

패스변화에 따른 워터블록의 열전달 및 유동특성 평가

최진태[†], 권오경^{*}, 최미진^{*}, 윤재호^{*}, 김용찬

고려대학교 기계공학과, ^{*} 한국생산기술연구원 에너지설비기술지원센터

Heat Transfer and Fluid Flow Evaluation of Microchannel Waterblock with Pass Variations

Jin-Tae Choi[†], Oh-Kyung Kwon^{*}, Mi-Jin Choi^{*}, Jae-Ho Yun, Yong-Chan Kim

ABSTRACT: The present study has been studied on a thermal and flow characteristic of the microchannel waterblock with pass variations in 8 samples. Results of a numerical analysis using the CFX-11 were compared with results of an experiment. Numerical analysis and experiment were conducted under an input power of 150 W, inlet temperature of 35 °C and mass flow rates of 0.7 ~ 2.0 kg/min. The numerical results showed reasonably good agreement with the experimental results within about 3~5%. Also, the numerical results showed that the sample 2 types with the 2 pass gave better performance than the sample 1 types with the 1 pass from the viewpoints of heat transfer and pressure drop.

Key words: Base temperature(바닥면 온도), heat transfer(열전달), Microchannel waterblock (미세채널 워터블록), Pressure drop(압력강하)

기 호 설 명

- D_{inlet} : 입구내경 [mm]
- D_h : 수력직경 [mm]
- H_{base} : 바닥면 높이 [mm]
- H_{ch} : 채널 높이 [mm]
- L_{base} : 바닥면 길이 [mm]
- L_{ch} : 채널 길이 [mm]
- P_{input} : 입력 열량 [W]
- R_{th} : 열저항 [°C/W]
- W_{base} : 바닥면 폭 [mm]
- W_{ch} : 채널 폭 [mm]
- W_{fin} : 핀 폭 [mm]

1. 서 론

칩의 고집적화로 전자통신 기기 및 부품의 성능은 눈부신 속도로 발전해 왔으며 그 크기는 점점 작아지고 있다. 그러나 칩의 고집적화는 단위 면적당 발열량의 증가, 기기의 소형화는 냉각 시스템의 공간적 제한이라는 이면을 가지고 있다. 실제 2000년 출시된 펜티엄IV 1.5 GHz 칩의 발열량은 50 W 이상이었지만 최근 출시된 인텔의 코어2 익스트림 3.2 GHz의 경우 130 W 이상이다. 칩으로부터 발생하는 열을 효율적으로 제거시켜 주지 못할 경우, 시스템 온도 상승으로 인해 칩 성능의 안정성에 문제가 발생한다. Pecht는 CPU의 온도가 10°C 낮아질 경우 성능은 1~3% 상승하며 고장률은 2배로 감소한다고 발표하였다.⁽¹⁾ 이러한 이유로 전자통신 기기 및 부품의 냉각기술은 그 성능과 직결되어 다양한 형태로 연구가 진행되어 왔다.⁽²⁻³⁾

[†] Corresponding author

Tel.: +82-41-589-8342; fax: +82-41-589-8330
E-mail address: jinsada@kitech.re.kr

제작기술의 발달로 미세채널 히트싱크는 단위 부피당 열교환 면적을 극대화 할 수 있으며⁽⁴⁾ 물을 작동유체로 사용할 경우 공기를 사용할 때보다 열전달 계수가 100배정도 큰 이점을 가지고 있다.⁽⁵⁾ 이러한 점에 착안하여 CPU 냉각을 위해 사용하던 기존의 공냉(Air cooling) 방식의 제품을 대체할 수냉(Liquid cooling) 방식의 제품들이 활발히 개발되고 있다.

