수 있는 기초자료를 제시하고자 한다.

II. 연구 방법

1. 실험 장치 및 조건

본 연구에 사용된 실험장치는 하수정의 박사학위 연구과정에서 구축된 R-1234yf 응축 열전달 실험장치이며, 동일 장치의 기본 구성과 일부 실험결과는 Seol et al.의 선행 연구에 보고된 바 있다. 본 연구에서는 해당 장치 중 내경 3.7 mm의 수평 평활관 시험부에서 취득한 자료를 이용하여 질량유속, 건도 및 포화온도에 따른 응축 열전달 특성을 분석하였다. 또한 R-134a와의 비교 및 기존 응축 열전달 상관식의 예측성 평가를 수행하

<Table 1> Experimental conditions during condensing process of R-1234yf.

Refrigerant	R-1234yf
Test section	Horizontal smoothed tube
I.D. of Test section, [mm]	3.7 (5.1)
(O.D. of Test section, [mm])	
Mass flux of refrigerant, [kg/m ² s]	100, 200, 300, 400
Saturation temperature of condenser, [°C]	40, 45, 50
Temperature of cooling water, [°C]	15

였다. 실험장치의 개략도와 시험부의 상세 구조를 각각 [Fig. 1]과 [Fig. 2]에 나타내었다. 실험장치는 마그네틱 기어펌프, 질량유량계, 예열기, 시험부(수평 평활관), 수액기 및 칠러로 구성된다. [Fig. 2]에서와 같이, 시험부 튜브는 내경(d_{in}) 3.7 mm(길이 2,400 mm)의 동관을 사용하여 대향류 형태로 냉각수와 열교환하도록 설계하였다.

[Fig. 1]의 냉매 순환계에서는 수액기에서 배출된 액상 냉매가 마그네틱 기어펌프에 의해 이송된다. 냉매는 질량유량계를 통과하면서 유량이 측정되며, 유량조절밸브와 바이패스 회로를 이용하여 목표 유량으로 제어된다. 이후 냉매는 예열기로 유입되어 가변 전압조정기에 의해 공급되는 열량에 따라 증발한다. 생성된 냉매 증기는 시험부에서 열원수와 대향류로 열교환한 후 응축되며, 응축액은 수액기로 회수되어 다시 순환한다. 열원수는 별도의 순환펌프를 통해 흐르고, 칠러에서 온도가 일정하게 유지된다. 또한 열원수의 유량은 질량유량계를 이용해 측정한 후 일정 유량으로 조절된다(Seol et al., 2021).

<Table 1>에서와 같이, 실험 조건은 질량유속 100~400 kg/m²s, 응축 포화온도 40°C, 45°C, 50°C 범위에서 수행되었으며, 건도(x)에 따른 대류 응축 열전달계수(hc)를 정밀하게 측정·산출하였다.

2. 데이터 정리

응축기에서 냉각수가 얻은 열교환량(Q_{cs})과 관

내측을 흐르는 냉매가 잃은 열교환량(Q_c)을 알아야 하고, 그 수식들은 다음과 같다.

$$Q_{cs} = M_{cs} \cdot c_{p,cs} \int_{T_{cs,in}}^{T_{cs,out}} dT \dots\dots\dots (1)$$

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

여기에서, Q_{cs} 와 Q_c 는 각각 열원수에 의한 열교환량과 냉매의 엔탈피차와 온도차에 의한 열교환량이고, M_{cs} 와 M_c 는 각각 응축기측 열원수의 유량과 냉매의 순환량이다. 그리고 $T_{cs,in}$ 과 $T_{cs,out}$ 는 각각 응축기 냉각기측 열원수의 입구와 출구 온도를 나타내며, $c_{p,cs}$ 는 응축기측 열원수의 비열을 나타낸다. 또 $i_{c,in}$ 과 $i_{c,out}$ 는 각각 응축기 입구와 출구에서의 냉매의 엔탈피를 나타낸다. 응축기 소구간에서의 열유속 q_c 는 다음과 같은 식 (3)으로 부터 계산하였다.

