

Plate & Shell 열교환기내에서 R-718의 열전달 및 압력강하 특성에 관한 실험적 연구

강석현* · 서무교* · 김영수**

Experimental Study on Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics for R-718 in Plate and Shell Heat Exchanger

Seok Hyun Kang*, Moo Kyo Seo*, and Young Soo Kim**

Key Words: Plate and Shell Heat Exchanger(P&SHE), Wilson Plot Technique(Wilson Plot기법) Heat Transfer(열전달), Pressure Drop(압력강하), R-718(물)

Abstract

In this study, heat transfer and Pressure drop characteristics for R-718 in the plate and shell heat exchanger(P&SHE) investigated experimentally. The plates are circular and welded into a stack which fits into a cylindrical shell in P&SHE. Although apparently very different from rectangular the compact brazed plate heat exchanger(CBE), the underlying flow passage structure through the P&SHE is the same as in the CBE. The R-718 between plate side and shell side was performed a counterflow heat exchange. Heat transfer characteristic of R-718 were measured for turbulent flow in P&SHE by using wilson plot technique. Heat transfer experiment was performed in the $200 \leq Re \leq 500$ regime and Pressure drop experiment was performed in the $150 \leq Re \leq 1600$ regime. The purpose of this study is to investigate heat transfer and friction factor correlations for R-718 in P&SHE and to offer fundamental data for experiment

기호 설명

Q : 열전달률 [W]
 A : 전열면적 [m^2]
 C_p : 정압비열 [J/kg K]
 D_h : 수력학적 직경 [m]
 U : 총괄열전달계수 [$W/m^2 K$]
 L : 전열판 직경 [m]
 L_s : 포트에서 압력센서까지 거리 [m]
 N : 전열판 개수
 Nu : 닛셀 수 [$Nu = hD_h/k$]
 Re : 레이놀즈 수 [$Re = \rho v_m D_h / \mu$]
 Pr : 프란틀 수 [$Pr = \nu / \alpha$]

P : 압력 [N/m^2]
 T : 온도 [K]
 d : 평활관 내경 [m]
 D : 셸 내경 [m]
 ρ : 밀도 [kg/m^3]
 v_m : 평균유속 [m/sec]
 \dot{m} : 질량유량 [kg/sec]

1. 서론

최근 들어 지구 온난화와 오존층 파괴로 인하여 선진국에서는 기존의 CFC 및 HCFC 계통의 물질을 규제하고 궁극적으로 전폐시키려는 의지를 보이는 한편 갈수록 심화되는 사용 공간의 제약성으로 말미암아 단위부피당 전열면적을 극대화시킨 고밀도·효율 열교환기에 관심을 끌고 있다. 설계 기술이 발달함에 따라 설계 인자를 최

* 부경대학교 대학원

** 부경대학교 냉동공조공학과

적 상태로 변화시킴으로써 압력손실은 낮추고 열전달 기술을 극대화시킨 경제적이고 효율적인 최적의 냉동·공조 시스템 설계에 노력을 기울이고 있는 실정이다. 그러나 현재까지 아직도 성능과 효율 개선의 여지가 많다.

열교환기(P&SHE)와 관련된 연구는 국내외적으로 이루어지지 않은 상태이다. P&SHE와 유사한 형태인 용접식 판형열교환기(CBE)는 1990년대 개발된 이래 열교환기를 필요로 하는 거의 모든 산업에 걸쳐 광범위하게 응용되고 있으며 일반적으로 최대 사용압력은 40bar 정도이고 최고 사용온도는 185°C로 알려져 있다. 이에 반해 P&SHE는 비록 외관상으로 CBE와는 다를지라도 기초가 되는 유동유로(Flow passage)는 CBE와 유사한 형태로 최대 사용압력 100bar, 최고 사용온도 350°C로 알려져 있다.⁽⁴⁾⁽⁵⁾ P&SHE는 고효율·밀도 열교환기로 냉동·공조 산업 및 산업 전반에 걸쳐 광범위하게 이용되리라고 사료된다.

