

대향류 마이크로 채널 판형 열교환기의 열전달 특성 실험적 연구

서 장 원, 김 윤 호*, 문 정 은*, 이 규 정†

고려대학교 기계공학과 대학원, *고려대학교 기계공학과 대학원, † 고려대학교 기계공학과

An Experimental Study on Heat transfer Characteristics in Micro Plate Heat Exchangers with Counter flow of Microchannel

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

Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

ABSTRACT: Microscale heat transfer and microfluidics have become increasingly important to overcome some very complex engineering challenges. The use of very small passages to gain heat transfer enhancement is a well documented method for achieving high heat flux dissipation. As the passage size is decreased, the heat transfer performance increases but the pressure drop increases sharply when the passage size is reduced. In this study, the performance evaluation of micro plated heat exchangers under the counter flows with straight, V-shaped and Y-shaped channel are carried out.

Key words: Counter flow(대향류), Vacuum brazing(진공 브레이징), Eching(식각), plate heat exchanger(판형 열교환기), Chevron angle(주름각), Microchannel(마이크로채널), Heat transfer(열전달), Pressure drop(압력강하)

기 호 설 명

k : 열전도계수 [W/m·k]

그리스 문자

Re : 레이놀즈 수
A : 전열면적 [m²]
C_p : 정압비열 [kJ/kg·K]
T : 온도 [°C]
Q : 열전달량 [W]
ṁ : 질량유량 [kg/s]
ΔP : 압력강하 [Pa]
D_h : 수력직경 [m]
ΔT_{LMTD} : 대수평균 온도차 [K]
h : 열전달계수 [kW/m²k]

μ : 점성 계수
α : 세브론 각

하첨자

h : 고온 유체
c : 저온 유체
i : 입구
o : 출구

† Corresponding author

Tel.: +82-2-3290-3359; fax: +82-2-928-9768

E-mail address: kjlee@korea.ac.kr

1. 서 론

전자 기기와 기계장치들의 소형화 및 그에 따른 공간적 제한 그리고 단위 면적당 발열량 증대로 이를 해소화 할 수 있는 최적의 열교환기 개발이 요구되는 실정이다. 마이크로 판형 열교환기의 전반적인 특징은 작은 수력직경과 낮은 유속, 이에 대한 시스템 전체 작동 범위 유로 내에서 층류 특성을 나타낸다. 마이크로 채널의 특성길이에 따라서 작은 유로 공간을 구성하고 열전달률을 높일 수 있는 장점이 있지만 반면 비례하게 입, 출구의 압력강하량은 증가하게 된다. 또한 이와 더불어 관련된 시스템 전체에 압력강하량이 증가하는 경향을 보인다. 따라서 열교환기 채널형상을 디자인 할 때 이를 고려하여 상반되는 두 가지 관계에서 최적의 조건을 찾아야 할 것이다. 좁은 공간상에서도 단위부피당 전열면적을 최대화 시킨 고성능의 열교환기 개발에 대한 연구가 활발히 진행 중인 가운데 마이크로 열교환기에 대한 관심은 점점 높아지고 있는 추세이며, 최근 MEMS 분야의 발전으로 초소형 미세 가공기술들이 많이 이용되고 있다.

Focke⁽¹⁾는 1986년 판형 열교환기의 흡의 형상과 배열에 따른 최적조건을 결정하는 방법에 대하여 Colburn j인자, 마찰계수, Reynolds수의 항으로 나타내어 상기의 조합에 따라 최적의 표면형상을 찾아내어 단위면적당 총괄열전달계수를 높여 전체 전열면적을 감소시키는 방법을 발표하였다. 마이크로채널을 이용한 열교환기의 압력강하에 대한 연구 Gromoll⁽²⁾은 공기를 작동 유체로 마이크로 채널 냉각기에서 체적유량의 증가에 따라 압력강하가 선형적으로 증가함을 보였으며, 체적유량이 0.18~0.8 m³/hr일 때 6~84 kpa의 압력강하량을 나타내었다. Ngo⁽³⁾는 PCHE를 이용한 온수 공급용 열교환기에 대한 연구를 수행하여 유로 내에 S형상의 핀을 구성하고 작동유체는 CO₂ : H₂O에 관하여 수치해석을 수행하였다.

