

마이크로채널 형상에 따른 PCHE 열유동 수치해석[§]

조연화* · 이규정*[†] · 문동주** · 김윤호***

* 고려대학교 기계공학부, ** KIST, *** 삼성전자

Numerical Simulation of Thermal Performance of Printed Circuit Heat Exchangers with Microchannels of Different Shapes

Yeon Hwa Cho*, Kyu Jung Lee*[†], Dong Ju Moon and Yoon Ho Kim***

* Division of Mechanical Engineering, Korea Univ.,

** Korea Institute of Science and Technology,

*** Samsung Electronics Company

(Received May 25, 2010 ; Revised November 11, 2010 ; Accepted November 12, 2010)

Key Words: PCHE(인쇄기관형열교환기), Microchannel(마이크로채널), Heat Transfer(열전달), Pressure Drop(압력강하), Numerical Simulation(수치해석)

초록: 새롭게 제안된 형상의 마이크로채널 PCHE는 기존의 상용 열교환기에 비해 고성능, 고효율의 특성을 보이며 열교환을 수행한다. 본 연구에서는 I, Wavy, Beehive, Surf, I-Wavy, I-Beehive, I-Surf의 형상을 갖는 다양한 마이크로채널을 모델링하였다. 질량유속 변화에 따른 다양한 마이크로채널 내 유체의 유동특성, 열전달, 압력강하를 살펴보고 그 결과는 마이크로채널의 열전달 능력을 향상시키는데 이용된다. I 채널은 새롭게 적용된 채널 형상과의 성능비교를 위해 해석을 수행하였다. 다양한 레이놀즈수 변화 하에서 고온측과 저온측 유체는 대향류 형태로 열교환이 이루어지도록 하였다. 수치해석 결과 Surf 형상이 다른 형상들보다 열교환 성능이 우수함을 확인하였다.

Abstract: The performance of microchannel PCHE (Printed Circuit Heat Exchanger) is superior to that of other existing commercial heat exchangers. Further, it is also more efficient than other heat exchangers. Various microchannels, whose shapes are straight (I), Wavy, Beehive, Surf, I-Wavy, I-Beehive, or I-Surf, are computationally modeled in this study. The counter-flow arrangement is used, and the flow characteristics, heat transfer, and pressure drop in the microchannels under various mass flow rate conditions are investigated. The results for I microchannel is chosen as the benchmarks and is compared with those of newly proposed microchannels. It is found that the surf-shaped microchannel is most efficient in improving the overall performance of a PCHE.

- 기호설명 -

Re : 레이놀즈수

C_p : 정압비열 [kJ/kg·K]

ΔT_{lm} : 대수평균온도차

D_h : 수력직경 [mm]

Q : 열전달량 [W]

A_c : 자유유동면적 [mm²]

\dot{m} : 질량유량 [kg/s]

ΔP : 평균 압력강하 [Pa]

ΔP_h : 고온부 압력강하 [Pa]

ΔP_c : 저온부 압력강하 [Pa]

T_h : 고온부 온도 [K]

T_c : 저온부 온도 [K]

ρ : 밀도 [kg/m³]

k : 열전도계수 [W/m·K]

μ : 점도 [N·s/m²]

P : 채널 둘레 [mm]

W, L, H : 열교환기 너비, 길이, 높이 [mm]

[§] 이 논문은 2010년도 대한기계학회 열공학부문 춘계 학술대회(2010. 5. 13.-14., 전북대) 발표논문임

[†] Corresponding Author, kjlee@korea.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서론

최근 초정밀 가공 기술의 발달로 인하여 초소

형 모터, 펌프, 반응기 등의 생산이 가능하게 되었고, 이를 통한 초정밀 제어가 전자기기의 초소형화 및 고집적화를 가속시켰다. 그러나 초소형화 및 집적화로 인해 야기되는 발열을 제거하기 위한 방안은 쉽지 않고, 가공영역을 나노의 영역까지 확대하고 있어 열적 문제는 더욱 심각해지리라 생각된다. 이에 새로운 냉각시스템 개발이 시급한 가운데 마이크로 채널을 이용한 마이크로 채널 PCHE에 대한 관심은 점점 높아지고 있다. 마이크로 채널을 이용한 열교환기 연구는 다음과 같다.