본 연구에서는 R-718을 이용하여 P&SHE에서의 열전달 및 압력강하 특성에 대한 실험적인 기초 연구자료를 제공하고자 한다

2. 이론적 고찰

2.1 Wilson plot 기법을 이용한 셀측 열전달 계수 측정

Wilson plot 기법은 열교환기에서 총괄열전달계수를 측정하고 이를 이용하여 관내, 관외 각각의 열전달계수를 구하는 방법으로서 1915년 Wilson이 제안한 이래로 많이 개발되어 오고 있다. 본 연구에서 사용된 P&SHE에서 판측 벽온도의 측정이 불가능하므로 Wilson plot 기법을 이용하여 열전달계수를 구하였다.⁽¹⁾⁽²⁾

실험에 앞서 시험부의 판측 온수와 셀측 냉수 사이의 에너지 평형 해석을 하였으며 10%의 오차를 나타내었다.

$$Q_{h,w} = \dot{m}_{h,w} C_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (1)$$

$$Q_{w,c} = \dot{m}_{c,w} C_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i})$$

$$Q_{ave} = \frac{Q_{h,w} + Q_{c,w}}{2}, \quad \frac{|Q_{h,w} - Q_{c,w}|}{Q_{ave}} < 10\% \quad (2)$$

전열판(Plate)은 9장을 사용하였고 전열면적은 투영면적을 기준으로 하였다. 판과 판을 접했을

때 형성되는 비원형관(Non-circular tube)내에서 수력학적 직경(Hydraulic diameter)은 식 (3)과 같이 계산하였으며 단상 난류유동 하에서 Dittus-Bolter식은 식 (4)과 같다.

$$D_h = \frac{4 \times \text{Cross-sectional Area}}{\text{Wetted Perimeter}} \quad (3)$$

$$Nu = C Re^m Pr^{0.4} \quad (\text{Heating, } T_s > T_m) \quad (4)$$

$$Nu = C Re^m Pr^{0.3} \quad (\text{Cooling, } T_s < T_m)$$

대향류 열교환을 행하는 시험부의 열전달 특성을 알기 위하여 대수평균온도차(LMTD)를 사용하였다.

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (5)$$

$$\Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,o}, \quad \Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,i}$$

시험부에서 총괄열저항은 다음과 같이 나타난다. 여기서 오염저항, 접촉저항 등은 무시하였다.

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_{h,w} A} + \frac{1}{h_{c,w} A} + \frac{t}{k_{plate} A} \quad (6)$$

총괄열전달계수(U)는 다음과 같이 계산된다.

$$U = \frac{Q_{ave}}{A \cdot \Delta T_{LMTD}} \quad (7)$$

식 (7)에서 판내측의 열저항을 Reynolds 수의 함수로 미리 알고 있다면 판내측의 유량을 변화시켜가면서 총괄 열저항을 측정하고 이들의 데이터를 Fig. 1처럼 총괄열저항과 판내측의 열저항의 측으로 그리면 직선의 방정식을 구할 수 있다.

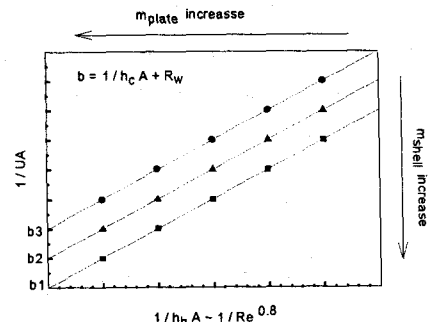


Fig. 1 Concept of wilson plot technique

이때 세로축의 절편에 해당하는 열저항은 셀측과 판벽에서의 열저항의 합임을 알 수 있다.

본 실험에서 전열관으로 사용된 스테인리스강(SUS)과 같이 열전도도가 매우 큰 경우에는 총괄열저항의 0.5% 미만이므로 무시하였다. 셸측에서의 열전달계수를 구하기 위해 셸측의 열저항을 매개변수(Parameter)로 하며, 관내측의 온수유량을 변수(Variable)로 하여 총괄열전달계수를 측정하게 되면 세로축 절편 $b=1/(h_{c,w} A)$ 이므로 셸측에서의 열전달계수는 $h_{c,w}=1/(b A)$ 로 구하였다.

