

## 관경 변화에 따른 R-1234yf의 증발 압력강하에 관한 실험적 연구

윤정인<sup>1</sup>, 설성훈<sup>1</sup>, 이준혁<sup>1</sup>, 박은민<sup>1</sup>, 하수정<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>부경대학교 냉동공조공학과, <sup>2</sup>한국폴리텍대학교 충주캠퍼스 에너지 설비과

### An Experimental Study on the Evaporation Pressure Drop of R-1234yf with Variation of Pipe Diameter

JungIn Yoon<sup>1</sup>, SungHoon Seol<sup>1</sup>, JoonHyuk Lee<sup>1</sup>, EunMin Park<sup>1</sup>, SooJeong Ha<sup>2\*</sup>

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

<sup>2</sup>Department of Energy Equipment Chungju Campus Korea Polytechnic University

**요 약** HFC계 냉매인 R-134a는 GWP가 높아 환경 문제를 일으키고 있으므로 이를 대체하여 열역학적 특성이 유사하고 GWP가 낮은 HFO계 냉매 R-1234yf를 연구하고자 한다. 그러나 R-1234yf에 대한 실험적 연구는 매우 부족한 실정이다. 따라서, 우리는 R-1234yf의 증발 압력강하 메커니즘을 명확하게 규명하기 위해 연구가 필요하다고 생각했다. 실험조건은 질량유속 200~500 kg/m<sup>2</sup>s, 열유속 5~10 kW/m<sup>2</sup>, 포화온도 5~15°C 및 관경 3.7~6.8 mm이다. 압력강하는 포화온도가 증가함에 따라 감소한다. 밀도 및 점도계수비가 각각 27, 15%씩 감소하기 때문이다. 또한, 압력강하는 열유속이 증가함에 따라 증가하는 경향이 있다. 이는 모든 관경에 대해 질량 유량이 클수록 압력강하가 커지며, 낮은 건도보다 높은 건도에서 압력강하가 증가한다는 것을 보여준다. 관경은 감소할수록 압력강하가 증가하였다. 내경 3.7~6.8 mm 관 내 R-1234yf의 증발 압력강하를 타 상관식으로 예측한 값을 비교한 결과 각 평균오차 -15.3%, -21.3%로 좋은 일치를 보였다.

**Abstract** The HFC refrigerant R-134a has a high GWP and causes environmental problems. Hence, we intend to replace it with the HFO refrigerant R-1234yf with similar thermodynamic properties and a low GWP. However, experimental studies on R-1234yf are very scarce. Therefore, research is needed to clearly elucidate the mechanism of evaporation pressure drop of R-1234yf. The experimental conditions for the present study were a mass flow rate of 200~500 kg/m<sup>2</sup>s, a heat flux of 5~10 kW/m<sup>2</sup>, a saturation temperature of 5~15°C, and a diameter of 3.7~6.8 mm. From the experiments, we observed that the pressure drop decreases as the saturation temperature increases. This is because the density and viscosity coefficient ratio decrease by 27 and 15%, respectively. The pressure drop also tends to increase with an increasing heat flux. This shows that for all pipe diameters, the greater the mass flow rate, the greater the pressure drop. The pressure drop also increases at higher vapor quality than at lower vapor quality. Moreover, as the pipe diameter decreased, the pressure drop increased. As a result of comparing the values predicted by other correlation formulas for the evaporation pressure drop of R-1234yf in pipes with inner diameter 3.7~6.8 mm, the average error was -15.3% and -21.3%, respectively, showing good agreement.

**Keywords** : Evaporation, Pressure-Drop, R-1234yf, Pipe Diameter, Horizontal Tube

본 논문은 하수정의 박사학위논문을 바탕으로 작성되었다.

\*Corresponding Author : Soo-Jeong Ha(Polytechnics Univ.)

email: h0452@kopo.ac.kr

Received July 22, 2021

Accepted November 5, 2021

Revised August 27, 2021

Published November 30, 2021

## 1. 서론

HFC계(Hydro-Fluoro-Carbon) 냉매는 ODP(Ozone-Depletion-Potential)가 낮아 냉동·공조 산업에서 다양하게 사용되고 있다. 하지만 GWP(Global-Warming-Potential)가 높아 상당한 환경 문제를 초래하고 있기 때문에 현재 단계적으로 규제되어가고 있는상황이다. HFC계 냉매는 우리나라를 비롯해 24년 까지 단계적으로 사용량을 줄여야 하며 45년까지 24년 대비 80%를 줄여야 한다. 이러한 상황을 전환하고자하여 개발 중인 HFO계(Hydro-fluoro-olefins) 냉매는 GWP가 낮아 환경친화적인 신냉매로 각광받고 있다.