본 연구에서는 I형상의 직관 채널을 기준으로 2차원 평면상이 아닌 3차원 공간상에서의 혼합효과를 고려한 마이크로 채널 V, Y형상으로 양면 식각하여 진공 브레이징 접합기술로 제작하였다. 고온부 채널 6장과 저온부 채널 7장, 총 13장의 마이크로 채널 판들을 각 형상별로 균일하게 적층하여 제작된 마이크로 판형 열교환기에 대하여 정상상태 도달 후 대향류 조건 아래 물을 작동 유체로 실험을 수행하였다. 정해진 일정은

도 내에서 유량 및 레이놀즈수 변화에 따른 열전달 및 압력강하 특성을 비교 분석하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig 1.은 실험장치의 순환 구성도를 나타내고 있다. 크게 두 부분으로 나누어 저온 유체 순환부와 고온 유체 순환부로 구성되어 있다. 고온부 유체와 저온 유체는 항온조로부터 시작하여 마이크로 펌프, 필터를 통과 후 유량계와 압력계를 거쳐 마이크로 판형 열교환기를 통과 후 다시 항온조로 되돌아와 재순환 할 수 있도록 구성하였다. 대향류 조건으로 마이크로 판형 열교환기의 서로 반대되는 입, 출구 포트 부분을 통과하게 되며 이 사이에 저온과 고온 유체의 열교환이 이루어진다. 입, 출구 연결부 사이마다 압력계와 T형 열전대(Thermocouple)를 설치하여 열교환이 이루어지는 전, 후의 온도와 압력을 측정하였고 저온부에는 압력계, 고온부에는 차압계를 설치하여 작동유체의 유, 출입 시 생기는 압력차를 측정하였다. 작동유체는 DI-Water를 사용하였고 마이크로 채널 특성상 채널 단면적이 매우 작으므로 막힘을 방지하기 위해 1 μm까지 여과 할 수 있는 마이크로 필터를 사용하였다. 밸브로 유량을 조절할 수 있는 동관 연결부위 사이에 체크 밸브를 고온, 저온부에 각각 설치하였다. 특히 낮은 유량에서는 입, 출구 부분에 낮은 압력과 시스템 연결부의 높이 차로 인하여 발생하는 요인으로 유량이 빠져나가지 못하고 역류 하거나 정체되는 현상을 관

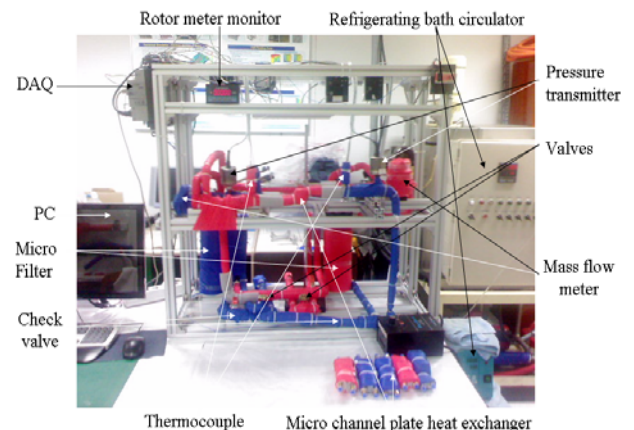


Fig. 1 The diagram of experimental apparatus for the micro plated heat exchanger.

찰 할 수 있다. 이를 방지하기 위해 마이크로 펌프에서 보내는 유량을 미세 조절 할 수 있는 밸브와 역류를 방지하기 위하여 체크(Check) 밸브를 설치하였다.

2.2 시험 열교환기

마이크로 채널 판형 열교환기의 형상과 크기는 Table 1과 Fig 2에 나타내었다. 직관 마이크로 채널 열교환기는 마이크로 단위 길이 특성의 유동 면적을 가지므로 직관을 지나는 유체의 속도가 빠르거나 적더라도 층류의 유동 특성을 지니고 있다. 단순한 유동 패턴의 2차원적인 직관 채널 보다 3차원 공간상에서 유동 형태가 나타난다면 기존의 열교환기 보다 효율이 높은 열전달 특성을 나타낼 것이라 예상하여 제작 하였다. 3차원 유동 패턴으로 위, 아래 유동장이 형성 되면 2차유동 발생으로 인해 직관 채널보다 더 높은 열전달 효율을 나타내게 될 것이라 기대하여 V 형상과 Y형상의 마이크로 채널을 제작하였다. V 형상은 세브론각 80° 로 제작되었고 Y 형상은 분리 길이 700 μm , 섞임 길이 300 μm 로 제작하였다. 채널은 젖음식각(Wet etching)방법을 이용하여 금속박판에 채널 형상을 제작하였다. 직관채널은 단면식각으로 상단부에서 200 μm 깊이로 식각하였다. V, Y형상의 마이크로 채널경우 V, Y형상인 100 μm 깊이로 식각된 면 반대편에 역방향으로 식각 하였다. 직관 채널은 단면으로만 식각되어져 분리판 없이 전열판 만으로도 적층이 가능하다.