3.2 압력강하 측정

P&SHE의 R-718 유동 하에서 측정된 총괄압력강하(Overall pressure drop)는 판과 판사이에서 그리고 원주형 셸 내부에서 발생하는 압력강하와 평활관(Smooth tube)에서의 압력강하 그리고 포트 부분에서의 압력강하로 나눌 수 있다. 측정된 온수와 냉수의 질량유량으로부터 평균 유속(Bulk mean velocity)을 나타내었다

$$v_m = \frac{\dot{m}}{\rho L D_h \frac{N}{2}} \quad (8)$$

P&SHE에서 측정된 총괄압력강하로부터 판내측과 셸측의 핵심부 압력강하(Core Pressure drop)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta P_{core} = \Delta P_{measured} - \Delta P_{port} - \Delta P_{pipe} \quad (9)$$

첫째, 판내측의 포트부분의 압력강하는 Shah와 Focke(1988), Kays와 London(1984)에 의한 경험적 관계식과 평균 포트속도를 토대로 추정할 수 있다

$$\Delta P_{plate port} = 1.5(\rho v_m^2 port/2) \quad (10)$$

또한 P&SHE의 입구와 출구의 평활관 부분에서의 압력강하는 Moody 마찰인자(friction factor)와 평활관의 평균유속로부터 추정되어진다.

$$\Delta P_{pipe} = \frac{f \rho v_m^2 pipe L_s}{2 d_{pipe}} \quad (11)$$

$$f = 0.316 Re^{-1/4} \quad (Re \leq 2 \times 10^4)$$

둘째, 셸측에서는 포트부분의 압력강하는 판내측과는 달리 평활관에서 셸로 흘러들어 갈 때 발생하는 돌연확대(Sudden Expansion)와 셸에서 평활관로 빠져나갈 때 발생하는 돌연축소(Sudden Contraction)로 인한 압력강하로 식 (12)와 같이

구할 수 있다.

$$\Delta P_{shell port} = \Delta P_{SE} + \Delta P_{SC} \quad (12)$$

$$\Delta P_{SE, SC} = K_{SE, SC} \frac{\rho v_m^2 pipe}{2} \quad (13)$$

$$K_{SE} = (1 - \frac{d_{pipe}^2}{D_{shell}^2})^2, \quad K_{SC} \approx 0.42(1 - \frac{d_{pipe}^2}{D_{shell}^2})$$

단위경로당 마찰에 의한 압력강하를 무차원수인 마찰계수(Friction coefficient)로 나타내었다.

$$f = \frac{\Delta P_{core}}{2 \rho v_m^2 R} \frac{D_h}{(N/2)}, \quad (\text{여기서 } R = \frac{2}{3} L) \quad (14)$$

2. 실험 장치 및 방법

Fig. 1에서는 P&SHE의 R-718에 관한 전열 및 압력강하 특성을 파악하기 위한 실험 장치도를 나타내었다. Fig. 2는 Plate & Shell 구조의 대향류 열교환기로 제작되어 있는 시험부(Test section)의 유동양상의 개략도와 상세도이다.

실험장치는 크게 온수회로(실선)와 냉수회로(점선)로 나눌 수 있다. 시험부의 판내측(Plate side) 유체로는 온수(Hot water), 셸측(Shell side) 유체로는 냉수(Cold water)가 흐르도록 구성되어 있다. 각각의 유체는 항온조를 이용하여 시험부 입구 온도를 조절할 수 있으며 페루프 형태로 배열되어 재순환하도록 구성되어 있다.

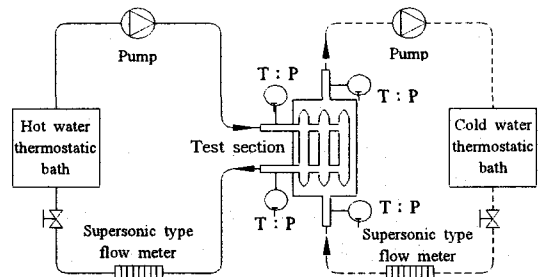


Fig. 2 Diagram of experiment apparatus

시험부는 열손실을 감소시키기 위하여 폴리에틸렌(Polyethylene)으로 단열처리를 하였다. 시험부에서의 평균 열유속은 시험부의 입구와 출구 사이에 설치된 ± 0.1 °C의 정확도를 갖는 시스형 열전대(Sheath type thermocouple)를 이용해 R-718의

온도 측정과 $\pm 1\%$ 이 정확도를 갖는 초음파 유량계(Supersonic type flow meter)를 이용한 R-718의 유량측정에 의하여 계산하였다.

