

채널 형상에 따른 마이크로채널 PCHE의 열전달 및 압력강하 특성

김 윤 호, 문 정 은, 이 규 정^{*†}

고려대학교 기계공학과 대학원, ^{*}고려대학교 기계공학과

The Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics on Microchannel PCHE with various Configurations

Yoon-Ho Kim, Jung-Eun Moon, Kyu-Jung Lee^{*†}

Graduate School of Mechanical Engineering, Korea University, Anam-Dong, Sungbuk-gu, Seoul 136-701, KOREA

^{*}*Department of Mechanical Engineering, Korea University, Anam-Dong, Sungbuk-gu, Seoul 136-701, KOREA*

ABSTRACT: A microchannel PCHE is manufactured by the two technologies of micro photo-etching and diffusion bonding. In this paper, heat transfer and pressure drop characteristics by applying various configuration for the flow channel in the microchannel PCHE is experimentally investigated. The flow channel configurations are designed three types such as straight, wavy and offset strip channels. The performance experiment of each configuration is performed for Reynolds numbers in ranges of 100~700 under various flow conditions for the hot side and the Reynolds number of cold side is fixed at 350. The inlet temperatures of the hot side and cold side are conducted as 40°C and 20°C, respectively. The heat transfer performance of wavy channel, which was similar to that of offset strip channel, was much higher than that of straight channel. The effectiveness of wavy channel and offset strip channel was evaluated as about 0.5 ~ 0.9. The pressure drop of wavy channel was highest among configurations and that of offset strip channel was lower than that of straight channel because the round curved surface of each strip edge was reduced the pressure loss.

Key words: Microchannel(마이크로채널), PCHE(인쇄기판형 열교환기), Straight channel(직관 채널), Wavy channel(파형채널), Offset strip channel(오프셋 스트립 채널)

———— 기 호 설 명 ————

A_c : 최소 자유유동면적 [mm²]
 A_s : 유효 열전달 면적 [mm²]
 C_p : 정압비열 [kJ/kg·°C]

D_h : 수력직경 [mm]
 H : 마이크로 판형열교환기 높이 [mm]
 L : 마이크로 판형열교환기 길이 [mm]
 \dot{m} : 질량유량 [kg/s]
 ΔP : 압력강하 [Pa]
 Q : 열전달량 [W]
 Re : 레이놀즈수, $\dot{m}D_h / \mu A_c$
 T_c : 저온순환부 온도 [°C]
 T_h : 고온순환부 온도 [°C]

† Corresponding author

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

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

ΔT_{LMTD} : 대수평균온도차 [$^{\circ}\text{C}$]
 U : 총괄 열전달계수 [$\text{W}/\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$]
 W : 마이크로 판형열교환기 폭 [mm]
 ε : 유용도

1. 서론

일반적으로 작동유체가 흐르는 채널이 1 mm ~ 1 μm 크기로 가공하여 제작된 열교환기를 마이크로채널 열교환기(Microchannel Heat Exchanger)라고 말하며, 미세 가공기술의 빠른 발전에 따른 다양한 분야에서 사용을 위한 시도가 현재 계속 진행 중이다. 그 중에서 인쇄회로판형 열교환기(PCHE, Printed Circuit Heat Exchanger)는 마이크로 포토에칭(Photo-etching)기술의 마이크로채널과 확산접합(Diffusion bonding)을 적용한 고효율 및 고성능의 소형 열교환기로 현재 많은 관심을 가지고 연구 진행 중이다. 마이크로 포토에칭은 스테인리스 스틸의 금속박판에 유체가 통과하는 마이크로채널을 정밀하게 가공하는 기술을 말하며, 확산접합은 고체상태의 결합과정으로 용융점 아래의 온도에서 금속표면을 압착하여 표면간의 결정립 성장을 촉진시켜 결합하는 기술이다. 마이크로채널과 확산접합을 이용한 PCHE는 무게를 획기적으로 줄일 수 있으며, 고온/고압에 견딜 수 있고, 온도 근접성이 우수한 장점을 지닌 컴팩트한 열교환기이다^(1~2).

