

지그재그채널 PCHE의 각도에 따른 열전달 및 압력강하특성

최 미 진[†], 권 오 경, 차 동 안, 윤 재 호

한국생산기술연구원 에너지설비기술지원센터

Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics in Zigzag Channel

Angles of Printed Circuit Heat Exchangers

Mi-Jin Choi[†], Oh-Kyung Kwon, Dong-An Cha, Jae-Ho Yeun

ABSTRACT: The objectives of this paper are to study the characteristics of heat transfer and pressure drop of the zigzag channel PCHE using diffusion bonding technology by numerical analysis. PCHE of five types are designed, which are zigzag channel angle 180°, 160°, 140°, 120° and 100°. The zigzag PCHE was numerically investigated for Reynolds number in a range of 150~800. The temperatures of the hot side were performed at 80°C while that of the cold side was conducted at 20°C. The results show that the performance of heat transfer rate for zigzag channel 100° increases about 11.5% compared to that of zigzag channel 180°. On the other hand, the performance of pressure drop for zigzag channel 100° is remarkably higher than that of zigzag channel 180°, about 1.4 times.

Key words: Compact Heat Exchanger(콤팩트 열교환기), Diffusion Bonding(확산접합), Heat Transfer Rate(열전달률), PCHE(인쇄기판형 열교환기), Zigzag Channel(지그재그채널)

기 호 설 명

A_s	: 열전달면적	[mm ²]
A_c	: 자유유동면적	[mm ²]
C_p	: 비열	[J/kg · °C]
D_h	: 수력직경	[mm]
f	: 마찰계수	
h	: 채널높이	[mm]
k	: 열전도율	[W/m · °C]
L	: 채널길이	[mm]
\dot{m}	: 질량유량	[kg/h]

p	: 채널과 채널사이 피치	[mm]
ΔP	: 압력강하	[kPa]
Q	: 열전달률	[kW]
Re	: 레이놀즈수	

1. 서 론

확산접합(Diffusion Bonding) 콤팩트 열교환기는 화학적 에칭된 마이크로채널 박판을 적층 밀착시켜 모재의 용점 이하 온도에서 소성변형이 생기지 않을 정도로 가압하여 접합면간에 생기는 원자의 확산을 이용하여 접합하는 제작 기술을 말한다. 특징으로는 기존 열교환기 대비 크기를 획기적으로 줄일 수 있으며, 고온고압에 견딜 수 있고 온도근접성이 우수하여 효율이 높다는 장점이 있다.

[†] Corresponding author

Tel.: +82-41-589-8528; fax: +82-41-589-8330

E-mail address: kwonok@kitech.re.kr

현재까지 확산접합 열교환기는 영국의 Heatric사에서 세계 최초로 상용화에 성공하였으며, 인쇄회로판형 열교환기(PCHE : Printed Circuit Heat Exchanger, 이하 PCHE)라는 명칭으로 극저온 고압의 LNG 액화 플랜트, 연료전지 반응기 및 개질기, CO₂ 히트펌프 및 온수기 등의 열교환장치 등에 적용되고 있으며, 점차 그 응용범위가 크게 확대되고 있다.⁽¹⁾

PCHE 열교환기 연구는 일본 동경공업대학의 Kato 연구팀에 의해 주로 수행되었다. Nikitin 등⁽²⁾은 초임계 CO₂ 냉매를 이용하여 실험적으로 열전달과 압력강하 특성을 규명하고 실험상관식을 제안하였다. 실험 레이놀즈수 범위에서의 총괄열전달계수는 300~650 W·m²/K 이었다. Ngo 등⁽³⁾은 온수를 제조하기 위해 CO₂ 냉매를 사용하였고 새로운 S 형태의 핀을 3차원 전산해석을 통해 PCHE의 열적 수력성능을 평가하였다. 제안한 S 형태의 핀을 가지는 PCHE는 기존 직관형태의 PCHE에 비해 체적은 3.3배 작고, CO₂ 측에서 압력강하는 37% 작게 나타난다고 주장하였다.

또한 Tsuzuki 등⁽⁴⁾과 Ngo 등⁽⁵⁾은 S형상의 핀과 지그재그형상의 핀의 열적 수력성능을 3차원 전산해석을 통해 비교 평가하였으며, 지그재그형상이 열전달 성능은 24~34% 높지만, 압력강하는 4~5배 크다는 연구결과를 발표하였다.