수냉식 냉각시스템은 크게 워터블록(Waterblock), 펌프(Pump), 라디에이터(Radiator), 팬(Fan), 배관(Tube), 작동유체를 저장하는 저장조(Reservoir)로 구성된다. 펌프에 의해 시스템 내부를 순환하는 작동유체는 발열체(CPU)에 부착된 워터블록을 지나면서 발열체로부터 열을 전달받는다. 이로 인해 뜨거워진 유체는 배관을 따라 라디에이터 및 팬으로 이동하고 이곳에서 차가운 외부공기와 열교환을 하게 된다. 라디에이터를 통과한 저온의 작동유체는 워터블록으로 들어가는 과정을 반복한다. 현재 전자통신 기기의 소형화로 냉각시스템 또한 공간적 제한을 받고 있으며, 이를 해결하기 위한 다양한 아이디어들이 나오고 있다.⁽⁶⁾

본 연구에서는 패스변화에 따른 미세채널 워터블록의 열전달 및 유동특성을 평가하기 위해서 1Pass Sample 4종류(0, 1, 5, 9 Path), 2Pass Sample 4종류(0, 1, 5, 9 Path) 총 8종류의 Sample을 선정하였다. 이들의 열 및 유동성능을 해석적 방법을 통해 예측해 보았으며 그 결과의 타당성을 실험결과를 통해 확인하였다. 미세채널 워터블록의 성능에 관한 해석적 연구를 위해 CFD 상용 코드인 CFX-11을 사용하였다.

2. 해석영역 및 방법

2.1 해석영역

패스변화에 따른 미세채널 워터블록의 채널 내 열 유동특성을 파악하기 위해서 총 8개의 샘플을 선정하였으며 이에 따른 형상을 Table 1에 나타내었다. Sample 1-1~1-4는 1Pass로 내부 핀의 형태는 0, 1, 5, 9 Path를 가지며 입출구의 위치가 수직하다. Sample 2-1~2-4는 2Pass로 Sample 1군 계열과 Path수와 입출구의 위치가 동일하다.

Table 2와 Fig. 1에 미세채널 워터블록의 자세한 형태와 치수를 나타내었다. Table 2의 세부 치수는

8개의 샘플 모두 동일하며 발열체에 부착되는 바닥 면은 $50 \times 40 \text{ mm}^2$, 채널의 폭 0.6 mm, 채널의 높이 8 mm, 채널의 길이는 32 mm, 입출구의 내경은 6.35 mm 이다.

2.2 해석방법

격자의 생성은 CFX-Mesh를 사용하였으며 비정렬 격자를 기본으로 열전달이 주로 일어나는

Table 1 Figures of computational domain

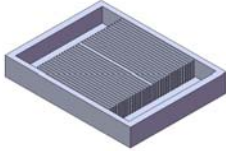
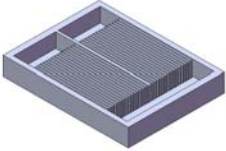
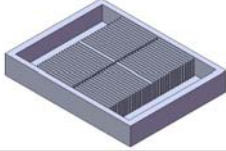
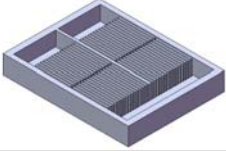
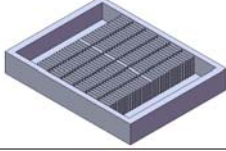
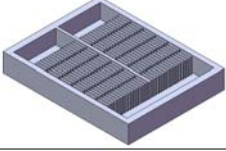
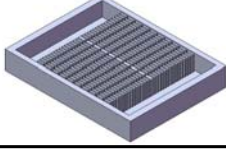
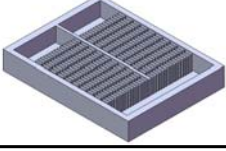
Sample no.	1 Pass	2 Pass
1-1 2-1 (0 path)		
1-2 2-2 (1 path)		
1-3 2-3 (5 path)		
1-4 2-4 (9 path)		

Table 2 Specifications of waterblock

Parameters	Size
D_{inlet} (mm)	6.35
D_h (mm)	1.12
H_{base} (mm)	1
H_{ch} (mm)	8
L_{base} (mm)	50
L_{ch} (mm)	32
W_{base} (mm)	40
W_{ch} (mm)	0.6
W_{fin} (mm)	0.6
W_{path} (mm)	0.6

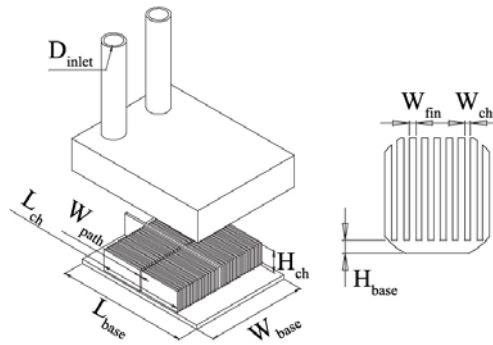


Fig. 1 Drawing of the microchannel waterblock.

