

Wilson Plot Method를 이용한 Plate Fin Heat Exchanger 단상 열전달 특성 Single-phase Heat Transfer Performance Characteristics of Plate Fin Heat Exchanger Using Wilson Plot Method

윤지훈* · 박상찬* · 설성훈* · 손창효* · 윤정인*†

Ji-Hoon Yoon*, Sang-Chan Park*, Sung-Hoon Seol*, Chang-Hyo Son*
and Jung-In Yoon*†

(Received 22 November 2022, Revision received 27 December 2022, Accepted 03 January 2023)

초록 : 플레이트 핀 열교환기(PFHE)는 다양한 산업분야에서 수요가 증가하고 있는 추세이며 특히 가스액화 공정과 같은 초저온 산업에 많이 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 PFHE에 대한 기초 연구의 일환으로 실험과 시뮬레이션을 통해 PFHE의 성능을 비교하였다. 실험적으로 PFHE의 대류 열전달 계수를 산출하기 위하여 윌슨 플롯 방법을 이용하였으며, 각 핀 높이(3 mm, 6.4 mm)에 대하여 다양한 레이놀즈 수 범위에서 총괄 열전달계수와 대류 열전달계수를 산출하였다. 결과적으로 총괄 열전달계수와 대류 열전달계수 모두 실험적으로 산출한 결과값이 높게 도출되었으며 이는 시뮬레이션 상에서 분배면에서 생기는 열전달을 무시하기 때문으로 사료된다.

키워드 : 열전달, 열교환기, 플레이트 핀 열교환기, 윌슨 플롯 방법

Abstract : The purpose of this study is to compare the heat transfer performance between the experiment and HTRI, which is single-phase heat transfer in the plate fin heat exchanger (PFHE). To investigate the thermal performance of PFHE, convection heat transfer coefficients were estimated by the Wilson plot method for each fin height (3 mm, 6.4 mm). Convection and overall heat transfer coefficients were investigated with various reynolds numbers. The results show that the convection heat transfer coefficients obtained by the experiment were higher than those of HTRI. Furthermore, the overall heat transfer coefficients were higher than those of HTRI.

Key Words : Heat Transfer, Heat Exchanger, PFHE (Plate Fin Heat Exchanger), Wilson Plot Method

*† 윤정인(<https://orcid.org/0000-0002-1099-3435>) : 교수, 부경대학교 냉동공조공학전공

E-mail : yoonji@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6180

*윤지훈(<http://orcid.org/0000-0003-3610-6344>), *박상찬(<https://orcid.org/0000-0002-6153-9793>) : 대학원생, 부경대학교 냉동공조공학전공

*설성훈(<https://orcid.org/0000-0001-9724-9707>) : 조교수, 부경대학교 냉동공조공학전공

*손창효(<https://orcid.org/0000-0002-2143-0515>) : 교수, 부경대학교 냉동공조공학전공

*† Jung-In Yoon(<https://orcid.org/0000-0002-1099-3435>) :

Professor, Major of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.

E-mail : yoonji@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6180

*Ji-Hoon Yoon(<https://orcid.org/0000-0003-3610-6344>),

*Sang-Chan Park(<https://orcid.org/0000-0002-6153-9793>) : Graduate student, Major of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.

*Sung-Hoon Seol(<https://orcid.org/0000-0001-9724-9707>) : Assistant Professor, Major of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.

*Chang-Hyo Son(<https://orcid.org/0000-0002-2143-0515>) : Professor, Major of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.

