

R410A를 이용한 브레이징 타입 판형열교환기에서 물 측 유동방향에 따른 응축/증발 성능 평가

이 성 우, 정 영 만, 이 재 근[†], 이 동 혁^{*}

부산대학교 기계공학과, ^{*}LG 전자

An Experimental Study on Evaporation/Condensation Heat Transfer with Flow Direction in Brazed Plate Heat Exchanger using Refrigerant 410A

Sungwoo Lee, Youngman Jeong, Jaekeun Lee[†], Donghyuk Lee^{*}

School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

^{*}Digital Appliance Laboratory, LG Electronics, Gyeongnam 641-711, Korea

ABSTRACT: The plate heat exchanger(PHE) in heat pump has two flow streams of the refrigerant and water. The flow direction of the refrigerant, unlike that of water, can be changed by a 4-way valve depending on operating condition. Therefore the flow arrangement is a parallel flow for heating and a counter flow for cooling, respectively. In this study, the effects of the flow direction of the water on the heat transfer rate are investigated experimentally. The experiments are carried out for brazed plate heat exchangers under a parallel and counter flow conditions in evaporation and condensation. The experimental parameters in this study include the mass flux of the refrigerant 410A from 3 to 14 kg/m²s and the flow patterns for the pressure of PHE fixed at 0.97 and 2.46 MPa. The results show that both the heat transfer rate and frictional pressure drop across the PHE increase with the mass flux. The heat transfer rate of the refrigerant 410A for evaporation show great sensitivity to flow direction of the water. The heat transfer rate for evaporation with a counter flow are 5-30% higher than that with a parallel flow.

Key words: Plate heat exchanger(판형 열교환기), Flow direction(유동 방향), Heat pumps(히트펌프), Parallel flow(평행류), Counter flow(대향류)

기 호 설 명

A : 전열면적 [m²]
 b : 채널 간격 [m]

C_p : 정압비열 [kJ/kg K]
 G : 냉매 유속 [kg/m² s]
 H : 엔탈피 [kJ]
 I : 비가역성 [kJ]
 L : 수직 길이 [m]
 p : 평판 피치 [m]
 Q : 열전달률 [W]
 S : 엔트로피 [kJ/K]
 U : 총괄열전달계수 [W/m² °C]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-51-510-2455; fax: +82-51-582-6368

E-mail address: jklee@pusan.ac.kr

w : 평판 폭 [m]
 x : 건도

그리스 문자

β : 세브론 각 [radian]
 ψ : 개방시스템의 엑서지 [kJ]
 θ : 생성된 엔트로피 [kJ/K]
 ρ : 밀도 [kg/m³]

하첨자

e : 출구
fg : 액상 및 기상의 차
i : 입구
lat : 잠열
o : 표준 대기 상태
pre : 프리히터(pre-heater)
sens : 현열

1. 서 론

1930년대 판형 열교환기(Plate heat exchanger, PHE)가 소개된 이후, 고온 고압 및 큰 용량을 목표로 끊임없이 개발되어 왔다. 최근 브레이징(brazing) 기술의 향상으로 다양한 냉매 및 고온 고압의 조건에서 이상유동을 이용한 판형 열교환기의 사용이 가능해졌다. 브레이징 타입의 판형 열교환기는 냉동 공조의 냉방, 난방 및 푸드(food) 산업, 화학 처리 산업 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 오존 파괴 문제와 관련하여 CFC 및 HCFC 계열 냉매의 대안으로 많은 냉매들이 개발중이며 R410A는 그 중 하나이다.⁽¹⁾ Longo⁽²⁾는 브레이징 타입의 판형 열교환기 및 R410A 냉매를 이용하여 응축 실험을 수행하였다. 냉매의 열전달 계수는 강제 대류 응축에서 냉매 유량이 증가함에 따라 최대 30% 증가하였다. Hsieh and Lin⁽³⁾은 R410A를 이용하여 증발 열전달 및 압력 강하 특성에 대해 연구하였다. 증발 열전달 계수와 압력 강하는 인가된 열유속 조건에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 특히 증발 열전달 계수는 높은 열유속에서 냉매의 질량유속에 크게 영향을 받는 것을 확인하였다. 반면 증