Rachkovskij 등⁽¹⁾은 마이크로채널을 가지는 금속박판을 여러 층으로 적층하여 만든 직교류 열교환기에 대하여 이론적으로 연구하여 채널 크기, 채널 종횡비, 적층수 변화에 따른 열교환 성능, 압력강하 특성, 온도 근접성에 대해 연구하였다. Tsuzuki 등⁽²⁾은 S형상과 다양한 지그재그 형상에 대해 3차원 전산해석을 이용하여 열전달 및 압력강하를 계산하고 열적 수력성을 평가하였다. Kim, D. E⁽³⁾는 PCHE 초임계 CO₂ 채널 유동에 대하여 상용코드를 이용, 에어포일 형상과 지그재그 핀 각도 변화에 따른 열성능 결과를 이전의 실험 결과와 비교하였다. 지그재그 형상 좌, 우측은 단열조건을 적용, 적층 효과를 고려하여 채널 위, 아랫부분은 주기경계조건으로 수치해석을 수행하였다. PCHE의 연구는 고효율을 가지는 형상의 실험적 연구는 수행하고 있지만 마이크로 채널을 적용한 소형열교환기 연구는 거의 수행되지 않았다.

본 연구에서는 마이크로채널 PCHE의 채널 형상 변화에 따른 열전달 및 압력강하 특성을 알아보기 위하여 수치해석을 통해 결과를 고찰하였다.

2. 수치해석

2.1 수치해석 개요

본 연구에서는 마이크로채널 PCHE 성능을 해석하기 위하여 열유체 CFD 상용코드인 ANSYS CFX-12를 사용하였다. CAD 프로그램을 사용하여 다양한 종류의 마이크로채널 형상을 모델링하였고 ICFEM CFD-12를 이용하여 형상별 격자를 구성하였다. 유체 유동에서 레이놀즈수가 약 40 ~ 400 영역이므로 층류의 특성을 가진다. 따라서 해석영역에서

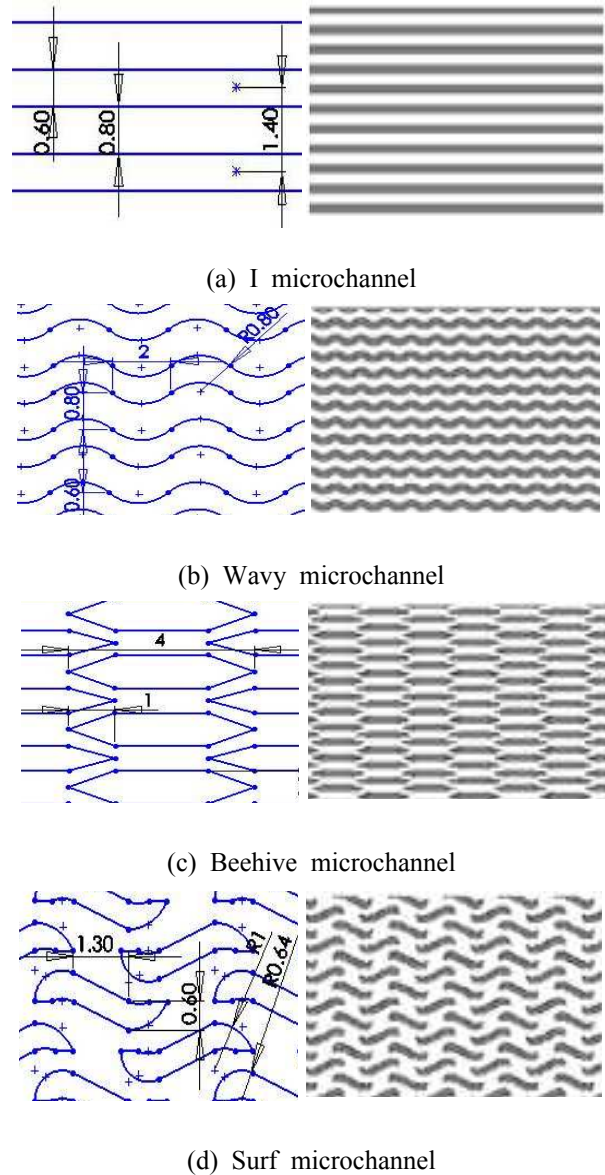


Fig. 1 Channel shapes in model

작동유체는 정상상태 비압축성 층류모델로 가정하였다. 지배방정식은 연속방정식 (continuity equation), 운동량방정식 (momentum equation), 에너지방정식 (energy equation)이다.