PCHE에 대한 연구로는 Nikitin et al.⁽³⁾이 초임계의 CO_2 에 대해 열전달 및 압력강하 특성을 실험하였고, 레이놀즈수에 따른 국부 열전달계수와 압력강하 인자에 대한 실험상관식을 제안하였다. Ngo et al.⁽⁴⁾은 Nikitin et al.⁽³⁾의 직관채널 PCHE를 개선하여 S 형태의 핀 형상을 가진 새로운 PCHE를 제작하여 실험하였다. 또한, 3차원 전산해석을 통해 열적 수력성능을 평가하였다. Tsuzuki et al.⁽⁵⁾은 S 형상과 다양한 지그재그 형상에 있어 3차원 전산해석을 이용하여 열전달 및 압력강하를 계산하여 열적 수력성능을 평가하였다. PCHE 연구는 현재까지 고온/고압 유체적용에 따른 열적 성능특성과 효율을 개선시키기 위한 형상 연구에 국한되어 있었다.

본 연구는 고성능 및 고효율에 따른 새로운 소형열교환기의 개발과 연구의 일환으로 마이크로채널을 적용한 PCHE를 제안하고자 한다. 또한,

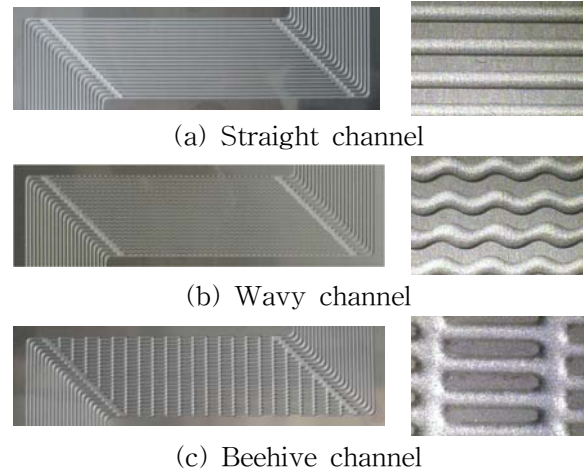


Fig. 1. Microchannel metal sheets of various configurations in microchannel PCHE.

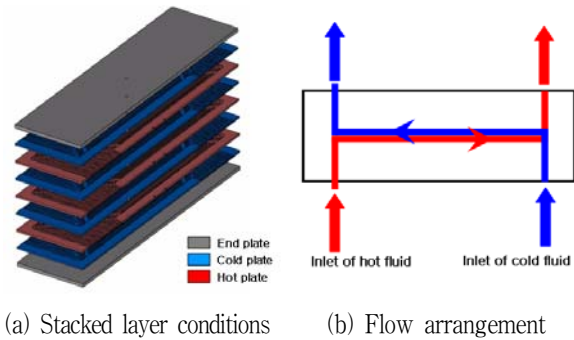


Fig. 2 The stack layer and the flow pattern of microchannel PCHE.

기존의 열교환기에 사용된 다양한 형상을 마이크로채널 PCHE의 내부 형상으로 설계하여 제작하고 그에 따른 열전달 및 압력강하 특성을 살펴본다. 이러한 새로운 소형열교환기 개념인 마이크로채널 PCHE의 형상 성능 연구를 통하여 다양한 적용분야에 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 마이크로채널 PCHE

마이크로 포토에칭 기술을 적용하여 제작된 마이크로채널 형상을 가진 금속박판을 Fig. 1에 나타내었다. 기초 형상으로 직관채널, 사인파 굴곡을 가진 파형채널, 그리고 읍셋 스트립 채널로 총 3종류의 마이크로채널 형상을 설계하여 금속박판을 제작하였다. 직관채널은 대표적인 기초형

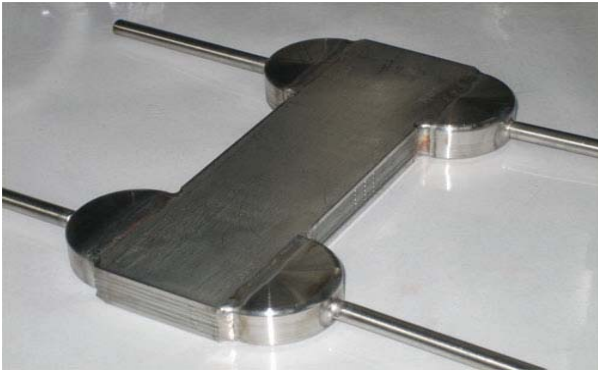


Fig. 3 Microchannel PCHE using the diffusion bonding technology.

Table 1 Specifications of microchannel PCHE.