발 압력에는 큰 영향을 받지 않는다고 밝혔다. Han et al.⁽⁴⁾은 R410A와 R22, 두 냉매를 이용하여 세브론 각, 증발 온도, 열유속 및 질량 유속에 따라 열전달 계수 및 압력 강하 특성을 실험적으로 분석하였다. Hsieh와 마찬가지로 증발 열전달 계수 및 압력 강하는 질량 유속에 따라 증가하였고, 또한 건도의 증가, 증발 온도의 감소, 및 세브론 각의 감소에 따라서도 증가하였다. R410A 및 R22의 비교를 통해 R410A의 증발 열전달 계수가 R22에 비해 15% 크고, 압력 강하는 35% 낮음을 보였다. Kuo et al.⁽⁵⁾은 건도에 따른 응축 열전달 특성을 분석하였는데 마찰계수(friction factor)에 대한 질량 유속 및 건도의 영향은 건도가 낮은 영역에서 더 큼을 확인하였다. Longo and Gasparella⁽⁶⁾와 Jokar et al.⁽⁷⁾은 R134A를 이용하여 열유속, 질량 유속, 증발 온도 및 냉매 출구 조건이 증발 열전달 계수 및 압력 강하에 미치는 영향에 대해 실험적으로 연구를 수행하였고, 열유속 및 냉매 출구 조건이 열전달 계수에 큰 영향을 주는 것을 확인하였다. 반면 증발 온도는 큰 영향이 없는 것으로 분석하였다. Yan and Lin⁽⁸⁾과 Yan et al.⁽⁹⁾은 Longo의 실험 결과로부터 열전달 계수 및 마찰계수에 대한 실용적인 상관식을 제시하였다. Kedzierski⁽¹⁰⁾는 판형 열교환기의 기울임 각에 따른 응축 성능을 평가하였고 90°에서 성능이 30% 증가하며 이는 응축 과정에서 중력의 영향 때문으로 분석하였다.

판형 열교환기의 성능에 대한 초기 연구는 대향류(counter flow)에 대해서 수행되었는데 이는 증발기 및 응축기 설치 시 수배관은 최대 열전달 효율을 고려하여 대향류로 구성되었기 때문이다. 하지만 최근 수냉식 히트펌프(water-source heat pump)는 작동 모드(냉방/난방)에 따라 판형열교환기가 증발기로 사용되기도 하며 응축기로 사용되기도 한다. 냉매는 사방밸브(4-way valve)를 통해 작동 모드에 따라 그 방향이 바뀌지만, 물의 방향은 사방밸브와 같은 별도의 밸브를 사용하지 않으며 아래로 들어가 위로 나오는 방식으로 고정되어 있다. 따라서 난방 시 판형 열교환기 내부의 유체는 평형 유동을 하며, 냉방 시에는 대향 유동을 한다.