2.2 해석 모델 및 경계조건

본 연구에서는 마이크로채널 성능 향상을 위해 기존 마이크로채널 열교환기에서 수행되고 있는 형상과 새롭게 고안된 형상에 대해 수치해석을 수행하였다. 가장 기본적인 직관(I) 마이크로채널과 2차원 유동형태의 비교대상인 I-Wavy, I-Beehive, I-Surf, Wavy, Beehive, Surf 마이크로채

널을 선정하였다. 이러한 채널 형상을 Fig. 1에 나타내었다. I, Wavy, Beehive, Surf 마이크로채널은 고온측과 저온측의 채널 형상이 같은 형태이고 I-Wavy, I-Beehive, I-Surf 마이크로채널은 고온측의 채널형상이 I type인 형태이다. 판의 재질은 STS304이고 작동 유체로는 물이 사용되었다. 자세한 물성치와 치수는 Table 1과 Tabel 2에 나타내었다.

경계조건은 고온측과 저온측의 고체 두께를 절반으로 하여 윗면과 아랫면에 주기경계조건 (Periodic Boundary Condition)을 부여하였다. 모든 해석은 온도근접성이 우수한 대향류로 정했으며 단상해석을 기본으로 40℃의 고온유체와 20℃의 저온유체가 유입되도록 하였다. 입구조건은 질량 유량(0.3~2.4g/sec) 조건을 부여하였고, 출구조건은 대기압조건(1atm)을 적용하여 레이놀즈수 증가에 따른 열전달 특성과 압력강하 변화를 관찰하였다. 마이크로채널 모델 양 끝단면 부분에는 단열 (Adiabatic) 조건을 주었다. Fig. 2에 해석이 수행되는 모델의 전체적인 형상을 나타내었다.

2.3 결과 처리

2.3.1 무차원 변수

마이크로 판형 열교환기의 수력직경과 레이놀즈수는 식 (1)과 식 (2)로부터 구할 수 있다.

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \tag{1}$$

Table 1 Properties of fluid

ρ	995
C_p	4178.4
k	0.6172
μ	803.6×10^{-6}

Table 2 Specifications of the metal sheet

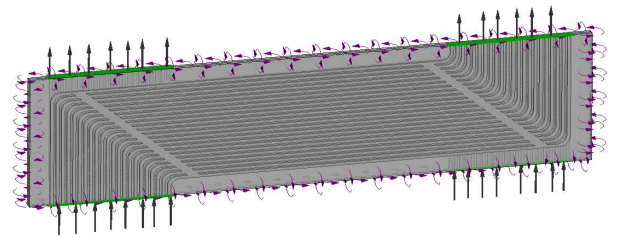
Dimensions of plates ($W \times L \times H$)	$141 \times 40 \times 1$
Channel width	800
Channel pitch	1400
Channel height	600

$$Re = \frac{\dot{m}D_h}{\mu A_c} \tag{2}$$

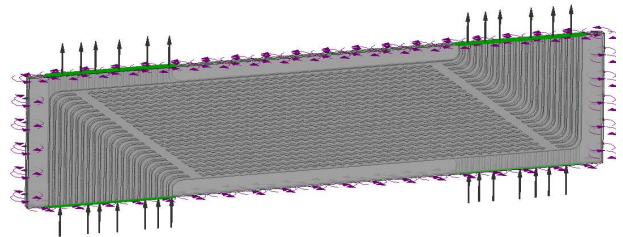
2.3.2 열평형 해석

저온측과 고온측의 열전달률은 식 (3)과 식 (4)를 이용하였다.

