

# 채널 형상에 따른 마이크로 판형열교환기의 열적 특성 연구

김 운 호 · 서 장 원 · 문 정 은\* · 이 규 정<sup>†</sup>

## The Study on Thermal Characteristics in Micro Plated Heat Exchangers with Channel Shapes

Yoon-Ho Kim, Jang-Won Seo, Chung-Eun Moon and Kyu-Jung Lee

**Key Words:** Micro-channel(마이크로채널), Micro plated heat exchanger(마이크로 판형열교환기), Channel shape(채널 형상), Thermal characteristics(열적 특성)

### Abstract

This paper presents the thermal characteristics for micro heat exchanger with different micro-channel shapes. The shapes of micro-channel has been manufactured sheet metal by chemical etching for the I shape of straight channel and V and W shapes of chevron feature and fabricated micro plated heat exchangers using the vacuum brazing of bonding technology. The experimental study has been performed on heat transfer and pressure drop characteristics with various Reynolds number for water to water at the counter flows. The average heat transfer rate of V and W shapes has been showed about 1.5~1.6 times large than those of I shape. For the comparison of Nusselt number, it is known that the convective heat transfer of V and W shapes represent more effect than I shape. The pressure drops of V and W shapes are about 1.2~1.7 times larger than those of I shape.

#### 기호설명

$A$  : 열교환 전열면적 [ $\text{mm}^2$ ]  
 $T_c$  : 저온순환부 온도 [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $T_h$  : 고온순환부 온도 [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $C_p$  : 정압비열 [ $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ ]  
 $D_h$  : 수력직경 [ $\text{mm}$ ]  
 $k$  : 열전도계수 [ $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ]  
 $Nu$  : Nusselt number  
 $\Delta P$  : 압력강하 [ $\text{Pa}$ ]  
 $Q$  : 열전달량 [ $\text{W}$ ]

$U$  : 총괄 열전달계수 [ $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ ]  
 $Re$  : 레이놀즈 수  
 $\dot{m}$  : 질량유량 [ $\text{kg/s}$ ]  
 $\Delta T_{LMTD}$  : 대수평균온도차 [ $^{\circ}\text{C}$ ]

### 1. 서 론

판형열교환기는 우유를 살균하는 것에서부터 개발되어 현재에는 고효율의 성능을 갖는 열교환 장치로서 산업전반에 걸쳐 활용되고 있다. 특히 판형열교환기가 갖는 전열면적 대비 공간의 활용도가 높아 기존의 열교환기를 대체하여 이용되고 있다. 최근 고도의 산업화가 가속화되면서 전자 및 기계장치들의 크기가 더욱 소형화되면서 단위

---

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과  
E-mail : kjlee@korea.ac.kr  
TEL : (02)3290-33359 FAX : (02)928-9768  
\* 고려대학교 기계공학과 대학원

면적당 발열량이 매우 커지고 있는 실정이고 공간의 제약성에 따른 문제가 계속 야기되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) 기술을 이용한 마이크로 채널(Micro channel) 가공공정이 발전하여 기존 판형열교환기를 더욱 소형화하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 마이크로 판형열교환기는 단위 부피 대비 전열면적의 비가 기존 판형열교환기에 비해 매우 크기 때문에 장치의 무게를 줄이는데 효율적이고 고효율 열교환 성능을 가진다.

판형열교환기는 전열판 내에 채널 및 유로 구성을 바꾸는 방법을 통해 전열면적의 조절하였고 전열판의 표면은 전체적으로 요철구조로 되어 있어 유로내에서 유동이 강한 난류를 형성하여 열적성능이 다른 열교환기에 비해 우수한 것으로 알려져 있다. 이와같이 기존의 판형열교환기에서는 난류 유동을 유도하여 열전달을 향상시켰으나, 마이크로 채널내에서 유체흐름은 층류로 이루어졌기 때문에 기존 판형열교환기와 달라 마이크로 채널의 높이, 길이, 단면의 모양과 개수 등과 유체를 각 채널에 균일하게 분배하기 위한 방법 등 다양한 설계기술 및 연구가 필요하다. 또한 미세채널을 적용한 마이크로 판형열교환기 제작에 있어서 수십~수백장의 박판 적층 접합시 열변형 및 접합 불량을 최소화하여 고신뢰성 정밀 접합 하는 것이 제조공정 핵심기술이다.