Table. 1 Specifications of the micro plated heat exchangers

Characteristics	Straight	V, Y shape
Dimensions (W×L×H), mm	40×40×0.3	40×40×0.2
Total plate	13+2(End plate)	13+2(End plate) 13+2(End plate)
Number of thermal plate	6	6
Plate material	STS-304	
Thermal plate (W×L), mm	20.1×20.1	
Channel width	300 μm	300 μm
Channel height	200 μm	100 μm
Chevron angle	-	80°(V-shape)
Separation length	-	700 μm (Y-shape)
Mixing length	-	300 μm (Y-shape)



Fig. 2 The photos of straight and Y, V-shaped channel in metal sheet.

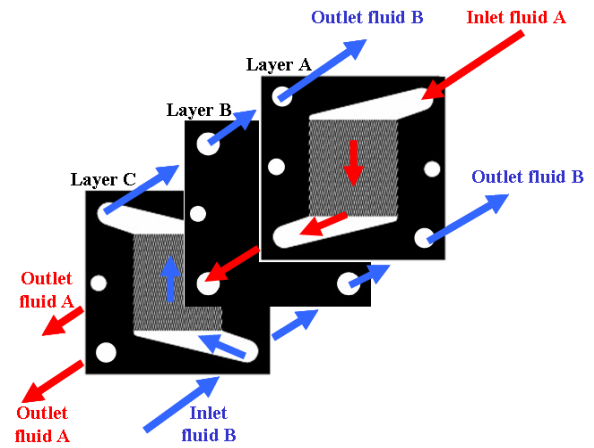


Fig. 3 Schematic of design and flow configuration of a plate type counter flow plate heat exchanger

반면 V, Y 형상 채널의 경우 양면 식각 이므로 저온, 고온 유체가 서로 섞이지 않도록 분리판을 각 한장씩 사이마다 끼워 넣어 적층 한다. Fig. 3 은 저온, 고온 유체의 유로 패턴과 V, Y 채널의 적층 형태를 나타낸다. 위와 같은 방식으로 각 입, 출구의 유로 공간은 한 장씩 서로 다른 방향으로 엇갈려 적층한 후 엔드플레이트(End plate)를 결합하고 유입관 및 유출관 포트를 연결 하였다. 엔드플레이트를 결합한 이유는 입, 출구 연결 부분의 용이함과 마이크로 열교환기의 구조적 강도를 높이기 위해서이다. 이렇게 배열된 마이크로 채널 판은 게스킷(Gasket)을 사용하지 않고 진공 브레이징(Vacuum brazing)을 이용하여 접합해서 마이크로 채널 판형 열교환기를 제작 하였다. 진공 브레이징은 섭씨 450° 이상의 녹는점 온도를 가진 용가재를 사용하여 진공상태에서 모재의 녹는점 이하의 열을 가하여 모재를 접합한다. 장점은 모재의 변형이나 잔류응력이 없어 게스킷 보다 높은 내압에 견딜 수 있으며 비용 절감과 대

량 생산에도 적합하다.

2.3 실험조건 및 방법

실험을 수행하기 전에 설정된 온도로 마이크로 열교환기 및 전체 시스템 연결부에 1시간 이상 흐르게 운전하여 모든 시스템 내부에서의 예열과 실험장치 내로 들어간 기포를 제거 하였다. 작동 유체가 흐르는 모든 연결 부위는 6mm 동관을 사용하였으며 열손실을 고려하여 모두 단열 처리하였다. 저온, 고온부의 펌프 유량을 조절하고 항온조의 온도가 실험 조건에 맞도록 설정된 후 정상상태에 도달 하였다라고 판단되면 데이터를 수집하기 시작하였다. 저온 순환부에는 질량유량(Mass flow rate) 208 g/min에 해당하는 조건으로 유량이 흐르도록 고정하였으며 열교환기의 고온측 순환부 입구온도는 40℃, 저온측 순환부의 입구온도는 20℃로 실험을 수행하였다. 각 채널별 열교환기 마다 저온측 고정, 고온 측에서만 유량 변화시켜 가면서 174~1420 g/min, 레이놀즈수 63~500 범위에 해당하는 유량범위의 조건으로 마이크로 채널 판형 열교환기의 열전달 성능 및 압력강하에 대한 실험 결과에 대하여 비교, 관찰 하였다.