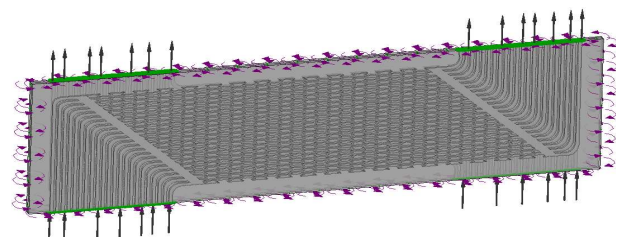
$$Q_h = \dot{m} C_p (T_{h,i} - T_{h,o}) \tag{3}$$



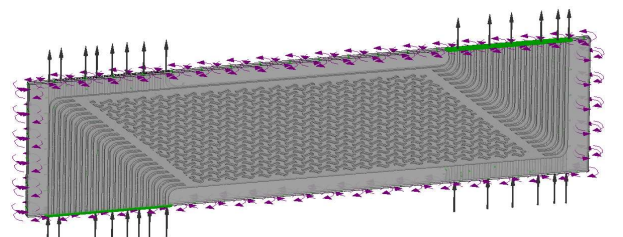
(a) I microchannel



(b) Wavy microchannel



(c) Beehive microchannel



(d) Surf microchannel

Fig. 2 Simulation models

$$Q_c = \dot{m} C_p (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (4)$$

각 형상에서 고온측과 저온측의 열전달률은 동일하므로 열교환기의 Q 값은 다음과 같다.

$$Q = Q_h = Q_c \quad (5)$$

I-Wavy, I-Beehive, I-Surf 채널은 고온측과 저온측의 채널 형상이 다르므로 이를 보정하기 위해 압력강하량도 저온측과 고온측의 평균값을 이용하여 구하였다.

$$\Delta P = \frac{\Delta P_h + \Delta P_c}{2} \quad (6)$$

직관 마이크로채널과 다양하게 제안된 채널형상에 대해 열전달 및 압력강하 성능을 비교하기 위해 열전달항상비(E)와 압력강하비(Pressure drop ratio)를 식 (7)과 식 (8)을 이용하여 평가하였다.

$$E = Q / Q_I \quad (7)$$

$$\text{Pressure drop ratio} = \Delta P / \Delta P_I \quad (8)$$

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 계산된 열전달 및 압력강하량은 입·출구 직관부분의 열전달 및 압력강하량을 포함하고 있으나 이 부분은 계산된 모든 모델에 동일하게 적용되어 있으므로 채널의 형상별 열전달 및 압력강하 특성을 잘 보여주고 있다고 판단된다.

마이크로채널 형상의 열전달 및 압력강하 특성을 파악하기 위해서는 마이크로채널 형상에 따른 열유동 연구를 수행하여야 하나 본 연구는 열교환기 제작과 관련된 전체적 열전달 및 압력강하를 파악하기 위해 입·출구 부분을 결합하여 수치해석을 수행하였다.

3.1 격자 생성 신뢰성 검증

마이크로채널 PCHE 전산해석의 정확도를 검사하기 위하여 수행한 격자 테스트 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Tetra 격자를 이용하여 I 채널에서 테스트를 수행하였다. 격자수가 약 33만개를 넘어서면 해석 결과에 변화가 없었다.