채널부의 벽면에 프리즘격자를 생성하여 계산의 정확도를 높였다.

미세채널의 특성상 해석영역의 최소길이(W_{ch})와 최대길이의 차이가 커 격자점의 수가 많아지므로 유체영역과 고체영역을 나누어 해석을 수행하였다. 실제 발열체로부터 워터블록 바닥면으로 전달되는 열량 150 W에 상응하는 열유속을 유체의 입출구를 제외한 모든 면에 가하고, 이로부터 얻어지는 벽면에서의 열전달계수를 고체영역의 내부 벽면에 대한 경계조건으로 사용하여 바닥면의 온도를 예측하였다.

정상상태에서의 연속방정식, 운동량방정식, 에너지 방정식의 이산화는 CFX-11에서 제공하는 2차항 이상의 정확도를 가지는 high resolution scheme을 사용하였다. 또한 열 유동 해석에 가장 널리 쓰이는 standard $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하였다.

Table 3 Analytical conditions

Domain	Surface	Settings	
Fluid (water)	Inlet	Temp. (°C)	35
		Flow rate (kg/min)	0.7, 1.2, 1.7, 2.0
	Outlet	Static pressure (Pa)	0
	Heated wall (W)	150	
Solid (Copper)	Heated wall (W)	150	
	Wetted wall	User profile data (heat transfer coefficient)	
	Wall	Adiabatic	

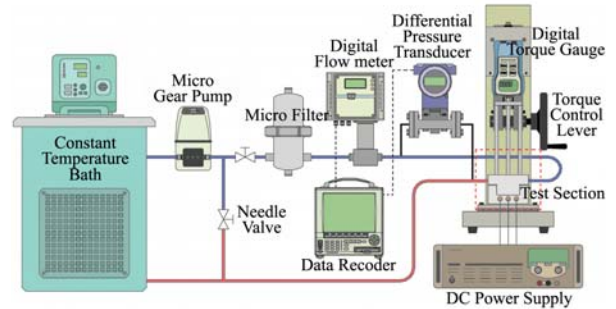


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup.

Table 3에 해석조건을 나타내었으며 이 조건은 실험결과와 비교하기 위해 실험조건과 동일하게 선정하였다. 미세채널 워터블록의 재질은 구리이며 작동유체는 물이다. 워터블록에 가해지는 열량은 150 W이고 물의 입구온도는 35 °C로 고정하였으며 유량은 0.7~2.0 kg/min 이다.

2.3 실험장치 구성

해석결과의 검증을 위한 실험장치를 Fig. 2에 나타내었다. 장치는 항온조, 마이크로 기어펌프, 마이크로 필터, 디지털 유량계, 차압계, 디지털 토크게이지, 전력공급장치, 데이터 레코더로 구성되어 있다. 작동유체는 물이며 유량은 0.7 kg/min ~ 2.0 kg/min, 입구 온도는 20°C이다. 전력공급장치를 통해 발열부에 열을 가한 후 입출구 온도 및 발열부 상부면의 온도가 3분 이상 변화가 없으면 정상상태로 보고 이때의 결과를 취득하였다. 각 계측장치는 보정을 수행한 후 데이터 레코더를 이용하여 정상상태에서 모든 결과를 0.5초 간격으로 저장하였다. 계측장비의 오차로써 유량은 $\pm 0.1\%$, 온도 $\pm 0.15\%$, 압력은 $\pm 0.1\%$ 이며 실험 데이터에 대한 불확실성 해석⁽⁷⁾을 통해서 입력열량은 $\pm 1.12\%$, 열저항은 $\pm 1.35\%$ 의 값을 가진다.⁽⁸⁾