국내에서는 확산접합과 마이크로 채널을 적용한 PCHE에 관한 연구는 전무한 실정이었으나(주)이노월에 의해 처음 시제품이 선보인 단계이며, 김 등⁽⁶⁾은 직관 마이크로채널 PCHE의 고온측 온도, 고온측과 저온측의 레이놀즈수 변화에 따른 열전달 및 압력강하 특성에 대한 실험을 수행하였고 열전달계수 및 마찰계수 상관식을 제안하였다. 김 등⁽⁷⁾은 지그재그채널과 유선형 핀형상의 채널 열교환기를 3차원 수치해석을 통하여 열전달 및 압력강하 특성을 평가하였다.

최근 권 등⁽⁸⁾은 Straight, Long dot, Splited wavy의 채널형상을 가지는 PCHE를 실험을 통하여 열전달 및 압력강하 특성을 정량적으로 비교하였다. 그러나 지금까지 지그재그채널 PCHE의 각도에 따른 열전달 및 압력강하특성을 비교한 연구는 거의 수행되지 않았다.

본 연구에서는 지그재그채널 형상을 가지는 5종류의 PCHE에 대한 수치해석을 범용 열 및 유체유동 해석 프로그램인 CFX-11을 사용하여 수

행하고, 지그재그채널 각도에 따른 열전달 및 압력강하 특성을 비교하고자 한다.

2. 해석영역 및 해석방법

2.1 해석모델

Fig. 1은 본 연구에서 해석하고자 하는 지그재그채널 열교환기를 나타낸 것이다. 해석대상 열교환기는 지그재그채널 각도가 180°인 Sample 1과 채널각도가 160°, 140°, 120°, 100°인 Sample 2~5인 총 5종류이다. 지그재그채널로 이루어진 채널 한판의 크기는 135(L) × 40(W) × 1(H) mm이고, 채널폭(W_{ch})은 1.5mm, 핀의 폭(W_{fin})은 1.0mm로 동일하다. Sample 2~5에서 채널각도가 달라짐에 따라 채널사이의 피치(P)와 높이(h)는 다르게 되며 그 상세 제원은 Table 1과 같다.

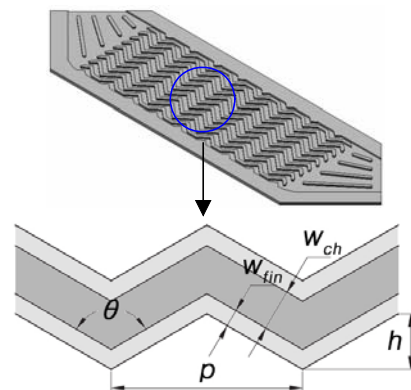


Fig. 1 Details of zigzag channel

Table 1 Specifications of zigzag channel

Samples No.	h (mm)	p (mm)	W _{ch} (mm)	W _{fin} (mm)	θ (deg)
1	-	-	1.5	1	180
2	1.14	12.93	1.5	1	160
3	2.2	12.09	1.5	1	140
4	3.16	10.95	1.5	1	120
5	4	9.53	1.5	1	100

지그재그채널 PCHE는 고온부에는 고온의 물이 저온부에는 저온의 물이 흐르고 양 유체는 서로 열교환할 수 있도록 모사하였다. 해석의 수행을 위해서 고온부와 저온부 각 한판과 그 위로 흐르는 작동유체를 해석영역으로 선정하였다. 해석의 수행을 위해 고체부의 경우 약 370,000개, 유체부의 경우 약 320,000개의 격자점을 생성하였으며 열전달이 주로 일어나는 채널의 벽면에 프리즘 격자를 생성하여 계산 결과의 정확도를 높이고자 하였다.

2.2 해석방법 및 조건

CFD 해석은 다음과 같은 가정 하에 수행하였다.

- i) 3차원 정상상태이다.
- ii) 열교환기 외부로의 열손실이 없다.
- iii) 내부 유동은 층류이다.
- iv) 중력에 의한 영향은 무시한다.