본 연구의 목적은 증발 및 응축 시, 물 측 유동 방향에 따른 성능 변화를 알아보는 데 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 판형 열교환기의 성능 평가 장치로서 냉매 회로 하나와 물 회로 두 개, 그리고 물-글리콜 회로 하나로 구성 되어 있다. 두 개의 물 회로 중 하나는 테스트 시료인 판형 열교환기와 연결되어 있고 다른 하나는 셀-튜브 타입의 응축기와 연결되어 있다. 물-글리콜 회로는 판형 열교환기 타입의 응축기와 연결되어 있으며 증발 시 테스트 시료의 시험 압력을 조절하기 위해 사용된다. 냉매 회로는 시험부인 판형 열교환기 입구에서의 냉매를 원하는 상태로 제어하기 위해서 필요한 장치들로 구성되어 있다. 냉매의 유량을 조절하기 위해 회전수를 조절할 수 있는 인버터 AC 모터로 구동되는 기어펌프 및 냉매의 유량을 측정하기 위해서 Oval사에서 제작된 $\pm 0.1\%$ 의 오차를 가지는 코리올리식 유량계(CN025C-SS-200R)가 사용되었다. 기어펌프로부터 나온 냉매는 과냉 상태이기 때문에 판형 열교환기 입구의 냉매 건도를 맞추기 위해 20 kW의 예열기(preheater)에서 가열된다. 예열기는 R123의 응축 잠열에 의해서 R410A에 열에너지를 전달하게 된다. 시험부를 통과한 냉매는 셀-튜브 타입의 원통다관식 응축기에서 응축되어

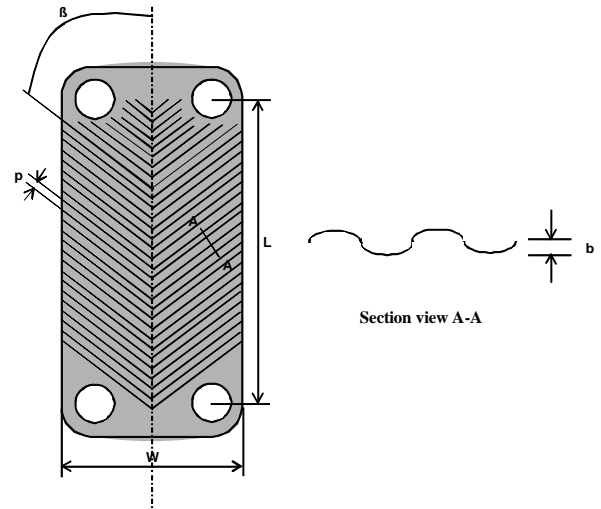


Fig. 2 Schematic view of the brazed plate heat exchanger.

과냉의 상태로 수액기로 흘러들어가게 된다. 그 외에 시험부 입출구의 냉매 상태를 확인하기 위해 사이트글라스(sight glass)가 사용되었다. 각 부품의 입출구에는 냉매의 온도와 압력을 측정하기 위해 $\pm 0.15^\circ\text{C}$ 정도를 가진 RTD(PT100) 온도 센서와 압력계가 설치되어 있고 시험부의 입출구의 압력차를 측정하기 위해 차압계가 설치되어 있다. 냉매가 흐르는 모든 부품과 배관은 외부와의 열손실을 최대한 배제하기 위해 단열제로 쌓여 있다. Fig. 2는 본 연구에 사용된 판형 열교환