마이크로 열교환기에 관한 기존 연구는 다음과 같다. Gromoll<sup>(1)</sup>은 작동유체로 압축공기를 사용하여 마이크로 채널을 이용한 냉각기에 관한 실험을 수행하였으며 마이크로 채널 열교환기의 열전달 계수를 제시하였다. Harris<sup>(2)</sup>등은 마이크로 직교류 열교환기에 대한 수치해석을 수행하여 최적의 열교환기 형상을 도출한 후 폴리머와 금속의 두 가지 재질을 사용하여 공기 대 물 실험을 통해 압력강하 특성을 비교하였다. Rachkovskij<sup>(3)</sup>등은 마이크로 채널의 종횡비, 적층 개수에 대한 열교환 성능 및 압력강하에 대해 연구를 수행하였다. Kang과 Tseng<sup>(4)</sup>은 마이크로 직교류 열교환기에 대해 실험을 수행하였고 이론적 모델을 제시하여 유용도와 압력강하를 비교하여 타당성을 나타내었다.

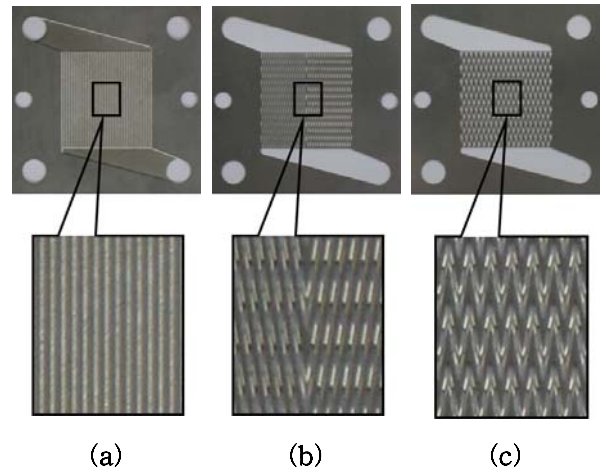
본 연구에서는 마이크로 판형열교환기의 열적 특성을 파악하기 위하여 마이크로 채널로 구성된 박판을 적층하였고 진공 브레이징 접합방식의 마

이크로 판형열교환기를 제작하여 실험하였다. 마이크로 채널 형상은 직관 채널과 세브론 형상을 가지는 V 형상과 W 형상을 제작하였다. 대향류의 물 대 물 실험을 수행하여 채널 형상에 따른 마이크로 판형열교환기의 열전달 및 압력 강하 특성을 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 마이크로 판형열교환기

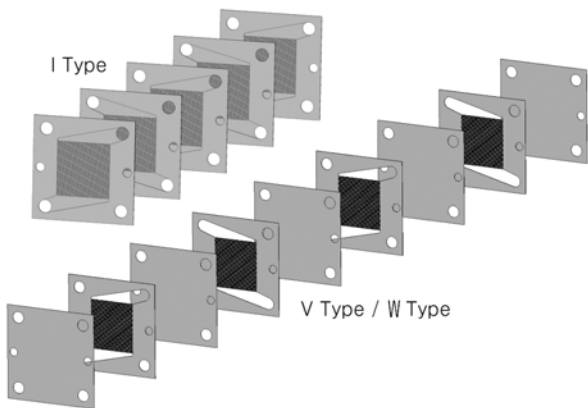
Fig. 1은 본 실험에서 사용한 마이크로 채널 형상을 가진 박판과 채널형상을 확대하여 나타내었다. 마이크로 채널 가공은 습식의 등방성 식각방법을 사용하였다. 여기서 직관 채널을 I 형상, 세브론 모양의 채널을 V 형상, W 형상이라 하였다.



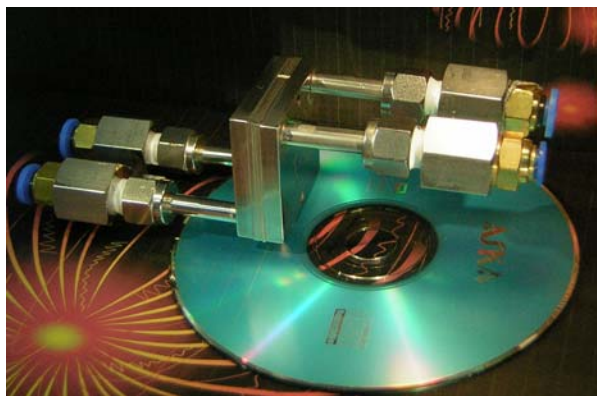
**Fig. 1** Photos of the micro-channel plate with each channel shapes : (a) I type (b) V type (c) W type.