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

여기에서, Q 는 식 (1)~(2)로 계산한 응축기의 열량이다. 그리고 d_i 는 평균 관내경이고, dz 는 소구간의 길이를 나타낸다. 또 냉각 과정에서 관의 원주 방향으로의 열전달 계수는 시스템의 성능에 많은 영향을 미치므로, 원주 방향으로의 열전달 계수를 계산할 필요가 있는데, 이러한 국소 열전달 계수는 다음 식으로부터 계산할 수 있다.

$$h_{c,loc} = \frac{q_c}{T_c - T_{c,w,in}} \dots\dots\dots (4)$$

위 식에서, $h_{c,loc}$ 는 응축기에서의 소구간 국소 열전달 계수를 나타내며, T_c 는 응축기에서의 냉매 온도이고, $T_{c,w,in}$ 는 응축기에서의 관벽 내표면 온도이다. 그리고, 관벽 내표면 온도는 정상 상태에서의 1 차원 전도 방정식을 사용하여 다음

과 같이 식 (5)로 계산한다.

$$T_{c,w,in} = T_{c,w,out} - \frac{Q_{c,loc}}{2\pi \cdot k_w \cdot dz} \cdot \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right) \dots\dots (5)$$

여기에서, $T_{c,w,out}$ 는 다음의 식 (6)과 같이 관의 상, 하, 측부의 표면 온도를 평균한 내관 평균 벽면 온도이고, d_o 와 d_i 는 내관의 외경과 내경이다. 또 k_w 는 동관의 열전도도이다.

$$T_{c,w,out} = \frac{T_{w,top} + 2 T_{w,side} + T_{w,bottom}}{4} \dots\dots\dots (6)$$

식 (6)에서, $T_{w,top}$, $T_{w,side}$, $T_{w,bottom}$ 는 각각 내관의 상부, 측부, 하부의 벽면 측정 온도를 나타낸다.

냉매의 건도 x 는 다음의 식 (7)과 같이 계산할 수 있으므로, 이에 따라 응축기 소구간의 출구 건도 $x_{loc,out}$ 는 식 (8)로 계산한다.

$$x = \frac{\Delta i_{loc}}{i_{lv}} \dots\dots\dots (7)$$

$$x_{loc,out} = x_{in} - \frac{\pi \cdot d_i}{M_c \cdot i_{lv}} \cdot \int_{z_{in}}^{z_{out}} q_c dz \dots\dots (8)$$

여기서, Δi_{loc} 는 소구간 입출구에서의 냉매 엔탈피차이며, i_{fg} 는 냉매의 잠열이다. 또 d_i 는 관 내경이고, M_c 는 냉매 유량이다. 그리고 z_{in} 과 z_{out} 는 소구간의 입구와 출구를 나타내며, q_c 는 식 (2.12)으로부터 계산되는 응축기에서의 열유속이므로, $\pi \cdot d_i \int_{z_{in}}^{z_{out}} q_c dz$ 는 열교환기 입구에서부터 소구간의 열량을 누계한 값이다. 실험결과에 대한 불확실도 예측은 Kline과 Mcclintock이 제안한 식으로 계산하여 <Table 2>에 나타내었다(Kline and Mcclintock, 1953).

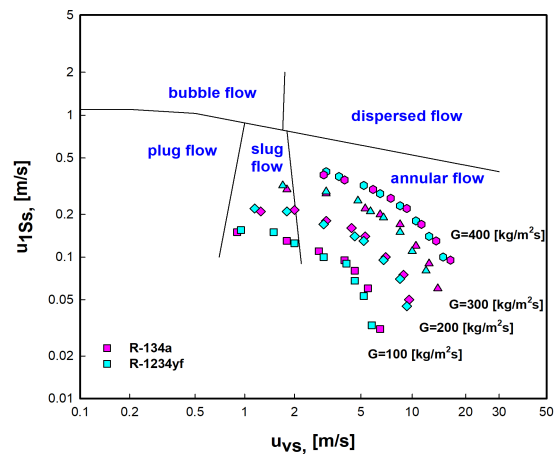
<Table 2> Parameters and estimated uncertainties of R-1234yf condensation heat transfer test