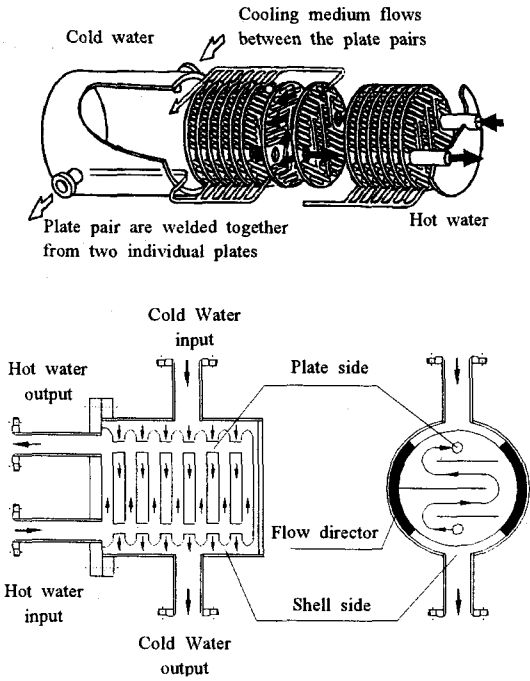


Fig. 3 Schematic and detail diagram of flow appearance on the plate and shell heat exchanger

Table. 1 Range of experimental conditions

Refrigerants	R-718
Regime of Reynolds Number	Heat transfer $200 \leq Re \leq 500$
	Pressure drop $200 \leq Re \leq 1,600$
Hot water Inlet temperature ($^{\circ}C$)	$31 (\pm 0.5)$
Cold water Inlet temperature ($^{\circ}C$)	$25 (\pm 0.5)$
Hydraulic diameter (m)	0.004
A projected area (m^2)	0.0277

또한 시험부의 모든 입구와 출구에는 $\pm 0.2\%$ 의 정확도를 갖는 압력트랜듀서(Pressure transducer)를 설치하여 압력강하를 측정하였다. Table. 1의 실험조건하에서 각각의 목표값에 대하여 안정상태가 1200sec이상 형성되고 난 후에 180sec동안

5sec간격으로 데이터를 실시간 집적한 후 평균값을 취하여 데이터를 처리하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 열전달 특성

첫째, 실험조건하에서 셸측에서의 R-718의 열전달계수를 구하기 위하여 셸측의 열저항을 매개변수로 하고 관내측에서의 온수유량을 변수로 한

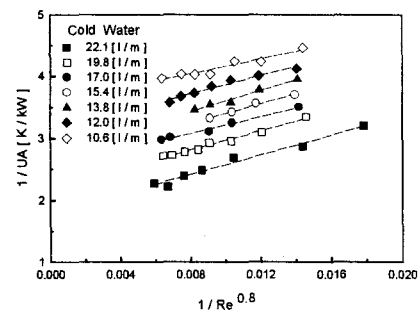


Fig. 4 Wilson plot for heat transfer coefficients in a shell side

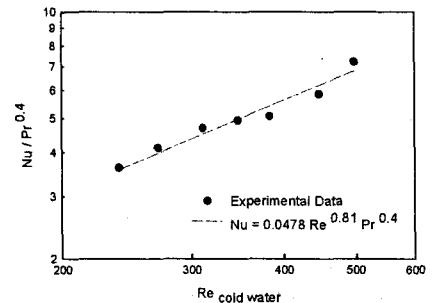


Fig. 5 Heat transfer coefficient in a shell side

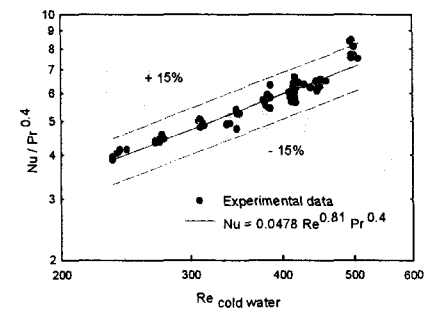


Fig. 6 Comparison of experimental data with calculated heat transfer correlation in the shell side

열저항을 단계적으로 변화 시켜가면서 총괄열전달계수를 측정하였다

이 때 단상 난류유동하에서 관내측의 열저항을 $1/Re^{0.8}$ 에 비례하는 것으로 보였다. 셀측에서의 열전달 실험결과는 Wilson plot기법을 이용해 Fig. 4에서 나타내었다. 세로축 절편의 값이 셀측에서의 열저항에 해당한다. 이 값으로부터 셀측의 열전달계수를 구하여 Fig. 5에 그 결과를 나타내었다.