HFC계 냉매 중 여러 분야에 사용되고 있는 R-134a는 GWP가 1300이다. 하지만 R-134a와 열역학적 물성치가 유사한 HFO계 R-1234yf는 GWP가 4로 현저히 낮아 R-134a의 유력한 대체냉매이다.

R-1234yf에 관한 연구는 2006년 이후 활발히 시작되었으며[1-4] 대표적인 종래연구는 다음과 같다. Oh 등[5]은 50~600 kg/m<sup>2</sup>s의 질량유속, 0~10℃의 포화온도 조건에서 1.5와 3.0 mm 수평관 내 R-1234yf의 압력강하에 대해서 실험적으로 연구하였고 모든 조건이 압력강하에 영향을 미친다고 하였다. Del Col 등[6]은 내경 1 mm의 원형 마이크로 채널에서 R-1234yf의 압력강하를 측정하고 R-134a와 비교하였다. 그 결과 동일한 조건에서 R-1234yf는 R-134a에 비해 약 10~12% 정도 낮은 압력강하를 나타냈다.

이와 같은 종래연구들을 미루어 보아 R-1234yf의 증발 압력강하에 대한 실험적인 연구들은 대단히 부족한 실정이다. 따라서 R-1234yf의 증발 압력강하 매커니즘을 명확하게 규명하기 위해 더 많은 연구가 필요하다. 본 연구에서는 관경 변화에 따른 R-1234yf의 증발 압력강하에 대한 실험적 연구를 하고자 하며 냉동-공조 산업에서 가장 중요한 요소인 R-1234yf용 증발기 설계를 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 데이터 정리

## 2.1 실험장치

실험장치는 R-1234yf의 증발과정 중의 압력강하를 측정하고자 하였다. Fig. 1은 실험장치의 전체적인 개략도를 나타낸 것이고, Fig. 2는 관경에 따른 테스트 섹션을 나타낸 것이다. 실험장치는 크게 마그네틱 기어 펌프

(Magnetic Gear Pump), 질량 유량계(Mass Flow meter), 예열기(pre-heater), 시험부(test section), 수액기(Reciver Tank), 보조 냉각기(sub-cooler), 항온조(Auto Voltage Regulator) 등으로 구성되어 있다. R-1234yf의 순환 과정은 압축기를 사용하지 않고 마그네틱 기어 펌프를 이용하여 과냉 상태의 R-1234yf를 순환시킨다. 질량유량계를 이용하여 냉매의 유량과 밀도를 측정하고 R-1234yf의 상태량을 확인한다. 증발 실험은 과냉 상태로 질량유량계를 통과한 R-1234yf가 온도와 압력을 동시에 조절하기 어렵기 때문에 포화온도는 항온조에서 조정하고, 건도 및 압력은 예열기를 이용하여 조정거친 후, R-1234yf의 냉각과 응축을 위해서 보조 냉각기로 들어간다. 수액기 내에는 액상과 기상이 동시에 존

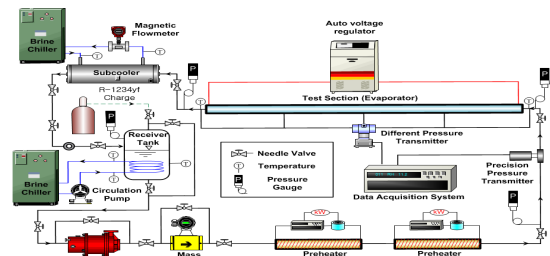


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus for evaporation heat transfer with R-1234yf

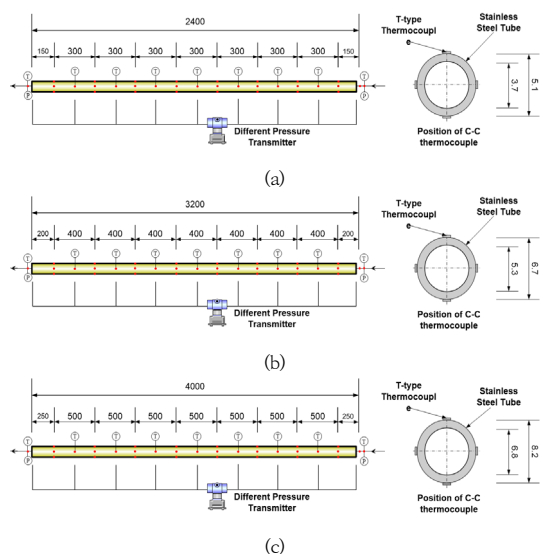


Fig. 2. Schematic diagram of the test section for evaporation heat transfer with R-1234yf