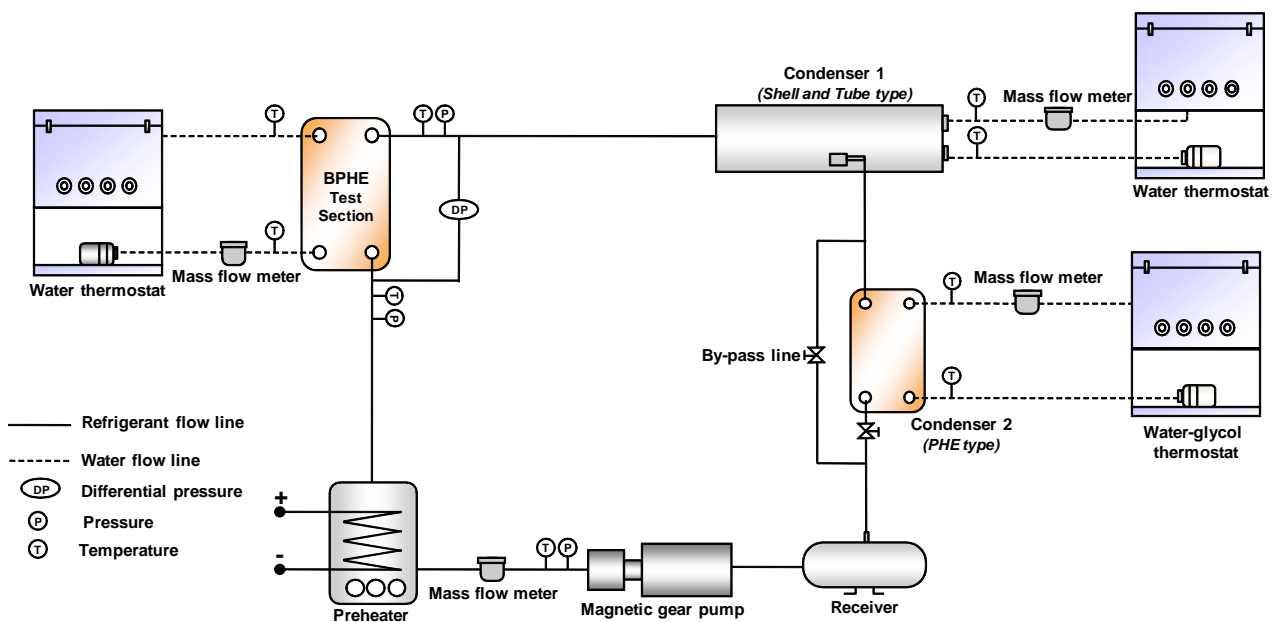


Fig. 1 Schematic diagram of evaluating the PHE system with water to refrigerant type for the condensation and evaporation test.

기로 폭 111 mm, 높이 311 mm 그리고 높이 165 mm로 전열판의 수는 60장이다. 전열판은 헤링본(herringbone) 타입으로 구체적인 제원은 Table 1에 나타내었다.

2.2 실험결과 처리 방법

관형 열교환기의 열전달 해석을 함에 있어서 사용할 수력직경(hydraulic diameter)은 다음과 같이 정의된다. Shah and Wanniarachchi가 제시한 수력직경은 다음과 같다.

$$D_h \approx 2b \text{ for } w \gg b \quad (1)$$

여기서 b 는 판의 피치와 바닥까지의 높이로 정의된다.

측정된 데이터로부터 열전달 계수를 계산하기 위한 과정은 다음과 같다. 먼저, 관형 열교환기에서 대향류(counter flow)로 흐르는 물과 냉매간의 총열전달률은 물 측으로부터 계산된다.

$$Q_w = m_w c_{p,w} (T_{w,o} - T_{w,i}) \quad (2)$$

관형 열교환기의 입구에서 냉매의 건도는 예열기(preheater)로부터 가열되는 전력으로 계산된다. 그러므로 예열기에서 냉매로 전달되는 열량 Q_p 는 다음과 같이 계산된다.

$$Q_p = m_r c_{p,r} (T_{r,p,o} - T_{r,p,i}) + m_r i_{fg} x_{p,o} \quad (3)$$

예열기 출구의 건도와 시험부 입구의 건도가 동일하므로 위 식을 건도에 대해서 정리하면, 다

Table 1 Geometrical characteristics of the plate heat exchanger used in this study

Fluid flow plate length, L (mm)	311
Plate width, W (mm)	111
Angle of the corrugation, β ($^\circ$)	60
Corrugation amplitude, b (mm)	2.0
Corrugation pitch, p (mm)	7.2
Number of plates	60
Channels on refrigerant side	29
Channels on water side	30

음과 같다.

$$x_i = x_{p,o} = \frac{1}{i_{fg}} \left[\frac{q_p}{m_r} - c_{p,r} (T_{r,p,o} - T_{r,p,i}) \right] \quad (4)$$

시험부 내에서의 냉매 건도 변화는 물 측의 열전달률로부터 유도된다.

$$\Delta x = \frac{q_w}{m_r i_{fg}} \quad (5)$$

$T_{r,i}$ 와 $T_{r,o}$ 는 관형 열교환기 냉매측의 입출구 온도이고, $T_{w,i}$ 와 $T_{w,o}$ 는 물측의 입출구 온도이다.