**Table 1** Specifications of the micro plate heat exchangers.

Characteristics	I	V	W
Dimensions (W×L×H), mm	40×40×0.3	40×40×0.2	
Total plate	25 + 2 (end plate)		
Number of thermal plate	12		
Plate material	STS-304		
Thermal plate (W×L), mm	20.1×20.1		
Channel width	300 μm		
Channel height	200 μm		
Chevron angle	Straight	80°	80°



**Fig. 2** The stack structures for micro heat exchanger with I, V and W type.

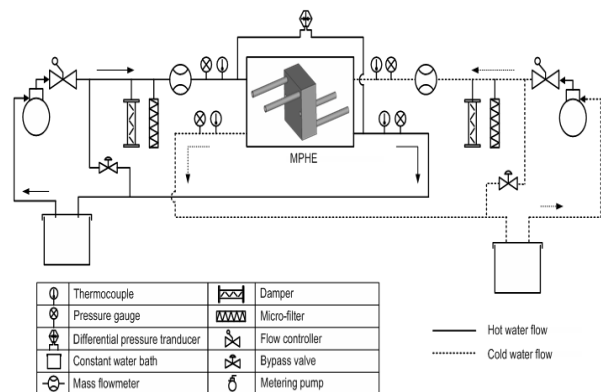


**Fig. 3** Micro heat exchanger.

I 형상은 단면식각, V, W 형상은 양면식각을 통해 마이크로 채널 박판을 제작하였다. V, W 형상은 고온과 저온유체가 열교환 할 수 있도록 두께 100  $\mu\text{m}$ 의 중간판을 교대로 배열하였다. 마이크로 판형열교환기 상세한 제원은 Table 1에 제시하였다. 각 박판과 엔드프레이트, 매뉴폴드를 진공로에서 용가재(Filter metal)와 함께 브레이징(Brazing)되어 접합하여 일체형인 마이크로 판형열교환기가 제작된다. Fig. 2와 Fig. 3에 적층 및 배열구조와 마이크로 판형열교환기를 나타내었다.

## 2.2 실험장치

Fig. 4은 본 연구에 사용된 실험장치를 나타내고 있다. 실험장치는 고온 순환부, 냉각수의 저온 순환부, 그리고 고온 유체와 저온 유체가 열교환하는 시험부로 구성된다. 고온 및 저온 순환부에서는 작동유체의 일정 온도를 유지하기 위한 항



**Fig. 4** Schematic diagram of experimental apparatus.

온조, 일정 유량을 보내는 정량펌프, 맥동 방지를 위한 댐퍼(Damper), 작동유체 내에 이물질을 여과하기 위한 마이크로 필터를 사용하였다. 외부와의 열교환을 최소화하기 위해 실험장치 전구간에 걸쳐 단열처리를 하였다. 시험부에서는 작동 유체의 온도, 압력, 유량을 측정하기 위해 유입/유출부에 질량유량계, 열전대, 압력계 및 차압계를 설치하였다. 각 측정 장치들에 대해 보정(Calibration)을 수행한 후 이를 통하여 유량, 온도, 차압 등을 측정하였으며 모든 결과 데이터는 DAQ 시스템을 이용하여 저장하였다.

## 2.3 실험조건 및 결과처리

마이크로 판형열교환기의 열전달 및 압력강하량을 측정하기 위해 작동유체는 DI-water를 사용하였으며 대항류 조건으로 실험을 수행하였다. 마이크로채널 형상별 실험 온도조건은 저온 순환부 입구측 20°C, 고온순환부 입구측 50°C로 설정하였다. 유량조건은 마이크로 채널의 수력직경을 계산하여 레이놀즈수로 계산하여 저온 순환부는 레이놀즈수 200에 해당하는 유량이 흐르도록 고정하였다. 고온 순환부는 레이놀즈수 150~300에 해당하는 유량이 흐르도록 설정하였다. Table 2은

**Table 2** Operating conditions of micro plate heat exchangers.

Characteristics	I	V	W
Operating fluid	DI-water		
Temperature of Cold fluid	20 °C		
Temperature of Hot fluid	50 °C		
Reynolds number of Cold fluid	200		
Reynolds number of Hot fluid	150 ~ 300		

본 실험에서 수행한 실험범위를 나타내었다.