- (a) Test section for inner diameter tube of 3.7 [mm]
- (b) Test section for inner diameter tube of 5.3 [mm]
- (c) Test section for inner diameter tube of 6.8 [mm]

재하므로 하부의 R-1234yf 냉매액을 마그네틱 기어 펌프로 순환시켰다. 이때 R-1234yf는 관 외부의 온도에 민감하게 반응하여 단열이 미비할 경우 관내를 이동하는 동안 상변화하여 유동할 수 있으므로 이러한 현상을 방지하기 위해 관과 밸브 등을 단열재로 단열하여 공기층이 생기지 않도록 하였고 수액기에서 저온저압의 R-1234yf 냉매액을 관내에 순환시켜 상변화하지 않게 방지하여 시험조건에 맞는 포화온도 및 건도를 유지하였다.

실험장치에서 예열기는 질량유속에 따라 상변화에 필요한 에너지를 능동적으로 인가하기 위해 예열기를 2개로 나누었다. 증발 시험부에는 가변 전압조절기(Auto voltage regulator)를 사용하여 공급열량을 조절할 수 있도록 설계하였다. 시험부 입구의 냉매 건도를 조절하기 위해 예열기는 스테인리스관에 직접 가열하는 방식으로 R-1234yf에 열량을 공급하도록 설계하였으며, 예열기에 공급되는 전력을 조절하여 동일한 실험조건을 재현할 수 있게 전력량계(power meter)를 통해 전력량을 지시하게 하였다.

Fig. 2에 나타난 것처럼, 증발 시험부는 3 종류로 스테인리스관을 사용하였으며, 니크롬선에서 발생하는 열을 이용하여 R-1234yf를 가열하는 방식으로 제작하였다. 시험부 이외의 장치와는 전기적으로 절연하도록 시험부의 양 끝단에 고압용 절연 피팅(Dielectric fitting)을 설치하였다. 니크롬선에 의한 직접 가열 방식을 택한 것은 실험조건을 변화를 비교적 용이하게 할 수 있으며, 일정 열유속 조건을 구현하기 위해서이다. 가열구간은 내경 3.7 mm인 경우 2400 mm, 내경 5.3 mm인 경우 3200 mm, 내경 6.8 mm인 경우 4000 mm이며, 가능한 일정 열유속 조건을 구현할 수 있도록 이음매 없는 관(seamless tube)을 사용하였다. 실험조건은 Table 1과 같다.

Table 1. Experimental conditions for evaporation heat transfer

| Refrigerant                          | R-1234yf                  |     |     |
|--------------------------------------|---------------------------|-----|-----|
| Test section                         | Horizontal stainless tube |     |     |
| Inner diameter of test section, [mm] | 3.7                       | 5.3 | 6.8 |
| Heat Flux, [kW/m <sup>2</sup> ]      | 5, 10, 15                 |     |     |
| Mass Flux, [kg/m <sup>2</sup> s]     | 200 ~ 500                 |     |     |
| Saturation Temperature, [°C]         | 5, 10, 15                 |     |     |
| Pressure [bar]                       | 3.73, 4.38, 5.10          |     |     |
| Quality, [-]                         | 0 ~ 1                     |     |     |

## 2.2 데이터 정리

수평관 내를 유동하는 이상류의 압력강하는 증력의 성분을 무시하므로, 운동량에 의한 압력강하  $\Delta P_m$ 와 마찰에 의한 압력강하  $\Delta P_f$ 의 합  $\Delta P_t$ 으로 식 (1)과 같다.

$$\Delta P_t = \Delta P_m + \Delta P_f \quad (1)$$

압력강하 상관식들은 균질유동과 분리유동으로 가정하여 분석할 수 있다. 균질 유동모델은 열역학적 평형상태에서 기상과 액상의 속도가 동일하다고 가정한다. 대부분의 경우, 이러한 가정의 유동모델을 적용하기 곤란하지만, 이상류 압력강하를 예측하는데 있어서 좋은 일치를 보인다. 따라서, 균질유동 모델은 기상과 액상의 유동을 단상으로 취급하고, 적절한 평균 물성치를 사용하여 운동량 압력강하를 아래의 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_m = G^2 \left\{ \left[ \frac{(1-x)^2}{\rho_l(1-\alpha)} + \frac{x^2}{\rho_v\alpha} \right]_{out} - \left[ \frac{(1-x)^2}{\rho_l(1-\alpha)} + \frac{x^2}{\rho_v\alpha} \right]_{in} \right\} \quad (2)$$

여기서  $G$ 는 액체와 기체의 총 질량유속이고  $x$ 는 증기 건도이다. 본 연구에서 기공률  $\alpha$ 는 균질유동 모델에 대해 정확한 예측이 가능한 수평관에서 Rouhani-Axelsson 드리프트 플렉스 모델의 Steiner [7]버전을 사용하였다.