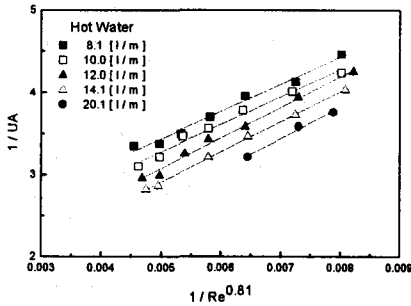


Fig. 7 Wilson Plot for Heat transfer coefficients in a plate side

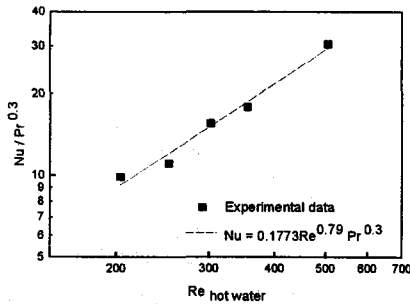


Fig. 8 Heat transfer coefficient in a plate side

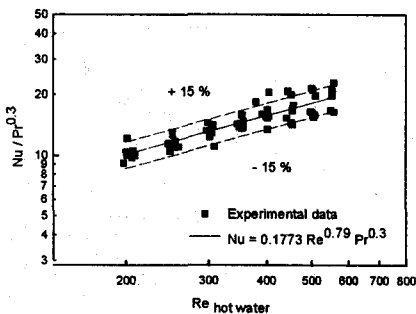


Fig. 9 Comparison of experimental data with calculated heat transfer correlation in the plate side

실험 조건하에서 Wilson plot기법을 적용하여 구한 셀측에서의 열전달계수 데이터로부터 최소자승법을 이용하여 다음과 같은 상관식을 제안하였다.

$$Nu/Pr^{0.4} = 0.0478Re^{0.81} \quad (15)$$

둘째, 관내측에서의 R-718의 열전달계수를 구하기 위하여 셀측에서 행하였던 동일한 방법으로 실험을 수행하였다. 단, Fig. 7의 가로축에 나타낸 셀측에서의 열저항은 본 연구에서 먼저 구해놓은 상관식 (14)을 이용하여 $1/R^{0.81}$ 로 하였다. 실험 조건하에서 Wilson plot기법을 적용하여 구한 관내측에서의 열전달계수 데이터로부터 다음과 같은 상관식을 제안하였다.

$$Nu/Pr^{0.3} = 0.1773Re^{0.79} \quad (16)$$

Fig. 7과 Fig. 10은 각각 본 연구에서 제안된 셀측의 열전달계수 상관식 (14)와 관내측의 열전달계수 상관식 (15)을 실험 데이터를 비교한 것으로 레이놀즈 범위 $200 \leq Re \leq 500$ 사이에서 $\pm 15\%$ 의 정확도 범위 안에서 적용이 가능하다.

4.1 압력강하 특성

Fig. 10은 실험조건하에서 단위경로당 측정된 관내측의 마찰계수 데이터를 나타낸 것으로 최소자승법을 이용하여 다음과 같은 상관식을 제안하였다.

$$f = 1,268Re^{-0.817} \quad (200 \leq Re \leq 500) \quad (17)$$

$$f = 17.41Re^{-0.134} \quad (500 \leq Re \leq 1,600) \quad (18)$$

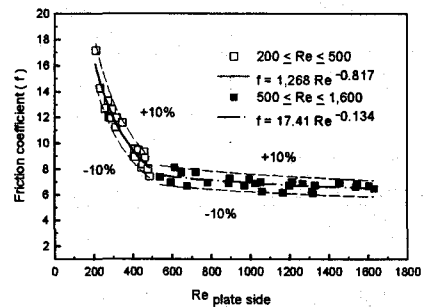


Fig. 10 Comparison of experimental data with calculated friction coefficient correlation in the plate side per passage

본 연구에서 제안된 상관식 (17)과 (18)은 실험 데이터와는 $\pm 10\%$ 의 정확도 범위 안에서 적용이 가능하다.