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

III. 연구 결과

1. 응축 유동 양식

[Fig. 3]은 관경이 3.7 mm일 때 Yang과 Sheih의 유동 양식 선도에 R-1234yf와 R-134a를 나타낸 것으로, Yang과 Shieh의 유동 양식 선도를 바탕으로 유동 특성을 분석한 결과, 질량유속이 높을

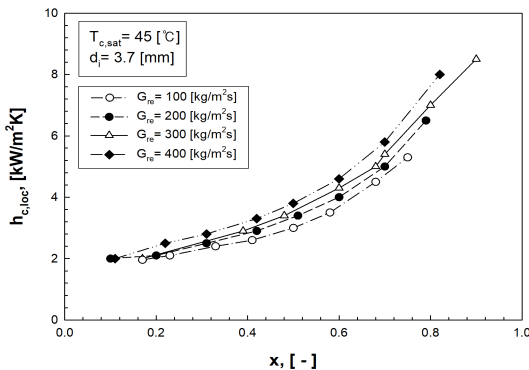


[Fig. 3] R-1234yf and R-134a flow pattern by Yang and Shieh.

수록 전단력이 지배적인 환상류(Annular flow) 형태가 뚜렷하게 분류되었으며, 질량유속이 낮아질수록 중력이 작용하는 슬러그류(Slug flow) 양식을 나타냈다(Yang and Sheih, 2001).

2. 건도 및 질량유속의 영향

[Fig. 4]는 내경 3.7 mm 관에서 건도와 질량 유속에 따른 응축 열전달 계수를 나타낸 것으로, 모든 실험 조건에서 건도와 질량유속이 증가할수록 응축 열전달계수($h_{c,loc}$)가 약 13~148% 정도 크게 상승하는 경향을 보였다. 이는 질량유속 상승에 따라 레이놀즈수(Reynolds number)가 증가하여 난류 흐름이 촉진되기 때문이다. 건도가 높은 영역에서는 관경이 작을수록 액막(Liquid film)이 얇아져 표면장력의 효과로 인해 열전달 성능의 상승폭이 더욱 가파르게 나타났다.

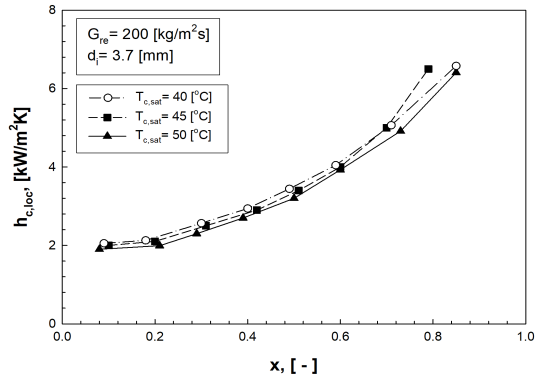


[Fig. 4] Heat transfer coefficients with respect to mass fluxes at a constant saturation temperature and inner diameter tube.

3. 포화온도의 영향

[Fig. 5]는 동일한 질량 유속에서 포화온도 변화에 따른 응축 열전달계수를 나타낸 것으로, 동일한 질량유속 조건에서 응축 포화온도가 40℃에서 50℃로 상승할수록 응축 열전달계수는 감소하였다. 이는 포화온도 상승에 따라 냉매 액과 증기의 밀도비 및 액체 열전도도가 감소하여 액막

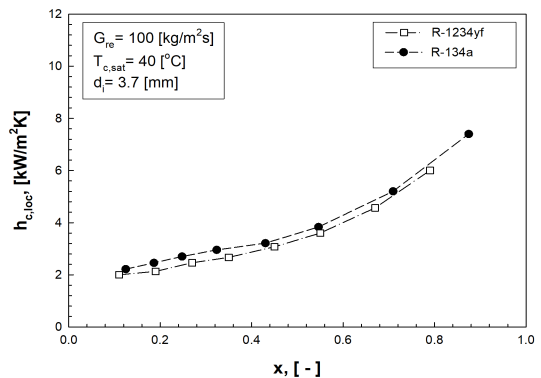
의 열저항이 증가하기 때문이다.