냉매의 건도  $x$ 는 다음의 식 (3)과 같이 계산할 수 있으므로, 이에 따라 증발기 소구간의 출구 건도  $x_{loc,out}$ 는 식 (4)로 계산한다.

$$x = \frac{\Delta i_{loc}}{i_{lv}} \quad (3)$$

$$x_{loc,out} = x_{in} - \frac{\pi \cdot d_i}{M_e \cdot i_{lv}} \cdot \int_{z_{in}}^{z_{out}} q_e dz \quad (4)$$

여기서,  $\Delta i_{loc}$ 는 소구간 입출구에서의 냉매 엔탈피차이며,  $i_{lv}$ 는 냉매의 잠열이다. 또  $d_i$ 는 관 내경이고,  $M_e$ 는 냉매 유량이다. 그리고  $z_{in}$ 과  $z_{out}$ 는 소구간의 입구와 출구를 나타내며,  $q_e$ 는 증발기에서의 열유속 이므로,  $\pi \cdot d_i \int_{z_{in}}^{z_{out}} q_e dz$ 는 열교환기 입구에서부터 소구간의 열량을 누계한 값이다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 포화온도의 영향

Fig. 3은 수평관 내 R-1234yf의 증발과정 중에 발생하는 압력강하를 포화온도의 변화에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 전체 건도 영역에서 R-1234yf의 포화온도가 증가할수록 압력강하는 감소하는데, 그 이유는 R-1234yf의 포화온도가 증가함에 따라 기상과 액상에 대한 밀도비( $\rho_l / \rho_v$ )와 점성계수비( $\mu_l / \mu_v$ )가 각각 약 27% 및 15%정도 감소하기 때문이다. 따라서, 포화온도가 증가할수록 낮은 밀도비와 점성계수비는 슬립비(기상/액상의 속도)를 감소시키고 결과적으로 마찰 압력강하를 감소시킨다. 이러한 결과는 관 직경의 변화와 상관없이 동일하게 나타났다.

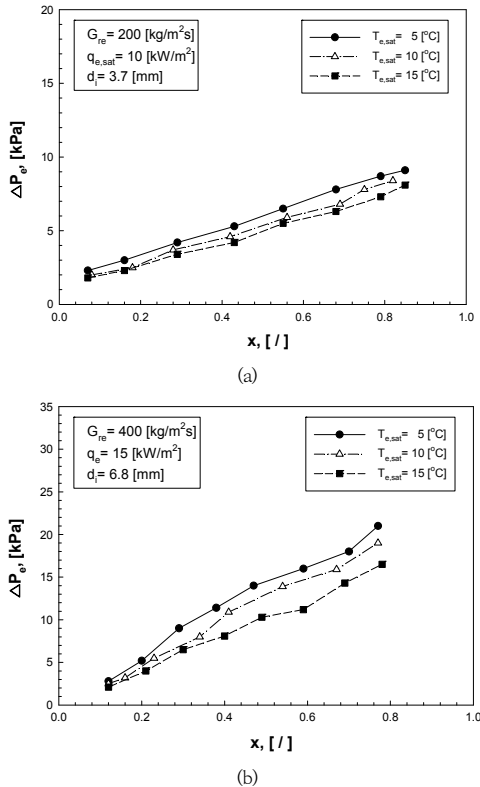


Fig. 3. Variation of experimental pressure drop with different saturation temperature for constant mass and heat fluxes.

(a)  $G_{re} = 200$  [kg/m²s],  $q_e = 10$  [kW/m²],  $d_i = 3.7$  [mm]

(b)  $G_{re} = 400$  [kg/m²s],  $q_e = 15$  [kW/m²],  $d_i = 6.8$  [mm]

#### 3.2 열유속의 영향

Fig. 4는 증발관 내 R-1234yf의 국소 압력강하를 열유속 변화에 따라 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 열유속이 증가할수록 압력강하는 증가하는 경향을 보이는데, 특히 관경이 작아질수록 압력강하는 더 많이 증가하였다. 이는 열유속이 증가하면서 저건도 영역에서는 관벽에서 발생하는 기포의 생성이 활성화되고, 유동교란이 증가되기 때문으로 판단된다. 그리고, 고건도 영역에서는 기상의 속도가 증가하여 환상류의 액막 두께가 감소한 후 소멸되어 기상과 관벽 사이의 압력강하가 증가하는 것으로 판단된다.