— 기 호 설 명 —

Q	: 열전달율 [kW]
R	: 열저항 [$\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{kW}$]
U	: 총괄 열전달계수 [$\text{kW}/\text{m}^2\cdot\text{K}$]
T	: 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
k	: 열전도율 [$\text{kW}/\text{m}\cdot\text{K}$]
A	: 전열 면적 [m^2]
m	: 질량 유량 [kg/s]
D_h	: 수력직경 [m]
Re, Pr	: 레이놀즈 수, 프란틀 수 [-]
LMTD	: 대수평균온도차 [$^{\circ}\text{C}$]
C_1, C_2	: 상수 [-]
H, L, W, t	: 높이, 길이, 폭, 두께 [mm]

그리스 문자

Δ	: 차
α	: 대류 열전달계수 [$\text{kW}/\text{m}^2\cdot\text{K}$]

하첨자

h, c	: 고온측, 저온측
cond, ov	: 전도, 통합

1. 서 론

최근 세계적으로 환경문제에 대응하여 세계 각국에서는 2050년 탄소중립을 목표로 정책을 추진하고 있으며, 국내의 경우 배출되는 온실가스 감축을 2030년에 2018년 대비 40% 감축하는 것을 목표로 하고 있다.¹⁾ 이를 해소하기 위한 방안으로 에너지를 이용하는 분야의 고효율화에 대한 관심이 높아지고 있다. 열교환기는 에너지를 이용하는 다양한 산업분야에서 적용되고 있기 때문에 열교환기의 고효율화는 탄소중립과 에너지 절약 실현할 수 있는 수단으로 판단된다. 다양한 종류의 열교환기 중 Plate Fin Heat Exchanger(PFHE)는 타 열교환기에 비해 체적 대비 넓은 열전달 면적을 가지고 있어 소형화 및 경량화가 가능하다는 장

점을 가지고 있으며, 3가지 이상의 유체를 사용할 수 있다는 특징이 있다. 또한 사용자의 목적 및 목표 성능에 따라 Plain, Serrated, Wavy, Perforated Fin 등 여러 가지 형상의 핀이 존재하여 설계하고자 하는 상황에 맞게 유동적인 설계가 가능하다. 이와 같은 장점을 바탕으로 PFHE는 초저온 분야, HVAC, Aircraft 등 여러 분야에 이용되며 그 수요가 증가하는 추세이다. 특히 높은 압력과 낮은 온도에서도 문제없이 사용할 수 있다는 장점으로 인하여 수소나 천연가스 액화와 같은 극저온 분야에서 주목을 받고 있다.

한편, PFHE의 전열 특성에 대한 다양한 연구가 수행되고 있다. Yoo 등²⁾은 LNG FPSO 액화공정에서 사용되는 PFHE의 응축 열전달 성능에 대한 시뮬레이션과 실험을 수행하였으며, 그 결과 Serrated, Wavy, Plain fin 순서로 국소 열전달계수가 높다고 보고하였다. Lee 등³⁾은 상용 소프트웨어 Ansys CFX를 이용하여 알루미늄 PFHE에서 분배기의 형상에 따른 분배 특성에 대한 해석적 연구를 수행하였으며 각 형상비와 입구 레이놀즈수 조건이 분배 특성에 미치는 영향에 대해 고찰하였다. Son⁴⁾ 등은 Plain fin을 이용한 PFHE에서 R-1234yf의 비등 열전달 특성에 대해 실험적으로 연구하였으며 열유속, 포화온도, 평균건도가 열전달 성능에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

현재까지 다양한 상황에서 PFHE의 열전달 성능에 대한 연구가 수행되어 왔다. 그러나 실제 설계에서 이용되는 상용 설계 소프트웨어와 실험데이터를 비교한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 상용 소프트웨어인 HTRI를 이용하여 PFHE의 단상 열전달 특성에 대해 실험 결과와 시뮬레이션 결과에 대한 분석을 수행하였다.

2. PFHE의 단상 열전달 실험 및 시뮬레이션

2.1 PFHE의 개요

Fig. 1은 PFHE의 내부 구조를 나타내고 있으며, Fig. 2는 본 연구에서 사용한 PFHE의 형상을 나타내고 있다. PFHE는 크게 분배부와 전열부로 나눌