Metal-plate material	SUS304L	
Dimensions of PCHE (W×L×H), mm	141×40×16	
Dimensions of plates, mm	141×40×1	
Dimensions of end-plates, mm	141×40×20	
Number of plates	Hot side	3
	Cold side	4
Number of channels per plates	22	
Microchannel width	800μm	
Land(solid) width	600μm	
Microchannel height	600μm	
Wavy angle and pitch	140°, 2mm	
Strip length	4 mm	

상으로 다른 형상과의 비교대상으로 적용하였다. 파형채널은 사인파 굴곡으로 벽면에서의 2차 유동 생성과 유동의 불안정성으로 인하여 큰 전열 성능을 가지는 반면 압력강하가 높은 단점을 가진다. 읍셋 스트립 채널은 스트립을 불연속적으로 지그재그 형태로 설치하여 새로운 경계층의 성장, 발달, 소멸을 반복하여 열전달 성능을 촉진시키는 역할을 하게 된다^(6,7). 본 연구에서는 3가지 형상을 마이크로채널 PCHE에 적용하여 열전달 및 압력강하를 비교하였다. 금속박판의 적층 상태와 유동 배열은 Fig. 2에 나타내었다. 고온유체를 냉각하는 목적으로 내부를 고온측 유체가 흐르고 냉각수는 외부로 감싸면서 흐르는 방식으로 적층하였고, 대향류 유동배열을 선택하였다. 마이크로채널의 자세한 사양과 적층수는 Table 1에 제시하였다. 입·출구 포트(Port)와 노즐(Nozzle)을 용접하여 일체형의 마이크로채널

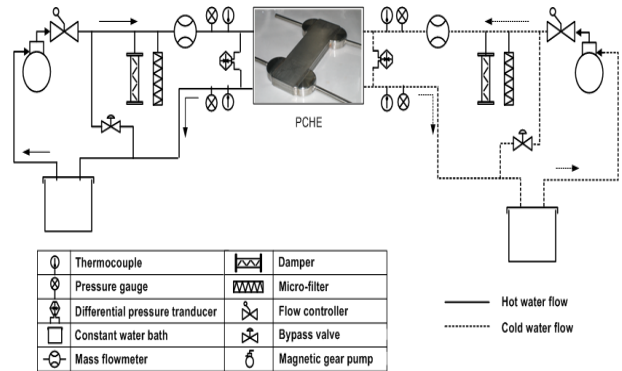


Fig. 4 A schematic diagram of experimental apparatus.

PCHE를 제작하였고 Fig. 3에 나타내었다.

2.2 실험장치

본 연구에 사용된 실험 장치를 Fig. 4에 나타내었다. 실험 장치는 고온유체 순환부, 냉각수 순환부, 고온유체와 냉각수가 열교환하는 시험부로 구성된다. 고온유체와 냉각수의 온도와 유량을 일정하게 유지하기 위해 항온조, 정량펌프를 사용하였다. 시스템의 맥동방지를 위해 댐퍼를 사용하였고, 유체의 이물질여과하기 위해 마이크로 필터를 사용하였다. 시스템 및 시험부의 열손실을 최소화하기 위해 실험장치 전 구간에 걸쳐 단열처리를 하였다. 마이크로채널 PCHE의 열교환량을 측정하기 위해 유입/유출부에 질량유량계, 열전대, 압력계 및 차압계를 설치하였다. 각 계측 장치는 보정(Calibrations)을 수행한 후 유량, 온도, 압력 및 차압 등을 데이터 수집장치를 이용하여 정상상태에서 모든 결과물을 0.5초 간격으로 저장하였다.

2.3 실험 조건 및 결과 처리

본 연구에 사용된 고온유체와 냉각수는 DI-water를 사용하였다. 고온유체에 대한 입구온도는 40°C이고 냉각수의 입구온도는 20°C의 일정한 온도조건에서 실험을 수행하였다. 고온측 레이놀즈수는 100~700 범위 내에 변화를 주었으며 저온측 레이놀즈수는 350으로 고정하여 실험을 수행하였다.

마이크로채널 PCHE의 수력직경과 레이놀즈수

는 Cowell⁽⁸⁾에 의해 제시된 방법을 이용하여 계산하였고 식 (1)과 식 (2)에 나타내었다.

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

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

여기서, A_c 는 자유유동면적(Free flow area), A_s 는 전체 열전달 면적, L_f 은 채널에서의 유동흐름 길이를 나타낸다.

본 연구에서 마이크로채널 PCHE를 동일한 작업조건 하에서 여러 개 제작하였으며, 그 중 하나를 절단 후 마이크로채널 단면에 대해 실측하여 열전달 면적과 단면적을 계산에 반영하였다.