Fig. 11은 실험조건하에서 단위경로당 측정된 셸측의 마찰계수 데이터를 나타낸 것으로 최소자승법을 이용하여 다음과 같은 상관식을 제안하였다.

$$f = 22,930 Re^{-1.32} \quad (200 \leq Re \leq 500) \quad (19)$$

$$f = 121.3 Re^{-0.479} \quad (500 \leq Re \leq 1,600) \quad (20)$$

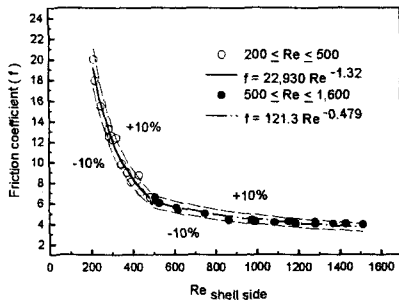


Fig. 11 Comparison of experimental data with calculated friction coefficient correlation in the shell side per passage

본 연구에서 제안된 상관식 (19)과 (20)은 실험 데이터와는 $\pm 10\%$ 의 정확도 범위 안에서 적용이 가능하다.

4. 결론

첫째, 본 연구에서는 관측 벽온도를 측정할 수 없는 P&SHE에서 Wilson Plot법을 이용하여 R-718 난류 유동하에서 열전달 특성에 관한 실험적 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (a) 실험조건하에서 셸측 R-718의 유동에 대한 열전달상관식 (15)를 제안하였다. 그 정확도는 $\pm 15\%$ 이내이다.
- (b) 실험조건하에서 관내측 R-718의 유동에 대한 열전달상관식 (15)를 제안하였다. 그 정확도는 $\pm 15\%$ 이내이다.

$200 \leq Re \leq 500$ 범위 내에서 P&SHE의 셸측의 열전달계수 범위는 약 $1,200 \sim 2,300 [W/m^2K]$ 이며 관측의 열전달계수 범위는 약 $3,000 \sim 6,100 [W/m^2K]$ 임을 예측할 수가 있었다.

둘째, 본 연구에서는 R-718 난류유동 하에 압력강하 특성에 관한 실험적 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (c) 실험조건하에서 관내측 R-718의 유동에 대한 단위경로당 마찰계수 상관식 (17)과 (18)을 제안하였다. 그 정확도는 $\pm 10\%$ 이내이다.
- (d) 실험조건하에서 셸측 R-718의 유동에 대한 단위경로당 마찰계수 상관식 (19)과 (20)을 제안하였다. 그 정확도는 $\pm 10\%$ 이내이다.

$200 \leq Re \leq 1,600$ 범위 내에서 P&SHE의 단위유로당 관내측의 압력강하 범위는 약 $1.7 \sim 32 [kPa]$ 이며 셸측의 압력강하 범위는 약 $1.7 \sim 19 [kPa]$ 임을 예측할 수가 있었다.

참고문헌

- (1) 권정태, 배성원, 김무환, "Wilson Plot Technique을 이용한 열전달계수의 측정", 공기조화 냉동공학회, 97 하계학술발표회 논문집, pp. 257~261, 1997.
- (2) Briggs, D. E. and Young, E. H., "Modified Wilson plot techniques for obtaining heat transfer correlations for shell and tube heat exchangers", Chemical Engineering Progress Symposium series, No. 92, Vol. 65, pp. 35~45, 1969.
- (3) A. Muley, and R. M. Manglik, "Experimental study of turbulent flow heat transfer and pressure drop in a plate heat exchanger with chevron plates", J. heat transfer Vol. 121 pp. 110~117, 1999.
- (4) Mark A. Kedzierski, "Effect of inclination on the performance of a compact brazed plate condenser and evaporator" heat transfer engineering, Vol. 18, NO. 3, pp. 25-38, 1997.
- (5) Vishwas V. Wadekar, "Improving industrial heat transfer-compact and not-so-compact heat exchangers", 2nd European Thermal Sciences and 14th UIT National Heat Transfer Conference, 1996.
- (6) Yi-Yie Yan, Hsiang-Chao Lio, Tsing-Fa lin, "Condensation heat transfer and Pressure drop of refrigerant R-134a in a plate heat exchanger", Int. J. 42, pp. 993-1006, 1999