수 있으며, 헤더를 통해 열교환기로 유입된 유체가 분배부를 통해 각 채널로 분배되고 전열부에서 판과 판 사이를 유체가 흐르며 열교환을 하게 된다. 판과 판 사이에는 전열면적과 열전달 효과를 증대시키기 위한 핀이 설치되어 있다. 본 연구에서 사용한 PFHE는 알루미늄 재질의 열교환기이며 열교환기의 높이, 길이, 너비는 각각 66.18 mm, 244 mm, 124 mm이다. 분배부를 제외한 전열부의 길이, 높이를 유효 길이(Effective length), 유효 너비(Effective width)라고 부르며, 본 연구에서는 각각 80 mm, 40 mm이다. 본 실험에서는 핀 높이가 다른 2개의 열교환기(3 mm, 6.4 mm)를 사용하였다. Table 1은 본 연구에서 사용한 PFHE의 기하학적 형상 정보를 요약한 것이다.

Table 1 Geometric dimensions of the PFHE

Parameter	Value	Unit
PFHE H	66.18	mm
PFHE L	244	mm
PFHE W	124	mm
Effective L	80	mm
Effective W	40	mm
Fin type	Plain fin	-
Fin H	6.4, 3	mm
Fin t	0.5	mm
Fin frequency (Fin per inch)	19	-
Flow path W	0.84	mm
D_h	1.47(6.4 mm) 1.25(3 mm)	mm

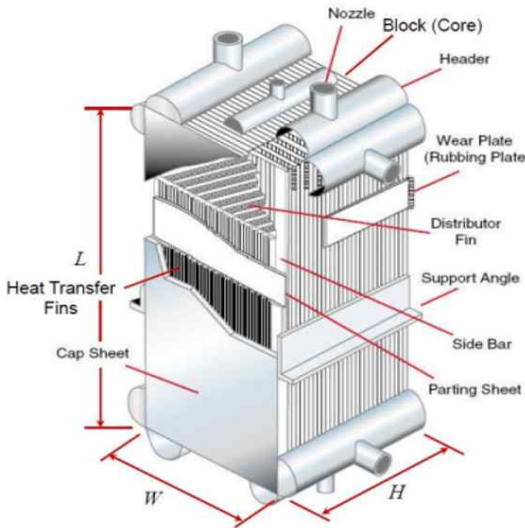


Fig. 1 Schematic diagram of PFHE

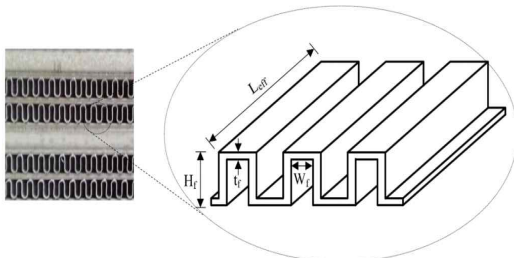


Fig. 2 Shape of PFHE fin

2.2 단상 열전달 실험장치

Fig. 3은 본 연구에서 사용한 열전달 실험 장치의 개략도를 나타내고 있으며, Fig. 4는 실험장치의 사진을 나타내고 있다. 서로 온도가 다른 두 개의 물 라인으로 구성되어 있으며, 펌프를 이용한 강제 순환식 사이클이다. 각 라인에서 물의 유량을 측정하기 위하여 수유량계(한국후로우)를 사용하였으며, 열교환기 입출구의 온도와 압력을 측정하기 위하여 T타입 열전대(T-type thermocouple)와 압력센서(Sensys)를 설치하였다. 각 라인에서 물의 온도는 항온조를 통해서 조절하였으며 열교환기에서 열전달량은 수유량계에서 측정된 유량과 열교환기 입출구 온도차이를 이용하여 계산하였다. 각 센서의 데이터는 데이터로거(Yokogawa, GM10)를 통해 PC로 실시간으로 저장하였다.