[Fig. 5] Heat transfer coefficients with respect to saturation temperature at a constant mass flux.

4. 기존 냉매(R-134a)와의 비교

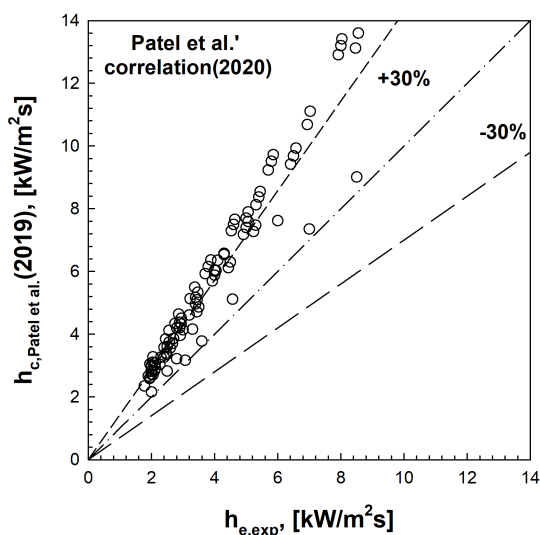
[Fig. 6]은 동일한 포화온도와 질량 유속 조건에서 R-1234yf와 R-134a의 열전달계수를 나타낸 것으로, 동일한 운전 조건에서 R-134a의 응축 열전달계수가 R-1234yf보다 전체 건도 영역에서 다소 높게 나타났다. 이는 R-1234yf가 R-134a에 비해 액체 밀도가 커서 동일 질량유속 하에서 실제 체적 유속이 낮고 난류 강도가 약하기 때문이며, R-1234yf의 상대적으로 낮은 열전도도 역시 원인으로 판단된다.



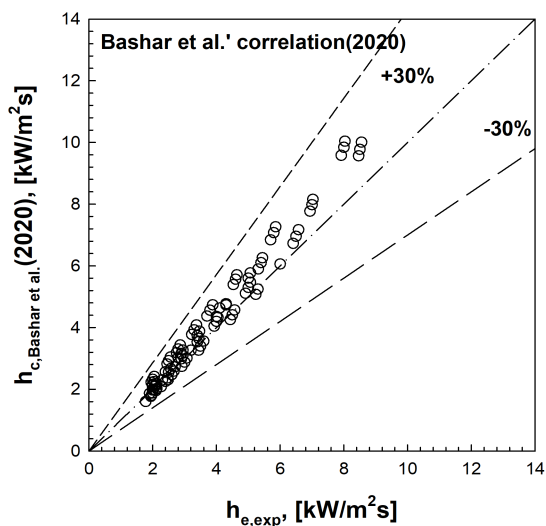
[Fig. 6] Comparison of heat transfer coefficient of R-1234yf with that of R-134a.

5. 기존 열전달 상관식과의 비교

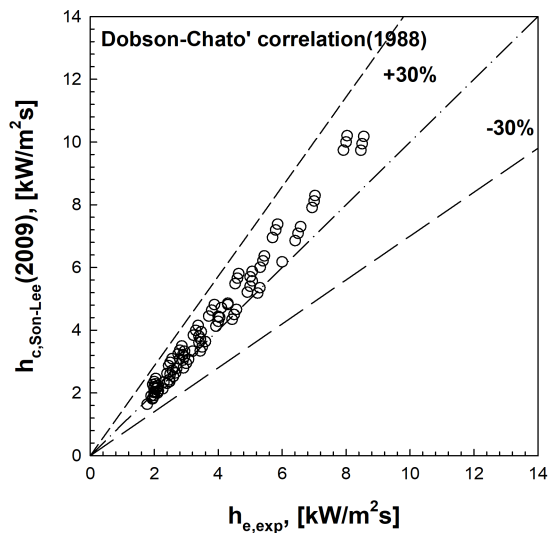
[Fig. 7~10]은 상관식으로 구한 응축 열전달계수와 본 연구의 응축 열전달계수를 비교한 것으로, 실험을 통해 얻어진 R-1234yf의 응축 열전달