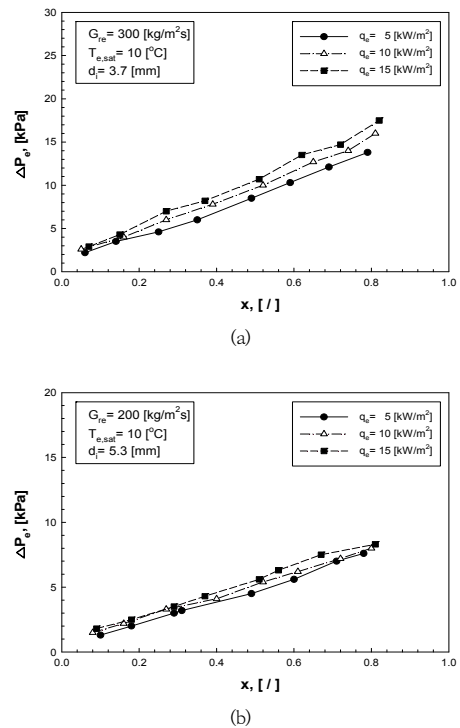


Fig. 4. Variation of experimental pressure drop with different heat fluxes for constant mass flux and saturation temperature.

(a)  $G_{re} = 300$  [kg/m²s],  $T_{e,sat} = 10$  [°C],  $d_i = 3.7$  [mm]

(b)  $G_{re} = 200$  [kg/m²s],  $T_{e,sat} = 10$  [°C],  $d_i = 5.3$  [mm]

#### 3.3 질량유속의 영향

Fig. 5는 R-1234yf의 국소 압력강하에 대한 질량유속 변화의 영향을 나타낸 것이다. 모든 관경에 대해 R-1234yf의 질량유속이 클수록 압력강하가 커지는데, 특히 압력강하는 슬러그 유동의 저건도 보다는 환상류

유동의 고건도에서 질량유속에 대한 압력강하의 증가폭이 커진다. 이는 고건도에서 발생하는 환형류 유동에서 질량유속의 증가는 액상과 기상 속도 사이의 슬립 비율을 높이고, 그 결과 기액 경계면에서 마찰이 증가하기 때문에 동일한 고건도에서 질량유속이 증가할수록 압력강하가 증가한다.

또한, 압력강하 곡선의 기울기의 증가 ( $x < 0.8$ )는 질량유속의 증가에 비례한다. 압력강하 최대치는 임계 건도로 알려진 약 0.8에서 발생한다. 이 현상은 질량유속이 증가함에 따라 더욱 분명해진다. 이러한 결과에 대해서 Pabon 등[8]도 동일한 연구 결과를 발표하였다.

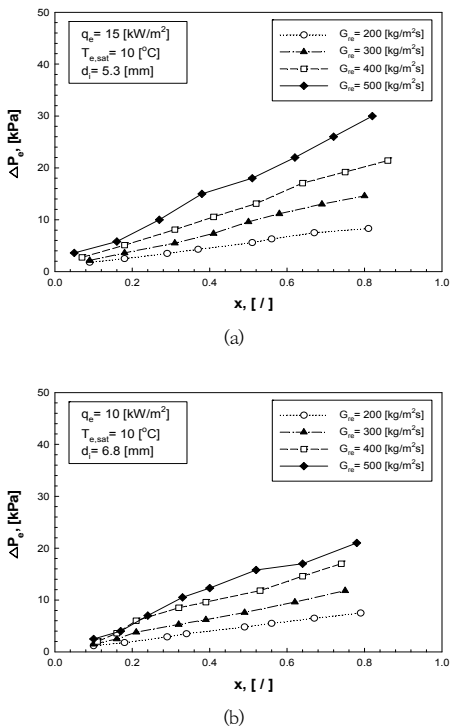


Fig. 5. Variation of experimental pressure drop with different mass fluxes for constant heat flux and saturation temperature.

(a)  $q_e = 10$  [kW/m<sup>2</sup>],  $T_{e,sat} = 10$  [°C],  $d_i = 5.3$  [mm],

(b)  $q_e = 10$  [kW/m<sup>2</sup>],  $T_{e,sat} = 10$  [°C],  $d_i = 6.8$  [mm]

### 3.4 관경의 영향

Fig. 6은 수평관 내 R-1234yf 냉매의 압력강하에 대한 관직경의 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 관직경이 감소할수록 압력강하는 증가한다. 즉, 건도 0.8 및 질량유속 200, 400 kg/m<sup>2</sup>s 조건에서 관직경이