해석에 사용된 방정식은 아래와 같다.

(1) 연속방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

(2) 운동량방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = \left\{ \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij}$$

(3) 에너지방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ u_i \left(\rho c_p T + \rho \frac{u_i^2}{2} \right) \right\} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_f \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_j \tau_{ij} \right)$$

$$-\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_s \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (3)$$

격자점에 대한 지배방정식의 이산화는 CFX-11에서 제공하는 2차항 이상의 정확도를 가지는

high resolution schem을 사용하였으며 결과의 수렴도는 10^{-5} 이하를 유지하였다.

Table 2는 수치해석 조건을 나타낸 것이다. 확산접합 열교환기의 재질은 SUS304이며 작동유체는 물을 사용하였다. 고온부 80℃와 저온부 20℃의 물이 대향류로 흘러 들어가며 각각의 유량은 2.4 ~ 12 kg/h로 변화를 주었다. Fig. 2는 CFD 모델에 사용된 경계조건을 나타낸 것이다. 해석영역의 최상부면과 최하부면에 주기조건을 사용하여 실제 열교환기와 같이 연속되어 있음을 모사하고자 하였다.

2.3 해석결과의 검증

해석결과의 검증을 위해서 권 등의 실험결과⁽⁸⁾와의 비교결과를 Fig. 3과 4에 나타내었다. 실험결과와 비교를 위해서 고온부, 저온부 각 10장씩 총 20장을 적층하여 수치해석 하였다. 지그재그채널 180°에 대해서 해석결과는 총괄열전달계수의

Table 2 Numerical conditions

Conditions		
Material	Solid	SUS 304
	Fluid	Water
Inlet temp. (°C)	Hot side	80
	Cold side	20
Inlet flow rate (kg/h)	2.4 ~ 12	

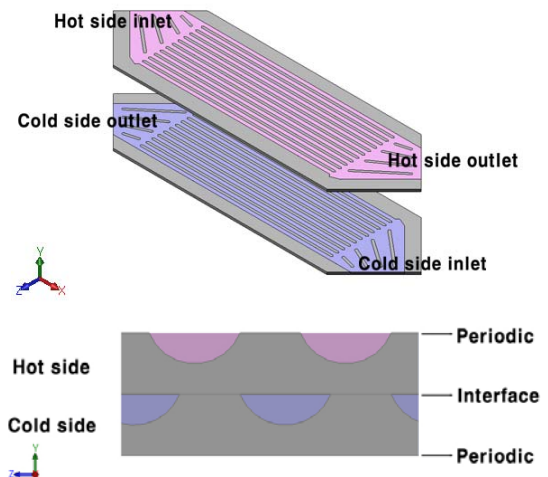


Fig. 2 Boundary conditions of the CFD models.

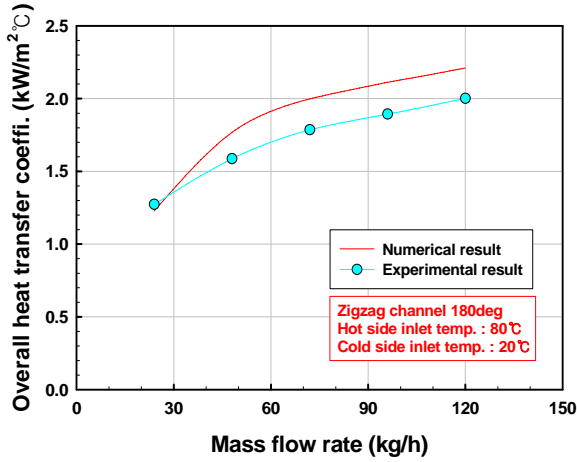


Fig. 3 Comparison of overall heat transfer coefficient for numerical and experimental result.

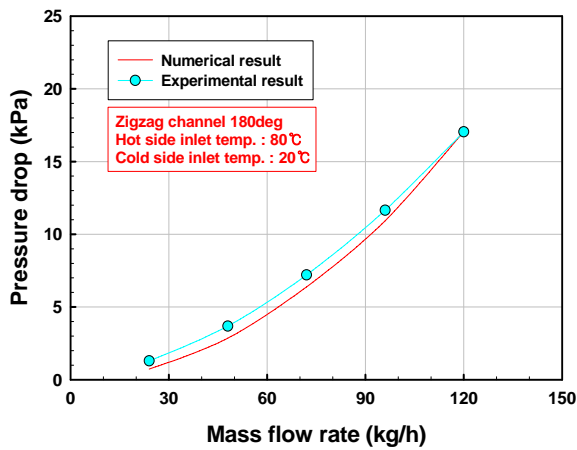


Fig. 4 Comparison of pressure drop for numerical and experimental result.