마이크로 관형 열교환기의 수력직경과 레이놀즈수는 식(1)과 식(2)에 의해 구할 수 있다.

$$D_h = \frac{4 \times A_c}{P} \quad (1)$$

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} = \frac{D_h \dot{m}}{\mu A_c} \quad (2)$$

시험부의 저온 측과 고온 측의 열전달율은 식(3)과 식(4)를 이용하여 구하였다.

$$Q_c = \dot{m}_c C_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (3)$$

$$Q_h = \dot{m}_h C_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (4)$$

총괄 열전달계수는 대수평균 온도차(LMTD)방법에 의해 식(5)으로부터 결정되고 Nusselt Number는 식(6)을 의해 사용하여 구한다.

$$U = \frac{Q_m}{A \Delta T_{LMTD}} \quad (5)$$

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad \begin{cases} \Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,o} \\ \Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,i} \end{cases}$$

$$Q_m = \frac{Q_h + Q_c}{2}$$

$$Nu = \frac{U D_h}{k_f} \quad (6)$$

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 열전달 특성

대향류의 물 대 물 실험조건으로 마이크로 채널 형상의 I, V와 W에 대해 레이놀즈수와 총괄 열전달계수를 Fig. 5에 나타내었다. 총괄 열전달계수는 I 형상과 비교하여 V 형상은 약 1.87~1.92배 정도 향상되었으며, W 형상은 약 1.96~2.11배 정도 높게 나타났다. Fig. 6은 마이크로 채널 형상의 I, V와 W에 대해 레이놀즈수에 따른 저온 측과 고온측의 평균 열전달율을 보여준다. V나 W 형상의 경우 I 형상보다 약 1.5~1.6배정도 열전달이 크게 증가하였으며, W 형상은 V 형상보

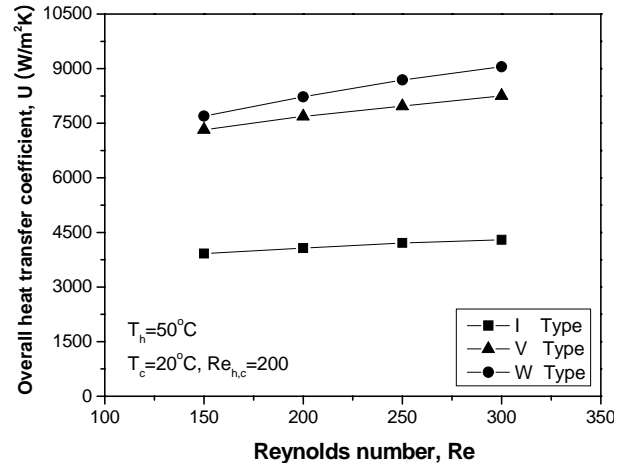


Fig. 5 Effect of Reynolds number on overall heat transfer coefficient with I, V and W type.

다 약간의 열전달이 증가한 결과를 나타낸다. 레이놀즈수가 증가할수록 V나 W 형상의 열전달율과 I 형상의 열전달율의 차이가 커짐을 보인다. 결과와 같이 V, W 형상의 경우, I 형상보다 채널 내 지그재그 유동이 이루어지면서 유체의 혼합이 활발하고 열교환기 접수면적이 증가하여 열전달의 상승효과를 볼 수 있다. 레이놀즈수의 증가는 V, W 채널 형상에 의해 활발한 유체의 섞임이 더욱 크게 나타난다. W 형상은 유체의 지그재그 유동을 더욱 활발하기 위해 설계를 하였지만 V 형상과 비교하여 큰 열전달 향상을 나타나지 않았다. 이는 V 형상과 열전달 접촉면적이 거의 같으며 지그재그 유동도 유사하여 큰 상승효과가