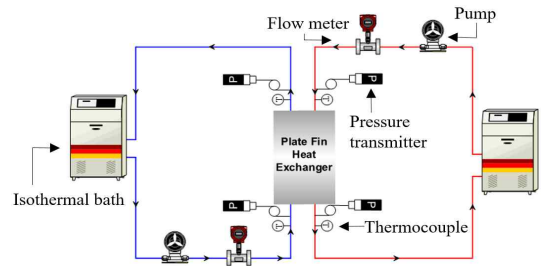


Fig. 3 Schematic diagram of heat transfer experiment equipment

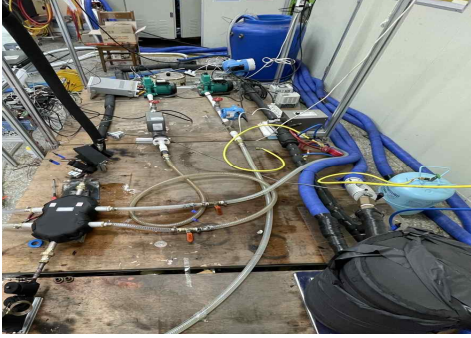


Fig. 4 Photo of experimental apparatus

2.3 실험방법

본 실험에서 저온측 물의 입구 온도는 $11(\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 로 설정하였고, 고온측 물의 입구 온도는 $23(\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 로 설정하였다. 펌프에 연결된 인버터와 물라인에 설치된 밸브를 통해 유량을 조절하였으며, 열전대의 온도편차가 0.2°C 이하, 유량의 변화가 2% 이내가 되면 정상상태로 판단하였다.⁵⁾ 정상상태에서 벗어나면 상단의 과정을 반복하였으며, 정상상태에 도달하면 10분 동안 3초 간격으로 데이터를 취득한 뒤 평균값을 사용하였다. 본 실험에서 레이놀즈수의 범위는 400~1,800으로 설정하였다.

2.4 시뮬레이션 방법

본 연구에서는 상용 열교환기 설계 프로그램인 HTRI를 이용하였다. HTRI에서 실험에서 사용한 열교환기의 형상정보와 수력학적 조건을 적용하였으며 물성치 패키지는 Refprop를 사용하였다. HTRI를 통해 실험조건과 동일한 레이놀즈수 범위에서 대류 열전달계수와 총괄 열전달계수를 산출하였다.

2.5 단상열전달 특성 분석 방법

본 연구에서 사용한 PFHE는 내부 판 벽의 온도를 측정할 수 없기 때문에 뉴턴의 냉각법칙을 통해서 대류 열전달계수를 직접적으로 계산하기 어렵다. 이러한 경우 Wilson plot method를 통해서 판 벽의 온도를 잴 수 없는 상황에서도 대류 열전달계수를 구할 수 있다.⁶⁾ 유체의 대류 열전달계수는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\alpha_c = \frac{k_c}{D_h} C_1 Re_c^n Pr_c^{1/3} \quad (1)$$

열전달량은 앞서 언급한 바와 같이 유체의 질량 유량과 입출구 온도차를 통해 식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T \quad (2)$$

$$Q = U \times A \times LMTD \quad (3)$$

한편, 총괄 열저항은 총괄 열전달계수의 역수로 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{ov} = R_h + R_{cond} + R_c \quad (4)$$

고온측 물의 유량이 일정한 경우 고온측 대류 저항과 전도 저항을 식 (5)과 같이 일정하다고 가정할 수 있으며, 따라서 총괄 열저항은 식 (6)과 같이 정리할 수 있다.

$$R_h + R_{cond} = C_2 \quad (5)$$

$$R_{ov} = \frac{1}{U} = \frac{1}{C_1} \times \frac{1}{\frac{k_c}{D_h} Re_c^n Pr_c^{1/3}} + C_2 \quad (6)$$

식 (6)은 식 (7), (8)와 같이 총괄 열저항을 y 값, C_1 의 역수를 기울기, C_2 는 y 절편으로 갖는 1차 함수로 표현할 수 있다.

$$y_1 = \frac{1}{C_1} \times x_1 + C_2 \quad (7)$$

$$y_1 = \frac{1}{U}, \quad x_1 = \frac{1}{\frac{k_c}{D_h} Re_c^n Pr_c^{1/3}} \quad (8)$$

식 (9)에서 Re 수의 지수인 n 은 미지수이기 때문에 n 을 결정하기 위한 추가적인 과정이 필요하다.