증발 및 증발 시, 액서지 손실은 다음과 같이 유도된다.

$$I_{evap} = [T_o (S_1 - S_4) - Q_{evap}]_{ref} + [T_o (S_e - S_i) + Q_{evap}]_{water} \quad (6)$$

$$I_{cond} = [T_o (S_3 - S_2) - Q_{cond}]_{ref} + [T_o (S_e - S_i) + Q_{cond}]_{water} \quad (7)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 열전달 실험결과

Fig. 3은 응축 압력 2450 kPa($T_{sat} = 41^\circ\text{C}$), 물 입구 온도 29°C , 그리고 물유량 2000 kg/h에서 유동 패턴에 따른 열전달 성능을 나타내고 있다. 응축 시 물 측 유동 방향의 변화에 따른 성능 차이는 거의 없는데 이는 상변화시 냉매의 온도는 변화가 없으므로 평행류 및 대향류에서 성능차이가 나타나지 않는다.

Fig. 4는 증발 압력 960 kPa($T_{sat} = 6^\circ\text{C}$), 물 입구 온도 20°C , 그리고 물유량 2000 kg/h에서 유동 패턴에 따른 열전달 성능을 나타내고 있다. 응축 시와는 달리 증발 시 물 측 유동 방향의 변화에 따른 성능은 대향류가 평행류에 비해 5-30% 증가하고 있다. 상변화가 일어나므로 유동 패턴에 따른 성능차이가 없어야 하나, 이렇게 큰 차이가 나는 것은 평행류 시 냉매 입구에서 급격한 증발이 일어나기 때문이다.⁽¹¹⁾ 대향류에서 냉매는 16°C 내외의 물과 열교환을 시작하는 반면 평행류에서는 20°C 의 물과 열교환을 하며 이때

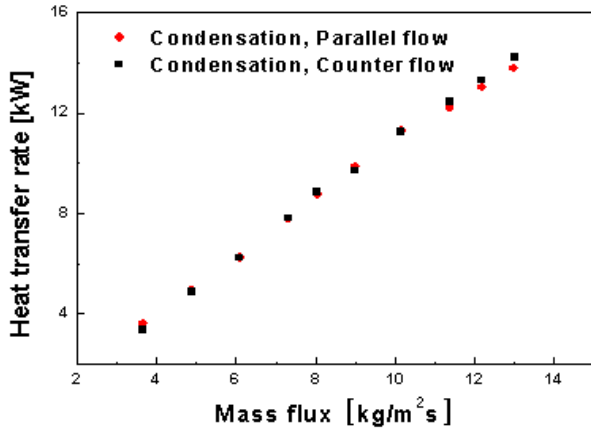


Fig. 3 Effect of flow direction with mass flux on heat transfer rate in condensation.

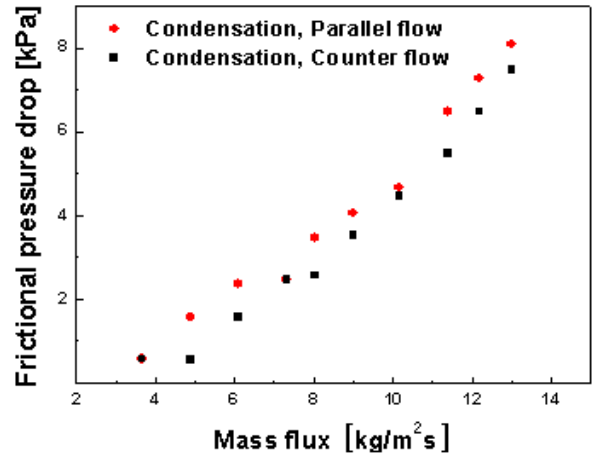


Fig. 5 Pressure drop as mass flux for flow direction in condensation.