경우 실험결과보다 다소 높게 나타나고 있으며 3.4~11.9%의 오차범위를 나타내었다. 또한 압력 강하의 경우 실험결과보다 약간 낮게 나타나지만 정성적으로 유사한 경향을 보이므로 본 연구에서 수행한 해석결과의 타당성을 확인할 수 있었다.

2.4 결과처리

확산접합 열교환기의 수력직경과 레이놀즈수는 Cowell⁽⁹⁾에 의해 제시된 방법을 이용하여 계산하였고 식 (4)와 (5)에 나타내었다.

$$D_h = \frac{2W_{ch} \times H_{ch}}{W_{ch} + H_{ch}} \quad (4)$$

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} \quad (5)$$

여기서, W_{ch} 는 채널의 폭, H_{ch} 는 채널의 높이이며 v 는 각 채널로 분배된 작동유체의 유속이다. 고온측과 저온측의 열전달율은 식 (6)과 (7)을 이용하여 구하였다.

$$Q_h = \dot{m}_h C_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (6)$$

$$Q_c = \dot{m}_c C_{p,h} (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (7)$$

여기서, 첨자 h와 c는 고온측과 저온측을 i와 o는 입구와 출구를 나타낸다.

총괄 열전달계수는 대수평균온도차(LMTD)와 평균 열전달률(Q_m)을 이용하여 식 (10)과 같이 구하였다.

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})}{\ln \left[\frac{(T_{h,i} - T_{c,o})}{(T_{h,o} - T_{c,i})} \right]} \quad (8)$$

$$Q_m = \frac{Q_h + Q_c}{2} \quad (9)$$

$$U = \frac{Q_m}{A_s \Delta T_{LMTD}} \quad (10)$$

확산접합 열교환기의 경우 고온측과 저온측이 계속적인 대칭인 형태로 이루어져 있으므로 고온측의 전열면적과 저온측의 전열면적은 같다고 할 수 있다. 따라서

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_h} + \frac{1}{h_c} + \frac{t}{k_w} \quad (11)$$

이다. 누설수는 식 (12)와 같이 구하였고 마찰계수 f 는 식 (13)을 이용하여 구하였다.

$$Nu = \frac{h D_h}{k} \quad (12)$$

$$f = \frac{2\Delta P \cdot D_h}{\rho u^2 L} \quad (13)$$

3. 결과 및 고찰

Fig. 5는 질량유량에 따른 지그재그채널 PCHE의 열전달률을 나타낸 것이다. 고온측 작동유체의 온도는 80℃, 저온측 작동유체의 온도는 20℃로 고정한 상태에서 동일한 질량유량으로 평균 열전달률을 비교하였다. 질량유량이 증가함에 따라 지그재그채널 PCHE 모든 각도에서 열전달률이 증가하였으며, 각도가 작아짐에 따라 높은 열전달률을 보였다. 각도가 100°인 경우 180°에 비해 최대 약 11.5%의 열전달률이 상승함을 알 수 있다.

Fig. 6은 질량유량에 따른 지그재그채널 PCHE의 압력강하를 나타낸 것이다. Fig. 5과 동일한 조건에서 질량유량이 증가함에 따라 압력강하는 증가하는 일반적인 경향을 나타내었다. Fig. 5의 열전달률의 경향과는 반대로 각도가 작아짐에 따라 높은 압력강하를 보였다. 각도가 100°인 경우 180°에 비해 최대 약 1.4배의 압력강하가 증가하고 140°에 비해서는 약 27.7%의 압력강하가 증대됨을 알 수 있다. 따라서 최적의 지그재그채널 PCHE를 설계하기 위해서는 열전달률과 압력강하의 증가율을 고려해서 적절한 각도선택이 중요함을 알 수 있다.