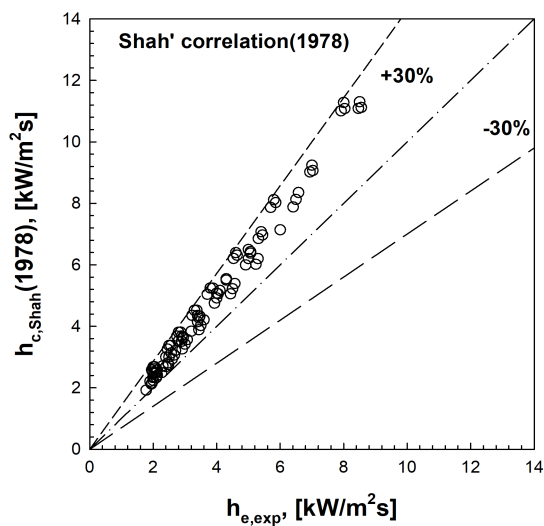
[Fig. 7] Comparison of measured heat transfer coefficient with those predicted by Patel et al.' correlation.



[Fig. 8] Comparison of measured heat transfer coefficient with those predicted by Bashar et al.' correlation.



[Fig. 9] Comparison of measured heat transfer coefficient with those predicted by Dobson-Chato' correlation.



[Fig. 10] Comparison of measured heat transfer coefficient with those predicted by Shah' correlation.

데이터와 Dobson and Chato, Shah, Bashar et al., Patel et al.의 기존 예측 상관식들을 비교 검증하였다. 분석 결과, 유동 양식을 반영한 Dobson과 Chato의 상관식 및 Bashar et al.의 상관식이 실험

값을 $\pm 10\%$ 오차범위 내에서 가장 정확하게 예측하는 것으로 나타났다(Lee, 2021; Cavallini et al., 2001; Son and Lee, 2009; Dobson and Chato, 1998; Shah 1982; Bashar et al., 2020; Patel et al., 2020).

IV. 결 론

본 연구는 해양·수산 냉동공조 시스템의 친환경 전환을 위하여 차세대 냉매인 R-1234yf를 적용하고 내경 3.7 mm의 수평 평활관 내에서 질량유속, 건도 및 포화온도 변화에 따른 응축 열전달 특성을 실험적으로 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

질량유속과 건도가 증가할수록 냉매측 전단력과 난류 효과가 증대되어 응축 열전달계수가 증가하였으며, 포화온도가 상승할수록 냉매 물성 및 액막 열저항의 영향으로 열전달계수는 감소하였다. 동일한 운전조건에서 R-1234yf의 응축 열전달계수는 R-134a보다 다소 낮게 나타났으며, 이는 두 냉매의 밀도, 열전도도 및 기타 열물성 차이에 기인한 것으로 판단된다.

기존 상관식과의 비교 결과, Dobson and Chato 및 Bashar et al.의 상관식이 본 연구의 실험자료를 상대적으로 양호하게 예측하였다. 다만 상관식의 적용 적합성을 객관적으로 판단하기 위해서는 평균절대오차, 평균편차 및 표준편차 등 정량적인 오차지표를 추가로 제시할 필요가 있다.

본 연구에서 제시한 R-1234yf의 응축 열전달 특성과 상관식 검증 결과는 소구경 수평 평활관을 적용한 냉동·공조용 응축기의 열설계 및 성능예측을 위한 기초자료로 활용될 수 있다. 그러나 본 연구는 단일 관경과 제한된 질량유속 및 포화온도 범위에서 수행되었으므로, 선박 및 수산 냉동시스템의 설계자료로 확대 적용하기 위해서는 다양한 관경, 운전조건, 진동·경사 및 실제 해상 운전환경을 고려한 후속 연구가 필요하다.