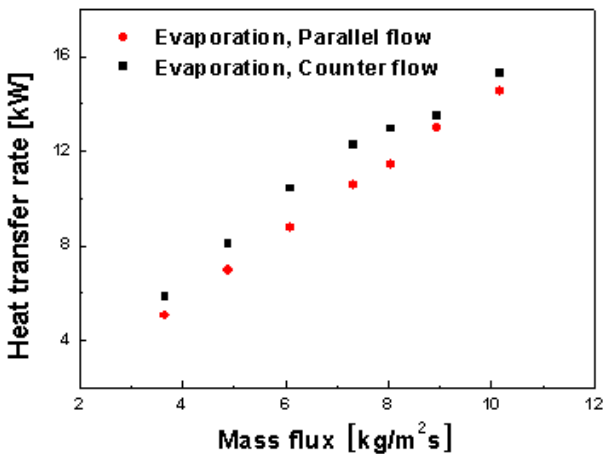


Fig. 4 Effect of flow direction with mass flux on heat transfer rate in evaporation.

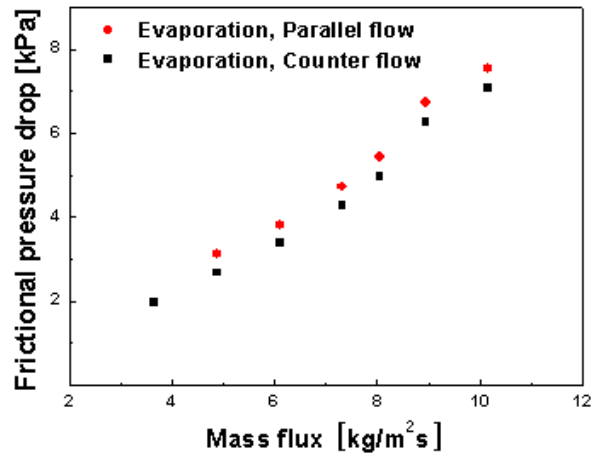


Fig. 6 Pressure drop as mass flux for flow direction in evaporation.

급격히 발생한 기포는 냉매의 유속을 증가시키고 충분한 열교환을 방해하는 것으로 보인다.

3.2 압력강하 실험결과

Fig. 5는 응축 압력 2450 kPa($T_{\text{sat}} = 41^\circ\text{C}$), 물 입구 온도 29°C , 그리고 물유량 2000 kg/h에서 유동 패턴에 따른 압력강하를 나타내고 있다. 질량 유속이 증가함에 따라 압력 강하는 증가하나 유동 패턴에 따른 큰 차이는 없는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 증발 압력 960 kPa($T_{\text{sat}} = 6^\circ\text{C}$), 물 입구 온도 20°C , 그리고 물유량 2000 kg/h에서 유동 패턴에 따른 압력강하를 나타내고 있다. 응축 시와 마찬가지로 질량 유속이 증가함에 따라 압

력 강하는 증가하나 유동 패턴에 따른 큰 차이는 없는 것으로 나타났다.

3.3 엑서지 손실 분석

Fig. 7은 증발 및 응축에서 유동 패턴에 따른 엑서지 손실을 분석한 것이다. 실험결과는 열전달 성능이 엑서지 손실과 비슷한 경향을 따름을 보이고 있다. 응축 및 증발에서 대향류가 평행류에 비해 엑서지 손실이 작으며, 그 차이는 응축보다 증발에서 더욱 크게 나타난다. 이는 응축이 증발보다 시스템의 효율이 좋을 의미하며, 유동 패턴 면에서는 대향류가 평행류에 비해 효율이 좋을 의미한다. 하지만, 앞서 언급한 것과 같이 응축에서의 유동 패턴에 따른 효율 차이는