Fig. 7은 레이놀즈수 증가에 따른 지그재그채널 PCHE의 누셀수의 변화를 나타낸 것이다. 레이놀즈수가 증가함에 따라 누셀수는 증가하는 경향을 보였으며 열전달률이 컸던 120°의 누셀수가 가장 높게 나타났다. 이는 각도가 작아지면서 지그재그 형상의 꼭지점 부근에서의 유동이 복잡해지고 이러한 현상이 열전달 성능에 유리하게 작용하였기 때문으로 사료된다.

Fig. 8은 레이놀즈수 증가에 따른 지그재그채널 PCHE 마찰계수 f 의 변화를 나타낸 것이다. 레이놀즈수가 증가함에 따라 마찰계수 f 는 감소하는 경향을 보였다. 지그재그채널 PCHE 180°와 160°는 거의 유사한 경향으로 가장 낮은 압력강하를 나타내고 있으며, 반면에 PCHE 120°와 100°가 가장 높은 마찰계수를 나타내었다.

4. 결론

지그재그채널 형상을 가지는 5종류의 PCHE의 열전달 및 압력강하 특성을 수치해석으로 평가한

결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

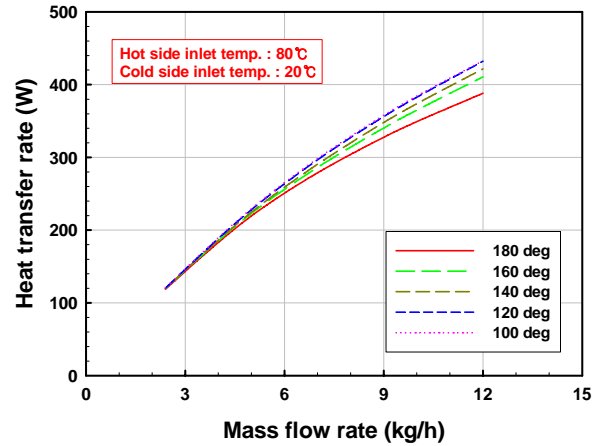


Fig. 5 Variation of heat transfer rate with the flow rate.

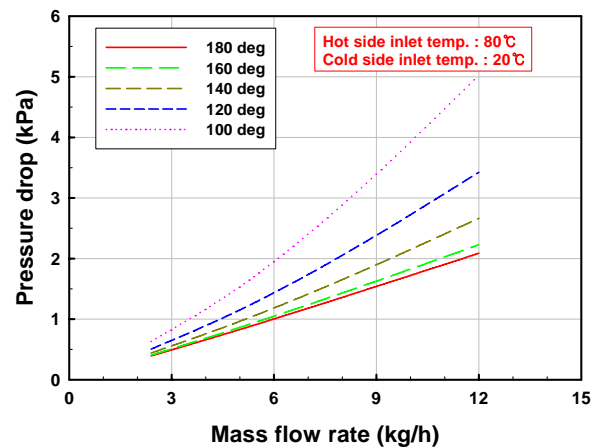


Fig. 6 Variation of pressure drop with the flow rate.

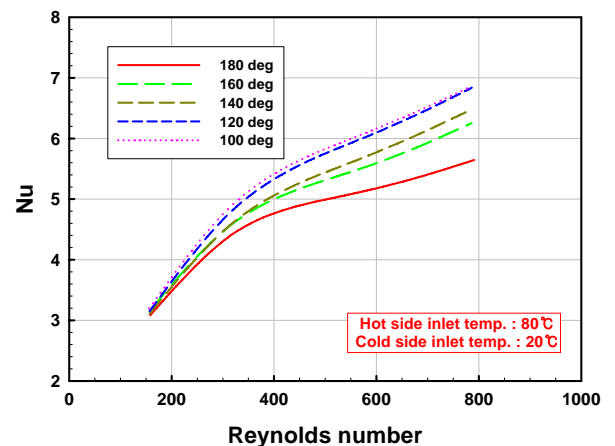


Fig. 7 Variation of Nusselt number with the Reynolds number.