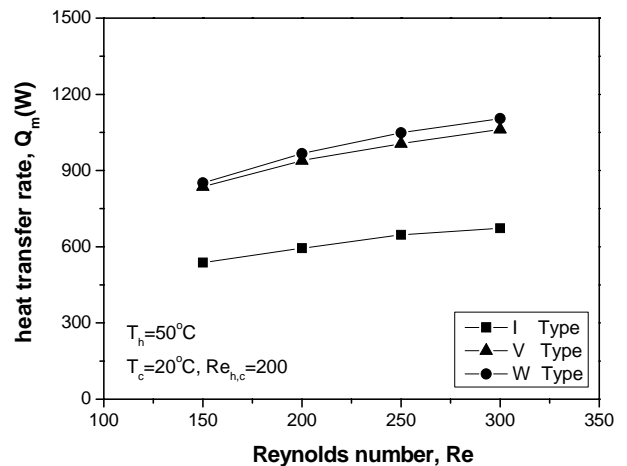


Fig. 6 Effect of Reynolds number on heat transfer rate with I, V and W type.

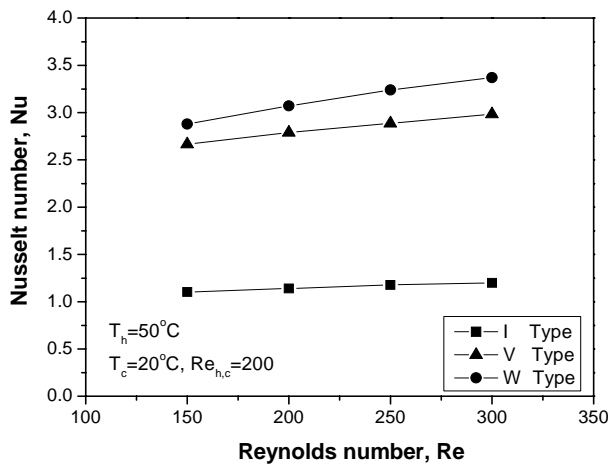


Fig. 7 Effect of reynolds number on overall heat transfer coefficient with I, V and W type.

나타나지 않았다고 판단된다.

Fig. 7은 레이놀즈수에 따른 Nu 수를 나타내었다. I 형상의 경우 레이놀즈수에 따라 큰 변화가 없음을 볼 수 있으며 그 크기가 1.0에 가깝게 나타난다. Nu 수의 경우 유체와 고체 표면 사이에서 열을 주고받은 비율을 나타내는 무차원수로 1.0에 가까울수록 대류에 의한 열전달만큼 전도에 의한 열전달이 주요하다는 것을 의미한다. 즉, I 형상은 레이놀즈수에 따른 열전달 향상이 크지 않으며 이는 열교환기 내 대류에 의한 열전달 향상이 크지 않다는 것을 의미한다. V, W의 형상의 경우 Nu 수가 약 2.6 ~ 3.3정도 나타나므로 대류에 의한 열전달이 크게 나타나 열전달 향상이 이루어진다고 판단된다. 그러나 기존의 열교환기 내에서는 레이놀즈수에 따른 큰 상승효과가 나타나는데 이는 매크로(Macro)한 상태에서 난류 촉진효과로 인한 영향이지만 본 실험에서는 마이크로 채널 내 층류 유동에 의한 영향이 크기 때문에 열전달의 큰 상승은 나타나지 않는다고 판단된다.

마이크로 판형열교환기의 경우 전열판 내의 마이크로 채널형상 변경에 의해 전열면적 상승이 커지며 유체의 활발한 섞임 현상이 열전달 성능 향상에 큰 영향인자로 확인할 수 있다.

### 3.2 압력강하 특성

Fig. 8은 마이크로 채널의 I, V와 W형상에 대해 레이놀즈수에 따른 압력강하를 나타내었다. 모든 형상에 대해 레이놀즈수가 증가함에 따라

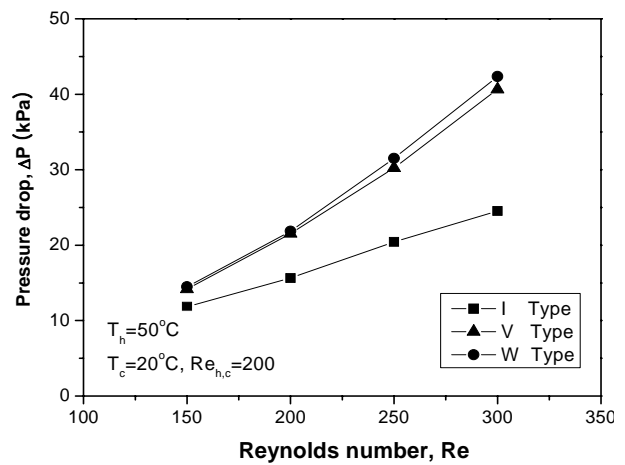


Fig. 8 Variation of pressure drop with reynolds number with I, V and W type.