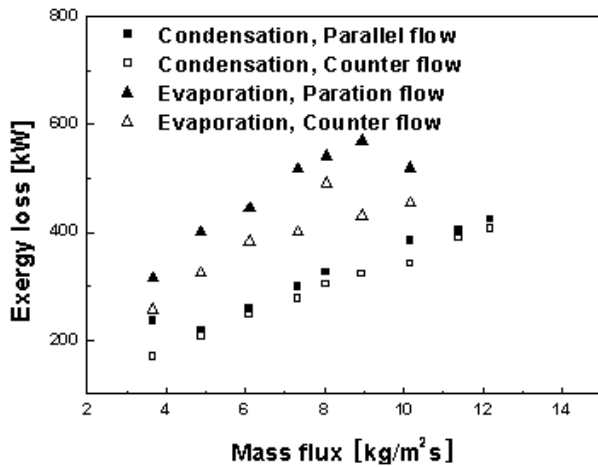


Fig. 7 Variations of exergy loss with mass flux for flow direction.

크지 않으며, 증발에서는 크므로 증발 시 대향류를 사용하는 것이 시스템의 성능 및 효율 면에서 유리하다.

4. 결론

본 연구는 판형 열교환기에서 물 측 유동방향이 응축 및 증발 성능에 미치는 영향에 대해 수행되었다. 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 응축 시 유동 패턴에 따른 성능 차이는 5%내로 나타났으나, 증발 시에는 5-30%의 성능 차이를 보였고 평행류에 비해 대향류에서 높은 성능을 나타내었다.

(2) 응축 시 유동 패턴에 따른 엑서지 손실은 큰 차이를 보이지 않으며, 증발 시에는 평행류의 엑서지 손실이 대향류보다 크게 나타났으며 증발 시 대향류가 시스템의 성능 및 효율 면에서 유리함을 나타내고 있다.

참고문헌

1. Palm, B., 2007, Refrigeration systems with minimum charge of refrigerant, *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 27, pp. 1693-1701.
2. Longo, G.A., 2009, R410A condensation inside a commercial brazed plate heat exchanger, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, Vol. 33, pp. 284-291.
- 3 Hsieh, Y.Y., and Lin, T.F., 2002, Saturated

- flow boiling heat transfer and pressure drop of refrigerant R-410A in a vertical plate heat exchanger, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 1033-1044.
4. Han, D.H., Lee, K.J. and Kim, Y.H., 2003, Experiments on the characteristics of evaporation of R410A in brazed plate heat exchangers with different geometric configurations, *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 23, pp. 1209-1225.
5. Kuo, W.S., Lie, Y.M., Hsieh, Y.Y. and Lin, T.F., 2005, Condensation heat transfer and pressure drop of refrigerant R-410A flow in a vertical plate heat exchanger, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 48, pp.5205-5220.
6. Longo, G.A., and Gasparella, A., 2007, Refrigerant R134A vaporization heat transfer and pressure drop inside a small brazed plate heat exchanger, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 30, pp. 821-830.
7. Jokar, A., Eckel, S.J., Onsi, M.H., Gielda, T.P., 2004, Condensation heat transfer and pressure drop of brazed plate heat exchangers using refrigerant R134A, *J. Enhanced Heat Transfer*, Vol. 11, pp. 161-182.
8. Yan, Y.Y., Lin, T.F., 1999, Evaporation heat transfer and pressure drop of refrigerant R134A in a plate heat exchanger, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 121, pp. 118-127.
9. Yan, Y.Y., Lio, H.C., Lin, T.F., 1999, Condensation heat transfer and pressure drop of refrigeration R134A in a plate heat exchanger, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 42 pp. 993-1006.
10. Kedzierski, M.A., 1997, Effect of the inclination on the performance of a compact brazed plate heat exchanger, *Heat Transfer Eng.*, Vol. 18, pp. 25-38.
11. Stenhede, C., 2004, A technical reference manual for plate heat exchangers in refrigeration & air conditioning applications, fifth ed. Alfa Laval, pp. 58-59.