2.4 실험관계식

2.4.1 무차원 변수

수집한 데이터는 산술 평균하여 평균값을 대표값으로 하였다. 마이크로 판형 열교환기의 수력직경과 레이놀즈수는 식(1)과 식(2)로부터 구할 수 있다.

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

$$Re = \frac{\rho D_h u}{\mu} = \frac{GD_h}{\mu} \quad (2)$$

여기서 G는 채널당의 질량 유속을 나타낸다.

2.4.1 열평형 해석

저온측과 고온측의 열전달률은 식(3)과 식(4)를 이용하였다.

$$Q_h = \dot{m}_h c_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (3)$$

$$Q_c = \dot{m}_c c_{p,h} (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (4)$$

열교환 되는 오차는 식(5)으로 나타내어 5%의 오차 범위 이내에서 열교환이 이루어지도록 하였다.

$$Error(\%) = \left| \frac{Q_h - Q_c}{Q_h} \right| \times 100 \quad (5)$$

대향류에서 열교환기의 대수평균온도차(LMTD)는 입, 출구 온도를 측정하여 식(6)으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln[\Delta T_1 / \Delta T_2]} \quad \begin{cases} \Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,o} \\ \Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,i} \end{cases} \quad (6)$$

대수평균온도차(LMTD)를 Q_{ave} 로 나타내면 식(7)과 같다.

$$Q_{ave} = UA \Delta T_m \quad \left\{ Q_{ave} = \frac{Q_c + Q_h}{2} \right\} \quad (7)$$

여기서 U는 총괄열전달계수, A는 유체와 접하는 열교환기의 표면적이다.

펌핑 동력(Pumping power)은 다음 식 (9)로부터 구한다.

$$Pumping\ power(W) = \frac{\Delta P \cdot \dot{m}}{\rho} \quad (9)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 열전달 특성

정상상태 도달 후 대향류 조건으로 저온 및 고온 입구에 대하여 역방향으로 유량이 흐르게 하였다. 최저유량에서부터 최대유량까지 범위를 늘려가며 대향류에 대한 열전달 특성을 Fig. 4에 나타내었다. 저온 입구의 유량은 208 g/min에 해당하는 유량에 맞춰 흐르게 하였으며, 고온 입구측에서는 174~1420 g/min, 레이놀즈수 63~500 범위에 해당하는 유량범위로 변화 시켜가며 열전

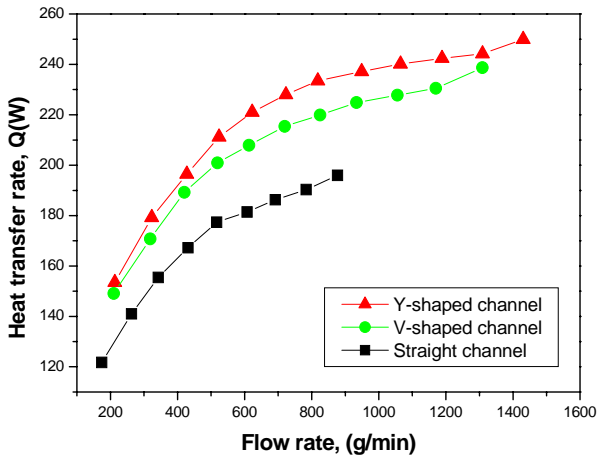


Fig. 5 Heat transfer rate versus Flow rate for straight and V, Y-shaped channel on the micro plated heat exchangers.