References

- Bashar, M. K., Nakamura, K., Kariya, K., and Miyara A(2020). Development of a Correlation for Pressure Drop of Two-Phase Flow Inside Horizontal Small Diameter Smooth and Microfin Tubes. *International Journal of Refrigeration*, 11, 80~91. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.08.013>.
- Cavallini A, Censi G, Del Col D, Doretti L, Longo GA and Rossetto L(2001). 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*. 24, 73~87.
- Del Col D, Torresin CD and Cavallini A(2010). Heat Transfer and Pressure Drop During Condensation of the Low GWP Refrigerant HFO1234yf. *International Journal of Refrigeration*, 33(7), 1307~1318. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2010.07.020>.
- Dobson MK and Chato JC(1998). Condensation in Smooth Horizontal Tubes. *Jornal of Heat Transfer*, 120(1), 193~213. <https://doi.org/10.1115/1.2830043>.
- Ha SJ(2022). An Experimental Study on the Evaporation and Condensation Heat Transfer Characteristics of R-1234yf. Ph.D. Dissertation. Department of Refrigeration & Air-Conditioning Engineering, Graduate School, Pukyong National University.
- Nielsen OJ, Javadi MS, Sulbaek Andersen MP, Hurley MD, Wallington TJ and Singh R(2007). Atmospheric chemistry of CF₃CFCH₂: Kinetics and mechanisms of gas-phase reactions with Cl atoms, OH radicals, and O₃. *Chemical Physics Letters*, 439(1-3), 18~22.
- Jetter JJ, Smith ND, Ratanaphruks K, Ng AS and Tufts MW(1997). 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, 845~854.
- Kline SJ and McClintock FA(1953). Describing Uncertainties in Single Sample Experiments, *Mechanical Engineering*, 75(1), 3~12. <http://dx.doi.org/10.1115/1.4015703>.
- Lee SW(2021). 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.
- Park KJ, Lee Y, Choe, DS and Jung, DS(2010). Performance of R1234yf and R1234yf/R134a Mixture under Mobile Air-conditioner Operating Conditions. *Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 22, No. 12, 837~844.
<http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2010.22.12.837>.
- Patel T, Parekh AD and Tailor PR(2020). Experimental Analysis of Condensation Heat Transfer and Frictional Pressure Drop in a Horizontal Circular Mini Channel. *Heat Mass Transfer*, 56, 1579~1600.
<https://doi.org/10.1007/s00231-019-02798-5>.
- Seol SH, Yoon JI, Lee JH, Cha SY, Ha SJ(2021). Condensation Heat Transfer Characteristics of R-1234yf with the Variation of Tube Diameter. *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 41(4), 161~171.
<https://doi.org/10.7836/KSES.2021.41.4.161>.
- Shah MM(1979). A General Correlation for Heat Transfer During Film Condensation Inside Pipes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 22(4), 547~556.
[https://doi.org/10.1016/0017-9310\(79\)90058-9](https://doi.org/10.1016/0017-9310(79)90058-9).
- Son CH and Lee HS(2009). Condensation Heat Transfer Characteristics of R-22, R-134a and R-410A in Small Diameter Tubes, *Heat Mass Transfer*, 45, 1153~1166.
<http://dx.doi.org/10.1007/s00231-008-0466-9>.
- Yang CY and Shieh CC(2001). Flow Pattern of Air-water and Two-phase R-134a in Small Circular Tubes. *International Journal of Multiphase Flow*, 27(7), 1163~1177.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0301-9322\(00\)00063-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-9322(00)00063-X).
- Yoo HK and Jung DS(1995). Computer Simulation Study for Analyzing Alternative Refrigerants in Residential Air-conditioners. *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 15(3), 75~90.
<http://dx.doi.org/10.12813/kieae.1995.15.3.075>.
-
- Received : 02 July, 2026
 - Revised : 03 August, 2026
 - Accepted : 07 August, 2026