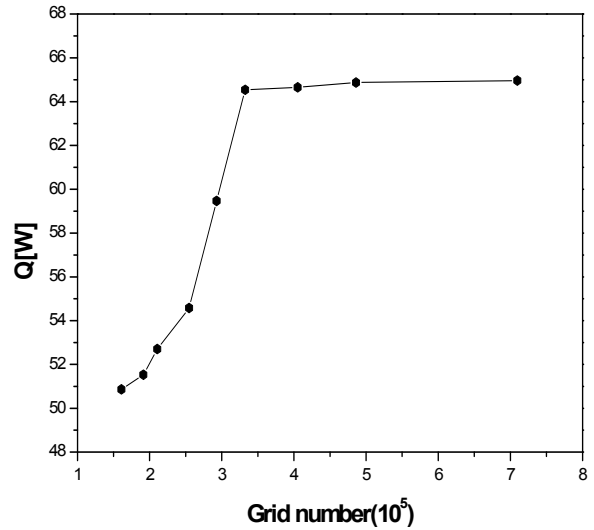


Fig. 3 Grid dependency test for I microchannel

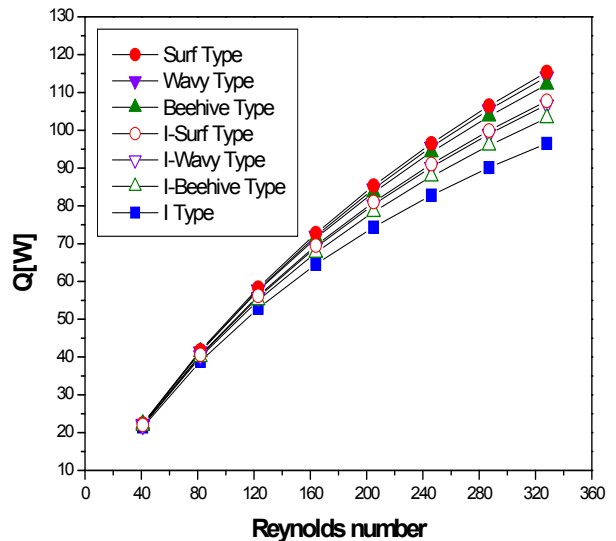


Fig. 4 Heat transfer rate vs Re

이 결과를 바탕으로 여러 형태의 마이크로채널의 격자를 생성하였고 격자수는 약 33만~140만 개다.

3.2 열전달 특성

Fig. 4에 레이놀즈수 변화에 따른 열전달률을 나타내었다. 채널 형상에 따른 열전달 면적은 I채널 8615.61mm², Wavy채널 8846.74mm², Beehive 채널 8881.99mm², Surf 채널 9148.19mm²이다. 열교환기 모든 채널에서 레이놀즈수가 증가함에 따라 열전달이 향상됨을 볼 수 있으며 Surf > Wavy > Beehive > I-Surf > I-Wavy > I-Beehive > I 형상 채널순의 결과를 보였다. 이러한 결과는 열전

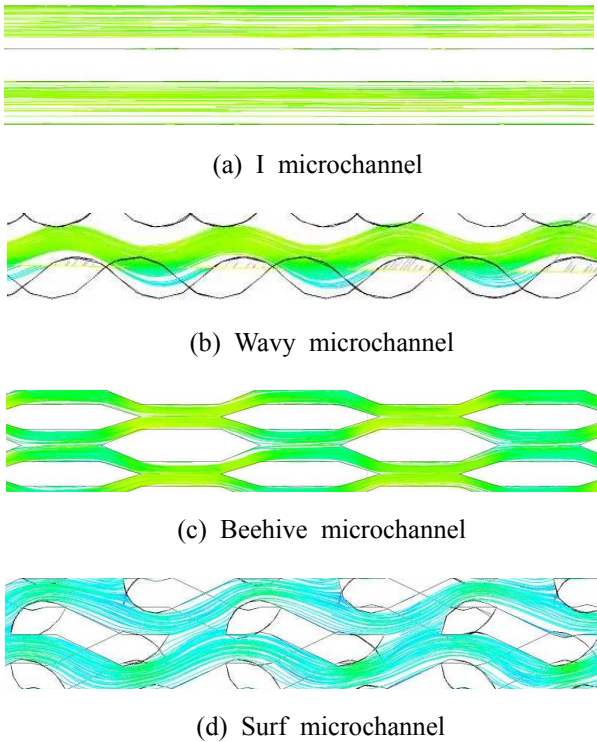


Fig. 5 Streamline in each channel shapes

달 면적의 향상과 채널 형상 변화로 인한 유체 유동의 변화에 의한 영향이라고 볼 수 있다.

Wavy 마이크로채널의 경우 굴곡지점에서 유동이 벽면으로부터 박리되고 박리된 유동은 골 영역을 통과하여 다음 굴곡지점에서 벽면과 부딪히며 재부착하는 형태의 유동을 갖는다. 이러한 유동의 박리 및 재부착 현상으로 골 영역에서 와류가 생성되고, 생성된 와류에 의해 주유동이 교란되어 열전달 향상을 가져온다. Beehive 마이크로채널은 여러개의 불연속적인 핀으로 구성되어 각 핀에서 새로운 경계층이 생성되어 발달, 성장, 소멸한다. I 마이크로채널보다 경계층 두께가 평균적으로 얇아 전열면에서의 열저항이 감소하여 열전달을 향상시킬 수 있다. Surf 마이크로채널은 Wavy와 Beehive 마이크로채널의 장점을 동시에 갖고 있어 열전달률이 가장 높은 것으로 판단된다. Fig. 5에 각 채널 형상에서의 유체 유동을 나타내었다.