식 (9)를 Re 에 대해서 정리하면 식 (10), 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{1}{U} - C_2\right) \times \left(\frac{k_c}{D_h} Pr_c^{\frac{1}{3}}\right) = \frac{1}{C_1 Re_c^n} \quad (9)$$

$$y_2 = \frac{1}{C_1 Re_c^n} \quad (10)$$

식 (10)에서 양변에 로그를 취하면 식 (10)의 우변은 식 (11)와 같이 표현할 수 있다.

$$\ln(y_2) = -\ln(C_1) - n \times \ln(Re_c) \quad (11)$$

$$Y_2 = \ln(y_2), \quad X_2 = \ln(Re_c) \quad (12)$$

$$Y_2 = -n \times X_2 - \ln(C_1) \quad (13)$$

식 (12), (13)에서 나타나듯 식 (11)은 $-n$ 을 기울기, $\ln(Re_c)$ 를 x 값, $\ln(y_2)$ 를 y 값, $-\ln(C_1)$ 을 y 절편으로 갖는 1차 함수임을 알 수 있다. 정리하자면 다음과 같은 과정을 통해 물측 대류 열전달 계수를 계산할 수 있다.

- 1) 고온측 유량을 고정한 상태에서 저온측 유량을 변화시켜 가며 Re 수를 변화시킨다.
- 2) 각 Re 수에서의 U 를 계산하고 선형회귀분석을 통해 식 (8)에서 C_1 과 C_2 를 구한다. 여기서 n 은 미지수이기 때문에 임의의 수로 가정하고 시작한다.
- 3) n 을 수정하기 위해 각 Re 수에서의 C_2 , U 값을 이용하여 선형회귀분석을 통해 n 을 계산한다.
- 4) 가정한 n 값과 계산된 n 값이 가까워질 때 까지 2번, 3번 과정을 반복한다.
- 5) n 값이 정해지면 식 (1)에서 C_1 과 n 을 대입하여 물측 대류 열전달 상관식을 만든다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 5는 레이놀즈수 변화에 따른 대류 열전달 계수의 변화를 나타내고 있으며, 실험을 통해 도출된 대류 열전달계수와 상용 프로그램인 HTRI를 이용하여 도출한 대류 열전달계수를 비교하고 있다. 레이놀즈수가 높아질수록 실험값과 시뮬레이션값의 차이가 벌어졌으며, 모든 구간에서 실험을 통하여 도출된 열전달계수가 높은 값을 가지는

경향을 보였다. 이는 실제 열교환기에서는 분배부에서도 온도차로 인하여 열전달이 일어나지만 HTRI에서는 분배부에서 일어나는 열전달을 무시하였기 때문에 판단된다. 핀의 높이가 3 mm인 경우가 6.4 mm인 경우에 비하여 대류 열전달계수가 높게 나오는 경향을 보였다. 이는 핀 높이가 낮아짐에 따라 좁아진 유로로 인해 열전달이 촉진되었기 때문으로 사료된다.

Fig. 6은 레이놀즈수 변화에 따른 총괄 열전달 계수의 변화를 나타내고 있다. Fig.5에서 나타난 결과와 유사하게 실험에서 도출된 값이 HTRI를 통하여 도출된 값보다 높은 경향을 보인다. 이는 총괄 열전달계수가 대류 열전달계수에 대한 함수