시험부에서의 작동유체와 냉각수의 열전달율은 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 구하였다.

$$\text{---} \quad (3)$$

$$\text{---} \quad (4)$$

총괄 열전달계수는 대수평균 온도차(LMTD)와 평균 열전달량을 이용하여 구할 수 있고 식 (7)과 같다.

$$(5)$$

$$Q_{ave} = \frac{Q_h + Q_c}{2} \quad (6)$$

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

마이크로채널 PCHE에 고온유체와 냉각수간의 열교환 오차는 식 (8)을 이용하여 계산하였고 5%이내에서 결과를 저장하였다.

$$Q_{error} (\%) = \frac{|Q_h - Q_c|}{Q_h} \quad (8)$$

마이크로채널 PCHE의 유용도(Effectiveness)는 실제 열전달률과 최대 가능한 열전달률에 대한 비로 식 (9)로 계산하였다.

$$\varepsilon \equiv \frac{q}{q_{max}} = \frac{UA}{C_{min}} \frac{\Delta T_{LMTD}}{\Delta T_{max}} \quad (9)$$

$$C_{min} = \begin{cases} C_c & \text{for } (T_{c,o} - T_{c,i}) < (T_{h,i} - T_{h,o}) \\ C_h & \text{for } (T_{c,o} - T_{c,i}) > (T_{h,i} - T_{h,o}) \end{cases}$$

$$T_{max} = T_{h,i} - T_{c,i}$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 열전달특성

Fig. 5에 각 형상의 고온측 질량유량에 따른 평균열전달률을 나타내었다. Fig. 6은 고온측 질량유량을 레이놀즈수로 평가하여 나타낸 결과이다. 본 연구의 레이놀즈수 범위는 수력직경의 유효 열전달면적에 따라 영향을 미치게 된다. 금속박판 설계 시 채널 형상에 따른 유효 열전달면적을 계산하여 직관채널은 26,037mm², 파형채널은 26,486mm², 읍셋 스트립 채널은 26,497mm²이다. 직관채널의 수력직경은 0.668mm, 파형채널은 0.657mm. 읍셋 스트립 채널은 0.657mm이다. 그러므로 각 형상 설계에 따른 열전달 성능에 비교에 있어 전체 유효 열전달면적에 의한 영향이 적

Fig. 5 Average heat transfer rate vs. mass flow rate of hot side.

Fig. 6 Average heat transfer rate vs. the Re of hot side.

Fig. 7 Comparison of heat transfer performance with the Re of hot side for each configuration.

다고 볼 수 있다. Fig. 5와 Fig. 6의 결과에서도 볼 수 있듯이 질량유량이나 레이놀즈수에 따른 평균열전달률은 거의 유사한 경향을 나타낸다. 모든 형상은 레이놀즈수가 증가할수록 평균열전달률도 증가하였다. 파형채널과 읍셋 스트립 채널은 유사한 경향을 보이며, 직관채널보다 우수한 열교환 성능을 나타내었다.

평균열전달률의 결과는 고온측과 저온측의 입·출구온도차와 질량유량에 따라 변하기 때문에 각 형상의 마이크로채널 PCHE의 성능을 비교하는 지표로 사용하는데 한계가 있다. 따라서 Fig. 7에 고온측 레이놀즈수에 따른 대수평균온도차에 의한 총괄열전달계수를 계산하여 열전달 성능을 비교하였다. 파형채널과 읍셋 스트립 채널은 레이놀즈수가 증가할수록 총괄열전달계수도 증가하는 경향을 나타낸다. 파형채널은 레이놀즈수가 더욱

증가하면 읍셋 스트립 채널 보다 더 높은 열전달 성능을 보일 수 있다. 반면 직관채널은 레이놀즈수가 증가할수록 총괄열전달계수의 증가가 크지 않음을 볼 수 있다. 이는 레이놀즈수가 증가함에 따라 열 경계층도 함께 성장하여 반대측과의 열교환 성능이 감소하기 때문이다. 파형채널은 레이놀즈수가 증가할수록 유동의 불안정성이 커지며, 읍셋 스트립 채널도 열 경계층이 얇아져 전열성능이 크게 향상된다. 그리고, 본 연구의 레이놀즈수 범위와 동일한 유효열전달 면적에서 읍셋 스트립은 파형채널과 유사한 열전달 성능을 나타내었다.