Fig. 6은 다양한 마이크로채널 PCHE의 열전달 향상비를 나타내었다. Surf 채널의 경우 레이놀즈 수 330인 영역에서 I 채널보다 1.2배 높은 열전달률을 보였다. Surf 채널 다음으로 Wavy, Beehive 채널이 열전달 향상비가 높은 것으로 나타났으며

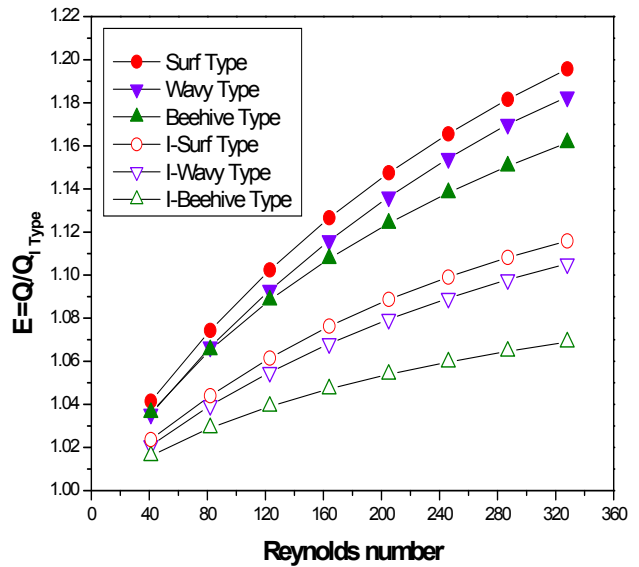


Fig. 6 Heat transfer enhancement vs Re

저온측의 채널형상만 바뀐 I-Surf, I-Wavy, I-Beehive 도 양쪽의 채널형상이 모두 같은 마이크로채널과 같은 양상의 열전달률 향상비를 보였다.

3.3 압력강하 특성

Fig. 7에 다양한 형상의 마이크로채널에 대해 레이놀즈수 변화에 따른 압력강하량을 나타내었다. 모든 마이크로채널 형상에 대하여 레이놀즈수가 증가함에 따라 압력강하량이 증가함을 확인할 수 있다. 단순형상의 I 채널이 가장 낮은 압력강하량을 나타내었으며 Wavy, Beehive 채널의 경우 열전달률은 Surf 채널보다 높지 않았지만 압력강하량은 Surf 채널보다 현저히 높게 나타났다. 레이놀즈수의 증가, 즉 유량의 증가에 따른 압력강하량 증가는 유체와 마이크로채널 벽면과의 점성 마찰에 의한 손실 영향이 지배적임을 알 수 있다. 하지만 Wavy 형상의 압력강하량이 가장 큰 것으로 미루어 볼 때 채널 벽면과 점성 마찰에 의한 영향보다는 굴곡에 의한 간섭이 압력강하에 더 큰 영향을 미친다고 판단할 수 있다.

Fig. 8에 I 마이크로채널 대비 다양한 마이크로채널 형상에 대한 압력강하비를 레이놀즈수에 대하여 나타내었다. Wavy 와 Beehive 채널이 다른 채널 형상들보다 현저히 높은 압력강하비를 보임을 확인할 수 있다. Wavy 채널의 경우 열전달 향상비가 약 1.04~1.18배 정도 상승한 것에 비해 압