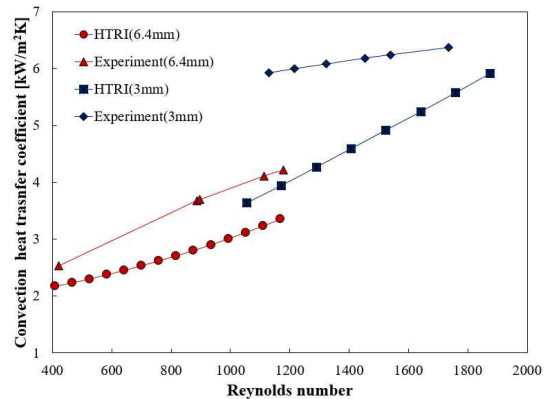


Fig. 5 Comparison of heat transfer coefficient between experiment and HTRI

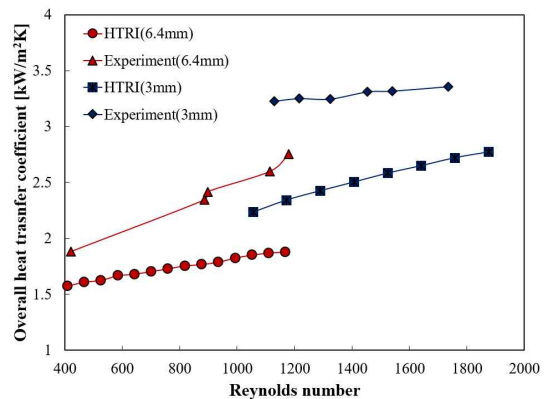


Fig. 6 Comparison of overall heat transfer coefficient between experiment and HTRI

이기 때문에 사료된다. 총괄 열전달계수는 대류 열전달계수에 비해 실험값과 HTRI값의 차이가 적게 나타나는 경향을 보였다. 이는 총괄 열전달계수가 두 유체의 대류 열전달계수 중 작은 열전달계수의 영향을 많이 받기 때문에 판단된다. 다시 말하자면 고온측 물의 유량을 고정하였기 때문에 저온측에 비해 유량이 낮아서 낮은 열전달계수값을 가지기 때문에 총괄 열전달계수에 영향을 미친 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 PFHE의 단상 열전달 특성을 HTRI 시뮬레이션 프로그램과 실험적인 방법을 통하여 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 실험을 통하여 도출된 대류 열전달계수가 HTRI를 통해 도출된 대류 열전달계수에 비해 높은 값을 가지는 경향을 보였다.
- 2) 실험값과 HTRI 값과의 차이는 총괄 열전달계수가 대류 열전달계수에 비해 적은 경향을 보였다.
- 3) HTRI 사용 시 해석의 정확도를 높이기 위하여 분배면에서 생기는 열전달을 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2021-2022년)에 의하여 연구되었음.

Author contributions

J. H. Yoon; Conceptualization, Writing-original draft. S. C. Park; Data curation, Software. S. H. Seol; Writing-review & editing, Visualization. C. H.

Son; Validation. J. I. Yoon; Investigation, Methodology, Supervision.

References

1. 2050 Carbon Neutrality Commission, 2021, 2050 Carbon neutrality scenarios.
2. S. I. Yoo, H. W. Kim, Y. K. Jung, J. I. Yoon, S. H. Park and C. S. Kim, 2010, "Heat Transfer Characteristics of Plate-fin Heat Exchanger Using LNG FPSO Liquefaction Process", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, 34(6), 144-153.
(<https://doi.org/10.5916/jkosme.2010.34.6.798>)
3. E. C. Lee, H. Kang, J. H. Heo, Y. C. Kim, J. H. Park and S. Y. Cho, 2011, "Numerical Study on the Distribution Characteristics of Aluminum Plate-Fin Heat Exchangers According to the Distributor Aspect Ratio", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, 35(8), 805-814.
(DOI:10.3795/KSME-B.2011.35.8.805)
4. C. H. Son, J. I. Yoon, S. H. Seol and D. I. Kang, 2021, "Flow Boiling Heat Transfer of HFO-1234yf in a Plate-fin Heat Exchanger with Plain Fins", Journal of Power System Engineering, 25(4), 87-92.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2021.25.4.087>)
5. AHRI, 2015 Standard for Performance Rating of Liquid to Liquid Heat Exchangers, 8.
6. J. F. Seara, F. J. Uhia, J. Sieres and A. Campop, 2005, "Experimental apparatus for measuring heat transfer coefficients by the Wilson plot method", European Journal of Physics, 26, 66-72.
(DOI:10.1088/0143-0807/26/3N01)