6.8 mm에서 3.7 mm로 감소하면 압력강하는 약 28 % 증가한다. Kandlikar[9]는 대규경관인 경우 중력이 지배적이지만 소규경관인 경우 관성력과 표면장력이 지배적이라고 보고하였다. 즉, 관직경이 감소할수록 더 낮은 건도에서 슬러그류에서 환상류로 천이가 발생하여 압력강하는 증가한다. Ong와 Thome[10]은 Convection number인  $Co$ 로 R-134a를 가시화하여  $Co < 0.34$ 인 경우 소규경관,  $Co > 0.34$  경우에는 대규경관이라고 제안하였고, 이 임계 직경은 냉매의 종류에 따라 다르다고 하였다. 그리고, R-1234yf의 경우 포화온도 30°C와 20°C에서 각각 2.19 mm와 2.36 mm로 추정하였다. 따라서, 다양한 실험범위와 관경에서 소규경관과 대규경관을 구분하는 무차원 변수를 찾기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

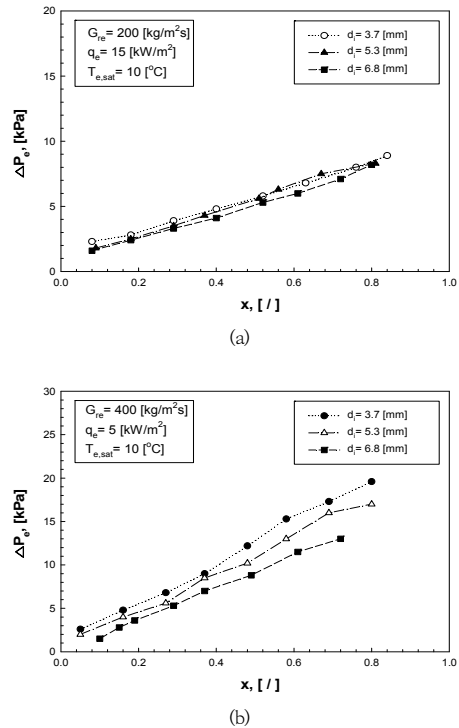


Fig. 6. Variation of experimental pressure drop with different diameter tubes for constant heat flux and saturation temperature.

(a)  $G_{re} = 200$  [kg/m<sup>2</sup>s],  $q_e = 15$  [kW/m<sup>2</sup>],  $T_{e,sat} = 10$  [°C],

(b)  $G_{re} = 400$  [kg/m<sup>2</sup>s],  $q_e = 15$  [kW/m<sup>2</sup>],  $T_{e,sat} = 10$  [°C]

#### 4. 압력강하 상관식과 비교

수평관 내를 유동하는 이상류의 압력강하는 마찰에 의한 압력강하와 운동량에 의한 압력강하의 합으로 나타난다. 하지만 운동량에 의한 압력강하는 마찰에 의한 압력강하에 비해 대단히 작으므로 대부분 무시한다. 식은 다음과 같다.

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{tp} = \left(\frac{dP}{dz}\right)_f + \left(\frac{dP}{dz}\right)_a \quad (5)$$

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{tp} \approx \left(\frac{dP}{dz}\right)_f \quad (6)$$

실질적인 압력강하 상관식들은 균질유동과 분리유동으로 가정하여 분석할 수 있다. 균질유동모델은 열역학적 평형상태에서 기상과 액상의 속도가 동일하다고 가정한다. 대부분의 경우, 이러한 가정의 유동모델을 적용하기 곤란하지만, 이상류 압력강하를 예측하는데 있어서 좋은 일치를 보인다. 따라서, 균질유동모델은 기상과 액상의 유동을 단상으로 취급하고, 적절한 평균물성치를 사용하여 운동량 압력강하를 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_a = -G_{re}^2 \left[ \frac{x^2}{\alpha \cdot \rho_v} + \frac{(1-x)^2}{\alpha \cdot \rho_l} \right] \quad (7)$$

본 논문에서는 Tandon 등[11]의 보이드율 상관식을 적용하여 계산하였고, 그 상관식들은 다음과 같고  $X_{tt}$ 는 Lockhart - Martinelli parameter이다.

1)  $50 < Re < 1,125$ 인 경우

$$\alpha = \left[ 1 - 1.928 \cdot \frac{Re_l^{-0.315}}{F(X_{tt})} + 0.9293 \cdot \frac{Re_l^{-0.63}}{F(X_{tt})^2} \right] \quad (8)$$

2)  $Re \geq 1,125$ 인 경우

$$\alpha = \left[ 1 - 0.38 \cdot \frac{Re_l^{-0.088}}{F(X_{tt})} + 0.0361 \cdot \frac{Re_l^{-0.173}}{F(X_{tt})^2} \right] \quad (9)$$

여기서  $F(X_{tt})$ 와  $X_{tt}$ 는 아래의 식으로 계산한다.

$$F(X_{tt}) = 0.15 \cdot \left[ \frac{1}{X_{tt}} + \frac{2.85}{X_{tt}^{0.476}} \right] \quad (10)$$