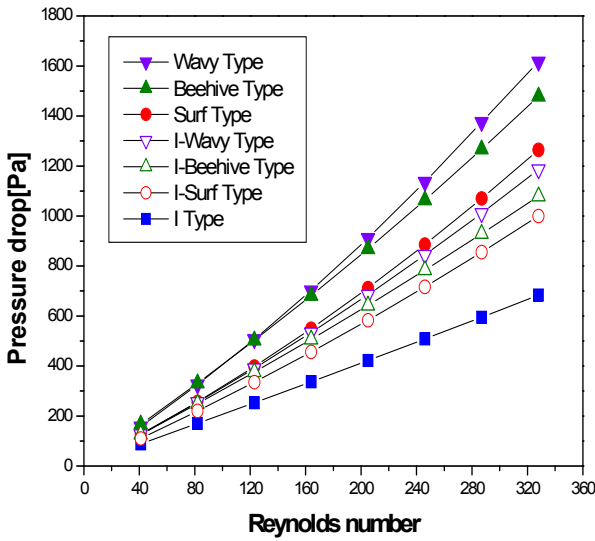


Fig. 7 Pressure drop vs Re

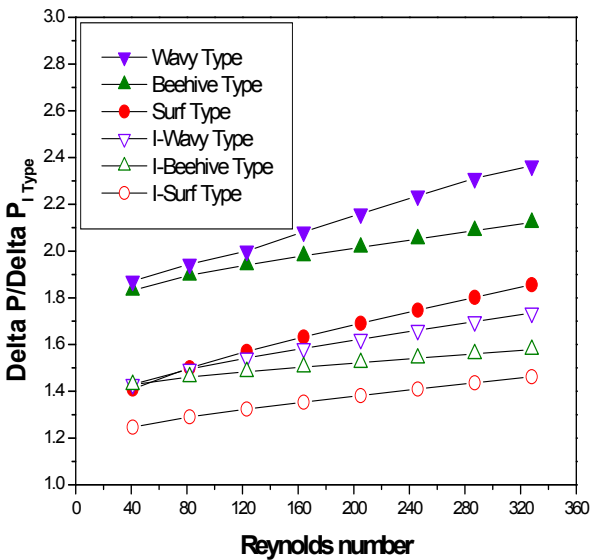


Fig. 8 Pressure drop ratio vs Re

력강하비는 약 1.9~2.4배 정도로 크게 증가했다. 반면 Surf 채널의 경우 열전달향상비가 최대 1.2 배 상승하면서 압력강하비는 1.4~1.8배 정도가 되었다. 따라서 Surf 채널이 열전달 및 압력강하 측면에서 효율이 높다고 판단할 수 있다. 나머지 채널의 경우 압력강하비는 약 1.2~2.1배로 다양한 압력강하비를 나타내었다.

3. 결론

본 연구에서는 마이크로채널 PCHE에 대하여 수치해석을 수행하여 I 마이크로채널 형상을 기

본으로 Wavy, Beehive, Surf 등 다양한 채널 형상의 열전달 및 압력강하를 살펴보았다.

(1) Surf 채널이 가장 높은 열전달률을 보였으며, Wavy > Beehive > I-Surf > I-Wavy > I-Beehive > I 마이크로채널 순의 결과를 보였다. Surf 채널은 I 채널에 비해 20% 정도 열전달 성능이 우수하였다.

(2) Wavy 채널이 가장 큰 압력강하를 보였으며 이는 I 채널과 비교하여 최대 2.4배 높은 결과이다. Wavy 와 Beehive 채널이 Surf, I-Wavy, I-Beehive, I-Surf 채널에 비해 현저히 높은 압력강하비를 보였다.

(3) I 마이크로채널 대비 제안된 마이크로채널 형상에 대한 열전달 향상비와 압력강하비를 고려해볼 때 Surf 형상이 다른 형상보다 높은 효율과 성능을 가진다고 판단할 수 있다.

후기

본 연구는 지식경제부(산업 원천기술 개발사업) 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 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(3), pp. 151~158.
- (2) Tsuzuki, N., Kato, Y. and Ishizuka, T., 2005, High Performance Printed Circuit Heat Exchanger, in: Proceedings of Heat SET 2005, Heat Transfer in Components and Systems for Sustainable Energy Technologies, Grenoble, France, April 5-7.
- (3) Kim, D. E., Kim, M. Y., Cha, J. E. and Kim, S. O., 2008, "Numerical Investigation on Thermal - Hydraulic Performance of New Printed Circuit Exchanger Model," *Nuclear Engineering and Design*, Volume 238, Issue 12, pp. 3269~3276.
- (4) Shah, R. K. and Bhatti, M. S., 1987, Laminar Convective Heat Transfer in Ducts, in Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer, Kakac, S., Shah, R. K. and Aung, W., eds., Wiley, NewYork, Chap.3.