Fig. 8은 고온측 레이놀즈수에 따른 각 형상의 유용도(Effectiveness)를 나타내었다. 본 레이놀즈수 범위에서 유용도는 파형채널, 읍셋 스트립 채널이 0.5 ~ 0.9 정도이다. 일반적으로 기존 상용열교환기의 경우 유용도가 0.6 정도에서 사용되어 지므로 마이크로채널 PCHE도 소형화된 상용열교환기로 활용될 수 있음을 보여준다. 또한, 다양한 형상 최적화를 통하여 유용도를 향상시킬 수 있으리라 판단된다.

3.2 압력강하

Fig. 9는 각 형상의 고온측 레이놀즈수에 따른 압력강하를 나타내었다. 레이놀즈수가 증가할수록 압력강하는 크게 증가하는 경향을 나타내었다. 파형채널이 가장 높은 압력강하를 나타내고 있으며, 읍셋 스트립 채널이 낮은 압력강하를 나타내었다. 열전달 특성과 달리 직관채널은 읍셋

Fig. 8 Effectiveness vs. the Re of hot side.

Fig. 9 Pressure drop vs. the Re of hot side.

스트립보다 20~30% 높은 압력강하를 보였다. 파형채널은 사인파 굴곡에 의한 유속의 갑작스런 변화로 유동의 저항과 유동의 운동량 손실이 커져 압력강하도 상당히 높은 결과를 나타내었다. 반면 읍셋 스트립 채널은 비교적 높은 열전달 성능과 낮은 압력강하를 나타내었다. 이는 낮은 레이놀즈수 영역에서 스트립이 불연속적 표면이고 간격이 1mm로 연속표면의 직관채널보다 압력을 완하시키는 역할을 할 수 있다. 또한, 제작된 읍셋 스트립 채널의 경우 각 스트립의 선단 및 후단이 둥근 곡면으로 제작되어 압력강하를 크게 줄이는 역할을 했다고 판단할 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 새로운 소형열교환기의 개발의 일환으로 마이크로채널과 확산접합의 마이크로채널 PCHE를 제작하였고 다양한 채널형상을 적용하여 열전달 및 압력강하 특성을 파악하였다.

마이크로채널 PCHE의 내부 채널형상은 직관, 파형, 읍셋 스트립으로 기존 열교환기에 연구되고 있는 형상을 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 파형채널과 읍셋 스트립채널은 유사한 열전달 성능을 보였으며 직관채널보다 높은 열전달 성능을 보였다.

(2) 파형채널과 읍셋 스트립채널은 레이놀즈수 100 ~ 700 범위에서 약 0.5 ~ 0.9 정도의 유동도를 나타내었다.

(3) 파형채널이 레이놀즈수가 증가함에 따라 압력강하가 크게 증가하였으며, 읍셋 스트립채널이 직관채널보다 낮은 압력강하 특성을 보였다.

다양한 마이크로채널 형상을 가진 PCHE는 고성능 및 고효율의 소형열교환기로 여러 적용분야에 활용될 수 있으나, 현재까지의 연구가 매우 미비한 실정이다. 최적화된 다양한 마이크로채널 형상 적용으로 열전달 성능과 압력강하 특성 연구가 요구되어지며, 체계적인 연구를 통한 마이크로채널 PCHE의 제작과 성능 자료를 확보하여 기존 상용열교환기의 대체 가능성에 관한 연구가 요구된다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단(에너지기술 학술진흥사업 : 2006-E-CM03-P-03-0-000-2007)지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Johnston, A.M., Levy, W. and Rumbold, S.O., "Application of PCHE Technology Within Heterogeneous Catalytic Reactors," AIChE Annual Meeting 2001.
2. Kays, W. M. and London, A. L., 1964, "Compact Heat Exchangers," 2nd Ed. McGraw-Hill, New York.
3. 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.
4. Ngo, L., Kato, Y., Nikitina, K. and Tsuzukia, 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.
5. Tsuzuki, N., Kato, Y. and Ishizuka, T., 2007, "High performance printed circuit heat exchanger," Applied Thermal Engineering, Vol. 30, No. 10, pp.1702-1707.
6. Gschwind, P., Regele, A., and Kottke, V., 1995, "Sinusoidal wavy channels with Taylor-Goertler Vortices," Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 11, No. 3, pp.270-275.
7. Joshi, H. M., and Webb, R. L., 1987, "Heat Transfer and Friction in Offset Strip Fin Heat exchanger," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 30, No. 1, pp.69-84.
8. Cowell, T.A., 1990, "A general method for the comparison of compact heat transfer surfaces," Transactions of the ASME, Vol. 112, pp.288-294.