압력강하량이 증가하는 것을 잘 나타내고 있다.

V, W 형상의 경우 레이놀즈수가 증가할수록 압력강하가 크게 증가하며 I 형상과 비교하여 레이놀즈수 150에서 약 1.2배, 레이놀즈수 300에서 약 1.7배정도 높게 나타났다. 이러한 이유는 직관 채널에 비하여 V, W 형상이 서로 뒤집어져 맞붙어있어 유동이 지그재그 형태로 흘러 압력차가 더욱 크게 발생한다. V 형상과 W 형상의 압력강하량을 비교하여 열전달율과 마찬가지로 큰 차이가 없음을 보인다. 이는 채널 내 세브론각이 80도로 동일하며 지그재그 유동이 유사하여 압력손실이 V형상과 큰 차이가 없다고 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 마이크로 채널형상 변경에 따른 마이크로 열교환기의 열적 특성인 열전달과 압력강하를 연구하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 직관 채널의 I 형상과 세브론 형상의 V와 W 형상의 박판을 제작하고 진공 브레이징 접합 기술을 사용하여 3가지 채널형상의 마이크로 판형열교환기를 제작하였다.
- (2) 대향류인 물 대 물 실험을 비교한 결과 V, W 형상이 I 형상보다 총괄 열전달계수가 1.87~2.11배정도 높았고, 평균 열전달율의 경우 약 1.5~1.6배정도 높은 성능을 나타내었다.
- (3) I, V와 W 형상의 Nu 수를 통해 I 형상은

전도에 의한 열전달이 영향이 크며, V, W의 형상은 대류에 의한 열전달이 크기 때문에 열전달 성능이 우수하였다.

(4) V, W 형상은 서로 뒤집어져 맞붙어있어 유동이 지그재그 형태로 흘러 압력차가 더욱 크게 발생하여 I 형상보다 약 1.2~1.7배정도 높은 압력강하량을 나타내었다.

마이크로 관형열교환기의 진공 브레이징 기술을 이용하여 마이크로 채널 형상별 제작을 실시하여 실험을 통해 열적 특성을 살펴보았으며, 차후에는 구체적인 유동 특성과 다양한 조건에서의 실험적 연구가 필요할 것이다.

## 후 기

본 연구는 에너지관리공단(에너지기술 학술진흥사업 : 2006-E-CM03-P-03-0-000-2006)지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

(1) Gromoll, B., 1998, "Micro Cooling Systems for High Density Packaging," *Revue Générale de Thermique*, Vol. 37, No. 9, pp.781-787.  
(2) Harris, C., Kelly, K. and Wang, T., McCandless, A., Motakef, S., 2002, "Fabrication,

Modeling and Testing of Micro-Cross-Flow Heat Exchangers," *Journal of MEMS*, Vol. 11, No. 6, pp.726-735.

(3) Rachkovskij, D. A., Kussul, E. M. and Talayev, S. A., 1998, "Heat Exchange in Short Microtubes and Micro Heat Exchangers with Low Hydraulic Losses," *Microsystem Technologies*, Vol. 4, No. 3, pp.151-158.  
(4) Kang, S. W. and Tseng, S. C., 2007, "Analysis of effectiveness and pressure drop in micro cross-flow heat exchanger," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, No. 5-6, pp.877-885.  
(5) Kang, S. W., Chang, Y. T. and Chang, G. S., 2002, "The manufacture and test of (1 1 0) orientation silicon based micro heat exchanger," *Journal of Science and Engineering*, Vol. 5, No. 3, pp.129-136.  
(6) 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," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, No. 10, pp.1209-1225.  
(7) Han, D. H., Lee, K. J. and Kim, Y. H., 2003, "The Characteristics of Condensation in Brazed Plate Heat Exchangers with Different Chevron Angles," *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 43, No. 1, pp.66-73.