달률에 대한 변화를 관찰 하였다. 직관 채널과 V, Y 형상 채널의 전열판 적층수는 모두 동일하게 비교하였으며 직관 채널의 경우에서 유량이 174 g/min인 경우 열전달률은 122 W로 가장 낮은 열전달률을 나타내었다. 유량의 증가에 따라 517 g/min 까지 뚜렷한 열전달 상승률을 보이지만 이후 점차 완만하게 상승한다는 결과는 마이크로 채널 특성상 층류에 대한 영향이 크다는 것을 짐작 할 수 있다. 직관 채널과 비교하여 V 형상은 약 1.2배 상승률을 보이며 Y 형상은 약 1.3배 상승률을 보였다. Fig. 6에서는 레이놀즈수 변화에 대한 열전달 특성을 나타내었다. Fig. 5에서와 같이 비슷한 열전달률 증가 추세를 보이며 레이놀즈수 비교에 대한 채널 형상별 수력직경 차이로 인한 변화 폭을 보이고 있다. 마이크로 채널의 단면적은 유체가 벽면에 닿은 안쪽부분의 가장 작은 면적으로 하였으며 V, Y 채널의 경우 유체와 직접 닿는 채널 핀(Pin)의 면적을 구하여 레이놀즈수를 계산하였다. 핀의 면적은 실제 형상과 같은 크기로 Solidworks 2006에서 모델링하여 계산하였다. V, Y채널의 전열면적이 직관채널보다 넓고 3차원 유동으로 위, 아래 혼합 형태로 채널을 통과하기 때문에 열전달 성능이 직관채널보다 높게 나타난 결과이다.

3.2 압력강하 실험결과

Fig. 7에서는 유량비와 압력강하 실험결과를 비교하여 나타내었다. 유량으로 비교할 때 직관채널

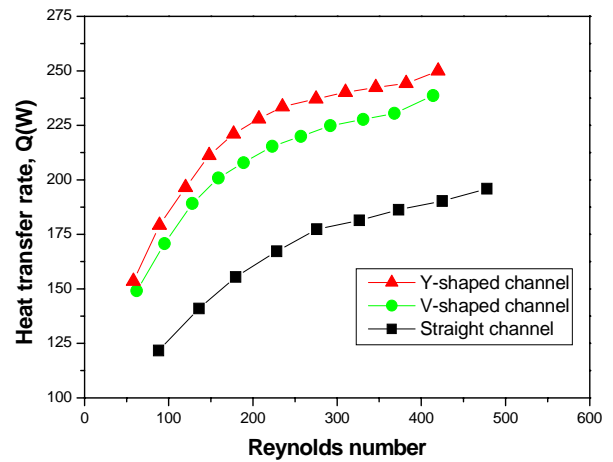


Fig. 6 Heat transfer rate versus Re for straight and V, Y-shaped channel on the micro plated heat exchangers.

의 압력강하량이 V, Y 채널 형상보다 더 높게 나타내는 경향을 보이고 있다. 이는 채널을 일직선으로 펴놓은 상태라고 가정하여 비교 하였을 때 V, Y 채널이 직관채널보다 길며 또한 형상이 복잡한 이유로 유체가 통과하는 속도는 직관채널보다 느리다. 모든 동일 유량의 조건으로 비교 할 때 V, Y 채널의 3차원적인 유동패턴의 형상으로 유체가 위, 아래를 통과시 생기는 압력강하 손실과 직관채널특성의 짧고 단순한 유동 흐름으로 입, 출구를 통과하는 빠른 유체의 속도차에 기인하여 생기는 압력강하 손실이 더 크다는 결과를 나타내고 있다. 유량 증가와 함께 압력강하량은 더욱 큰 차이를 보였다. 레이놀즈수에 대한 압력강하 특성을 Fig. 8에 나타내었다. 유량비 비교와

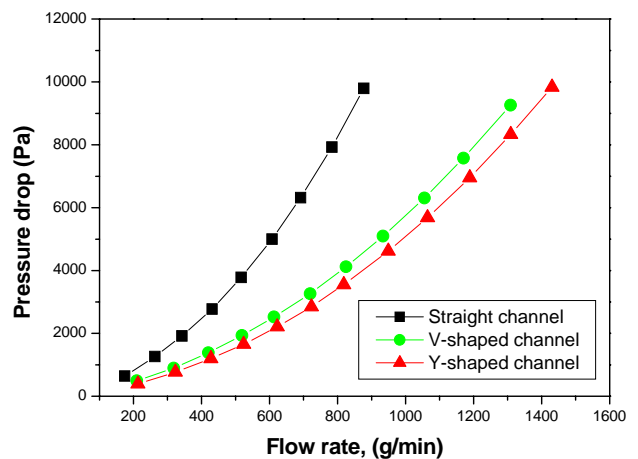


Fig. 7 Pressure drop versus Flow rate for straight and V, Y-shaped channel on the micro plated heat exchangers.