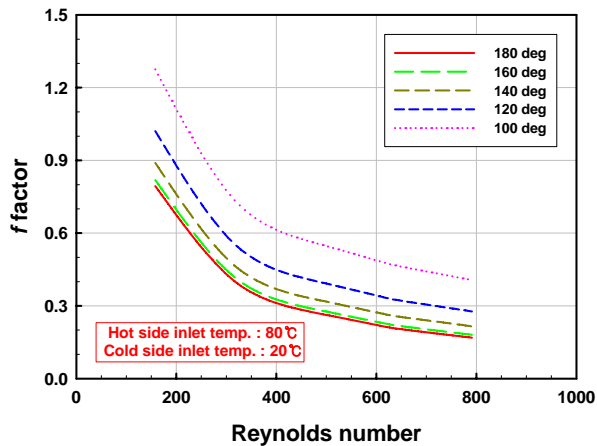


Fig. 8 Variation of f factor with the Reynolds number.

(1) 질량유량이 증가함에 따라 지그재그채널 PCHE 모든 각도에서 열전달률이 증가하였으며, 각도가 작아짐에 따라 높은 열전달률을 보였다. 각도가 100°인 경우 180°에 비해 최대 약 11.5%의 열전달률이 상승함을 알 수 있었다.

(2) 질량유량이 증가함에 따라 지그재그채널 PCHE 각도가 작아짐에 따라 높은 압력강하를 보였다. 각도가 100°인 경우 180°에 비해 최대 약 1.4배의 압력강하가 증가하고 140°에 비해서는 약 27.7%의 압력강하가 증대됨을 알 수 있었다.

(3) 레이놀즈수가 증가함에 따라 지그재그채널 PCHE의 누셀수는 증가하는 경향을 보였으며, 100°와 120°는 거의 유사한 경향으로 가장 큰 누셀수를 나타내었다.

(4) 레이놀즈수가 증가함에 따라 마찰계수 f는 감소하는 경향을 보였으며, 180°와 160°는 거의 유사한 경향으로 가장 낮은 압력강하를 나타내었다.

후 기

본 연구는 부품소재 전문기업 기술지원사업(과제번호 : 08-FS-1-0011)에 의해 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Pua, L. M. and Rumbold, S. O., 2003, Industrial Microchannel Devices - Where Are

We Today?, First International Conference on Microchannels and Minichannels, pp. 773-780.

2. Nikitin, K., Kato, Y. and Ngo, L., 2006, Printed Circuit Heat Exchanger Thermal-hydraulic Performance in Supercritical CO₂ Experimental Loop, International Journal of Refrigeration, Vol. 29, No. 5, pp. 807-814.

3. Ngo, L., Kato, Y., Nikitin, K. and Tsuzuki, N., 2006, New Printed Circuit Heat Exchanger with S-shaped Fins for Hot Water Supplier, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 30, No. 8, pp. 811-819.

4. Tsuzuki, N., Kato, Y. and Ishiduka, T., 2007, High Performance Printed Circuit Heat Exchanger, Applied Thermal Engineering, Vol. 27, No. 10, pp. 1702-1707.

5. Ngo, L., Kato, Y., Nikitin, K. and Ishiduka, T., 2007, Heat Transfer and Pressure Drop Correlations of Microchannel Heat Exchangers with S-shaped and Zigzag Fins for Carbon Dioxide Cycles, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 32, pp. 560-570.

6. Kim, Y. H., Moon, J. E., Choi, Y. J. and Lee, K. J., 2008, Heat Transfer Characteristics and Pressure Drop in Straight Microchannel of the Printed Circuit Heat Exchangers, Transaction of the KSME, Vol. 32, No. 12, pp. 915-923.

7. Kim, D. E., Kim, M. H., Cha, J. E. and Kim, S. E., 2008, Numerical Investigation on Thermal-Hydraulic Performance of New Printed Circuit Heat Exchanger Model, Nuclear Engineering and Design, Vol. 238, No. 12, pp. 3269-3276.

8. Kwon, O. K., Cha, D. A. and Yun, J. H., 2009, An Experimental Study on the Performance of Diffusion Bonding Heat Exchangers, Transaction of the KSME, Vol. 33, No. 1, pp. 53-59.

9. Cowell, T.A., 1990, A General Method for the Comparison of Compact Heat Transfer Surfaces, Transactions of the ASME, Vol. 112, pp. 288-294.