일반적인 수평관에서 증발과 같은 상변화를 동반하는 경우에는 분리류 모델을 사용하고 있다.

$$X_{tt} = 0.15 \cdot \left[ \left( \frac{1-x}{x} \right)^{0.9} + \left( \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.5} + \left( \frac{\mu_l}{\mu_v} \right)^{0.1} \right] \quad (11)$$

따라서 Fig. 7에서는 분리류 모델 중에서 많이 적용되는 Choi와 Domanski[12]의 상관식과 비교한 결과 각 평균 오차 -15.3%이고, 절대 평균 오차는 12.1%로 가장 좋은 일치를 나타내었다. Fig. 8은 R-1234yf 냉매에 적용 가능한 Xu-Fang[13]의 상관식과 비교한 값으로 평균 오차 -21.3%, 절대 평균 오차는 19.5%로 좋은 일치를 보였다.

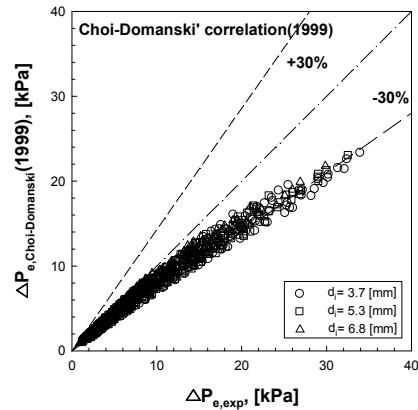


Fig. 7. Comparison of measured pressure drop data with those predicted by Choi-Domanski' correlation.

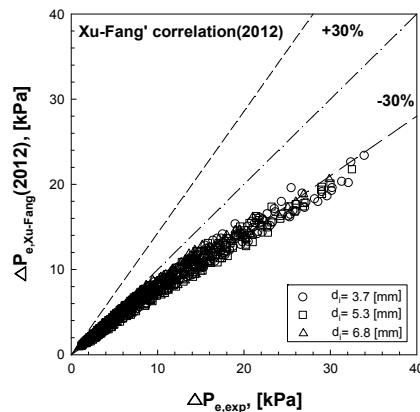


Fig. 8. Comparison of measured pressure drop data with those predicted by Xu-Fang' correlation

## 5. 결론

본 장에서 R-1234yf를 이용한 냉동-공조 시스템용 열교환기의 최적 설계를 위해서 R-1234yf 냉매의 증발과 정 중 압력강하 특성에 대해서 실험한 결과, 다음과 같이 정리하였다.

- (1) 압력강하는 전체 진도 영역에서 R-1234yf의 포화온도가 증가할수록 감소하는데, 그 이유는 R-1234yf의 포화온도가 증가함에 따라 기상과 액상에 대한 밀도비( $\rho_l / \rho_v$ )와 점성계수비( $\mu_l / \mu_v$ )가 각각 약 27 % 및 15 %정도 감소하기 때문이다.
- (2) 또한, 열유속이 증가할수록 압력강하는 증가하는 경향을 보였다. 이는 모든 관경에 대해 R-1234yf의 질량 유속이 클수록 압력강하가 커지는데, 특히 압력강하는 슬러그 유동의 저진도 보다는 환상류 유동의 고진도에서 질량유속에 대한 압력강하의 증가 폭이 커졌다.
- (3) 관경은 감소할수록 압력강하가 증가하였다. 내경 3.7 mm, 5.3 mm, 6.8 mm 관 내 R-1234yf의 증발 압력강하와 타 상관식으로 예측한 값을 비교한 결과, Choi와 Domanski[12]의 상관식과의 평균오차는 -15.3%이고, 절대 평균오차는 12.1%로 가장 좋은 일치를 나타내었다. 그리고, R-1234yf 냉매에 적용 가능한 Xu와 Fang[13]의 상관식과도 평균 오차는 -21.3%이고, 절대 평균 오차는 19.5%로 좋은 일치를 보였다.
- (4) 이러한 결과를 통해 관경 변화에 따른 R-1234yf의 증발 압력강하에 관한 실험적 연구는 증발기 최적 설계에 기초자료로 활용할 수 있을 것이라고 판단된다.