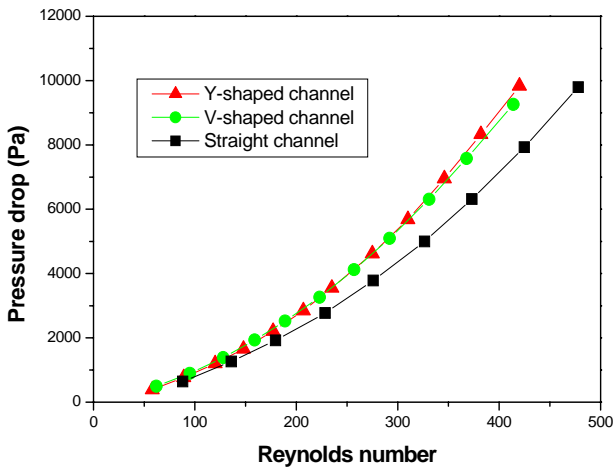


Fig. 8 Pressure drop versus Re for straight and V, Y-shaped channel on the micro plated heat exchangers.

상반되는 반대적인 경향을 나타내고 있다. 레이놀즈수에 대한 표현으로 각 채널별 특성의 수력직경 차이로 인한 결과라고 판단된다. Y 채널 형상이 V 형상과 비교하여 약간 높은 압력강하량을 나타내었고 직관 채널이 가장 낮다. 유량 증가와 더불어 레이놀즈수가 증가와 함께 직관 채널과의 압력강하량 차이를 보였다.

4. 결론

직관채널과 세브론각 80°의 V 형상, 분리길이 700 μm , 쉬임길이 300 μm 의 Y 형상 채널 마이크로 판형 열교환기를 질량유량비 및 레이놀즈수 변화에 따른 열전달 및 압력강하 특성을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 단면식각인 직관채널과 양면으로 식각하여 제작된 V, Y 형상의 마이크로 채널 판형 열교환기를 고온 전열판 6장, 저온 전열판 7장을 적층하여 진공 브레이징 접합 방법으로 제작하였다.

(2) Y 형상의 마이크로 채널이 가장 우수한 열전달 성능을 나타내었다. 직관 채널의 마이크로 판형 열교환기와 비교시 V, Y 형상의 채널을 가진 마이크로 판형열교환기가 약 1.2~1.3배 높은 열전달 성능을 나타내었다.

(3) 각 채널별 동일유량으로 압력강하량 비교시 직관채널이 가장 높은 압력강하량을 나타내었다.

V, Y 형상 채널보다 낮은 전열면적과 직관 형태의 단순한 유로 패턴으로 입, 출입 속도차에 의한 압력강하 손실이 V, Y 형상보다 더 크게 작용하였으므로 판단된다.

(4) 레이놀즈수와 압력강하량 비교를 통해 Y 형상 채널이 V 형상보다 약간 높은 압력강하량을 보이며 직관 채널이 가장 낮은 압력강하량을 나타냈다. 레이놀즈수 비교시 형상별 수력직경 길이 변화로 인하여 유량결과 비교시와 현저한 결과 차이를 나타낸다.

후 기

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

참고 문헌

1. Focke, W. W., 1986, Selecting optimum plate heat exchanger surface patterns, ASME J. Heat Transfer, Vol. 108, No. 1, pp. 153-160.
2. Gromoll, B., 1998, Micro cooling systems for high density packaging, Rev. Gen. Therm, Vol. 37, No. 9, pp.781-787.
3. Ngo, T. L., 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.
2. Mark. S., 2005, Single-phase liquid flow and heat transfer in plain and enhanced silicon microchannels, Ph.D. thesis, Rochester Institute of technology, Minneapolis, MN, U.S.A.
4. Yang, N. H., 2004, An experimental study on heat transfer characteristics and pressure drop in micro channel plate heat exchangers with the channel shape, MS thesis, Korea University, Seoul, Korea.
5. Lee, K. S., 2001, Optimal shape and arrangement of staggered pins in the channel of a plate heat exchanger, Heat and mass transfer, Vol. 44, No. 17, pp.3223-3231