## References

- [1] M. C. Lu, J. R. Tong, C. C. Wang, "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, Oct. 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.06.004>
- [2] A. Diani, S. Mancini, L. Rossetto, "Flow boiling heat transfer of R1234yf inside a 3.4 mm ID microfin tube", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 66, pp. 127-136, Sep. 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.03.019>
- [3] Z. Anwar, B. Palm, R. Khodabandeh, "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, Sep. 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.03.021>
- [4] C. Y. Yang, H. Nalbandian, F. C. Lin, "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, Jun. 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.161>
- [5] J. T. Oh, K. I. Choi, C. B. Nguyen, K. W. Kim, "Boiling Heat Transfer of R-1234yf in Horizontal Circular Small Tubes", *INTERNATIONAL REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING CONFERENCE*, Purdue university, USA, Paper 1296, March 2012.
- [6] D. Del Col, S. Bortolin, D. Torresin, A. Cavallini, "Flow boiling of R1234yf in a 1 mm diameter channel", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 36, No. 2, pp. 353-362, Mar. 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iirefrig.2012.10.026>
- [7] D. Steiner, *VDI-Wärmeatlas (VDI Heat Atlas)*, Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GCV), Düsseldorf, Chapter Hbb, 1993.
- [8] J. G. Pabon, A. Khosravi, R. Nunes, L. Machado, "Experimental investigation of pressure drop during two-phase flow of R1234yf in smooth horizontal tubes with internal diameters of 3.2 mm to 8.0 mm", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 104, pp. 426-436, Aug. 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iirefrig.2019.05.019>
- [9] S. G. Kandlikar, W. J. Grande, "Evolution of microchannel flow passages-thermohydraulic performance and fabrication technology", *Heat Transfer Engineering*, Vol. 24, No. 1, pp. 3-7, 2003.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/01457630304040>
- [10] C. L. Ong, J. R. Thome, "Macro-to-microchannel transition in two-phase flow: Part 1 - Two-phase flow patterns and film thickness measurements", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 35, No. 1, pp. 37-47, Jan. 2011.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2010.08.004>
- [11] T. N. Tandon, H. K. Varma, C. P. Gupta, "A void fraction model for annular two-phase flow", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 28, No. 1, pp. 191-198, Jan. 1985.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(85\)90021-3](https://doi.org/10.1016/0017-9310(85)90021-3)
- [12] J. Y. Choi, M. A. Kedzierski, P. A. Domanski, A Generalized pressure drop correlation for evaporation and condensation of alternative refrigerants in smooth tube and micro-fin tube, Internal Report, NIST Interagency, USA, pp. 7-15.  
DOI: <https://doi.org/10.6028/nist.ir.6333>
- [13] Y. Xu, X. Fang, "A new correlation of two-phase

frictional pressure drop for evaporating flow in pipes", International Journal of Refrigeration. Vol. 35, pp. 2039-2050, Nov. 2012.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iirefrig.2012.06.011>

---

윤 정 인(Jung-In Yoon)

[정회원]



- 1990년 2월 : 부경대학교 냉동공조공학과 (냉동공조공학과석사)
- 1995년 2월 : 도쿄대학교 에너지시스템학과(에너지시스템박사)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 부경대학교 냉동공조공학과 교수
- 2013년 3월 ~ 현재 : 한국동력기계공학회 편집위원장, 부회장

<관심분야>

냉동, 에너지시스템공학

---

설 성 훈(Sung-Hoon Seol)

[정회원]



- 2017년 2월 : 부경대학교 냉동공조공학과 (냉동공조공학과석사)
- 2020년 8월 : 홋카이도대학교 기계공학열유체학과 (기계공학열유체박사)
- 2021년 3월 ~ 현재 : 부경대학교 냉동공조공학과 교수

<관심분야>

냉동, 공기조화, 흡착식 히트펌프

---

이 준 혁(Joon-Hyuk Lee)

[정회원]



- 2019년 2월 : 부경대학교 냉동공조공학과 (석사)
- 2019년 3월 ~ 현재 : 부경대학교 냉동공조공학과 (냉동공조공학박사수료)

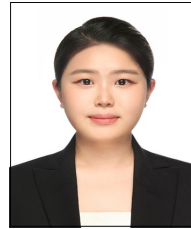
<관심분야>

냉동, 냉동시스템

---

박 은 민(Eun-Min Park)

[준회원]



- 2020년 3월 ~ 현재 : 부경대학교 냉동공조공학과 (냉동공조공학과 석사과정)

<관심분야>

냉동, 냉동시스템

---

하 수 정(Soo-Jeong Ha)

[정회원]



- 2003년 2월 : 부경대학교 냉동공조공학과 (냉동공조공학과석사)
- 2005년 2월 : 부경대학교 냉동공조공학과 (냉동공조공학과박사수료)
- 2010년 4월 ~ 2019년 2월 : 부경대학교 산학 과학 기술 연구소 책임연구원
- 2020년 3월 ~ 현재 : 한국폴리텍대학 충주캠퍼스 에너지설비과 교수

<관심분야>

해양 온도차 발전, 진동 세관형 히트파이프, 열교환기