2.4 결과처리

해석결과를 처리하기 위해서 열저항은 식(1)을 사용하였으며, 수력직경은 식(2)를 사용하였다. 또한 워터블록의 성능을 객관적으로 평가하기 위하여 식(3) ~ (5)와 같은 무차원수를 사용하였다.

$$R_{th} = \frac{T_s - T_{c.in}}{P_{input}} \quad (1)$$

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

$$Re = \frac{\rho_f D_h v}{\mu_f} \quad (3)$$

$$Nu = \frac{hD_h}{k_f} \quad (4)$$

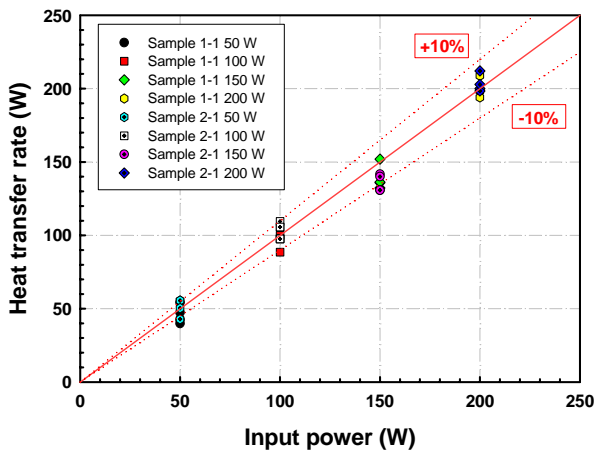
$$f = \frac{2\Delta P \cdot D_h}{\rho u^2 L} \quad (5)$$

3. 결과 및 고찰

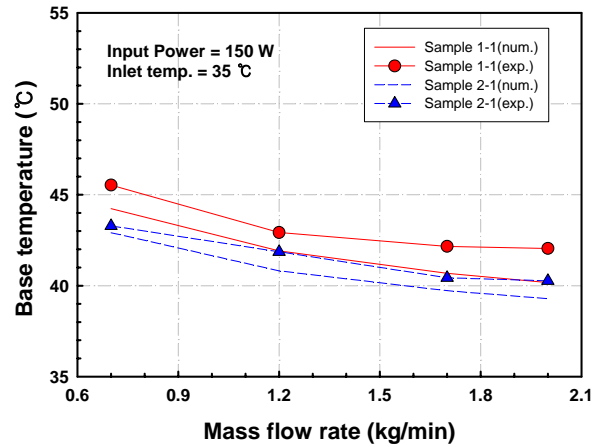
3.1 해석결과의 검증

Fig. 3은 해석결과의 타당성을 검증하기 위해서 (a) 열평형과 (b) 실험결과와의 비교를 나타낸 것이다. 입력 열량과 출력의 열전달량의 열평형은 $\pm 10\%$ 내외에서 일치하였으며, 실험결과와 비교해보면 히팅블록 표면의 온도에서 약 3~5%의 차이를 나타내었으며 실험결과가 해석결과에 비해 다소 높게 나타났다.

이것은 수치해석에서는 바닥면의 온도측정을 발열부의 상부면의 온도와 근사하다는 가정 하에 수행하였지만, 실험에서는 온도센서를 발열부 상부면에



(a) heat balance



(b) comparison of experimental results

Fig. 3 Comparison of validity for numerical analysis.

약 0.5 mm 정도 홈을 낸 후 위치시켰고 이로 인해 바닥면의 온도가 약간씩 크게 측정된 것으로 판단된다.

3.2 열 및 유동특성

Fig. 4는 질량유량 변화에 따른 히팅블록 표면의 평균 온도변화를 나타낸 것이다. 입력 열량 150 W, 작동유체의 입구온도 35°C에서 질량유량이 증가함에 따라 모든 샘플에서 표면온도는 감소하였으며, 2 Pass군 Sample이 1 Pass군의 Sample 보다 우수한 열전달 성능을 나타내었다. 특히 9 Path의 Sample 2-4는 내부에서의 유체의 교란효

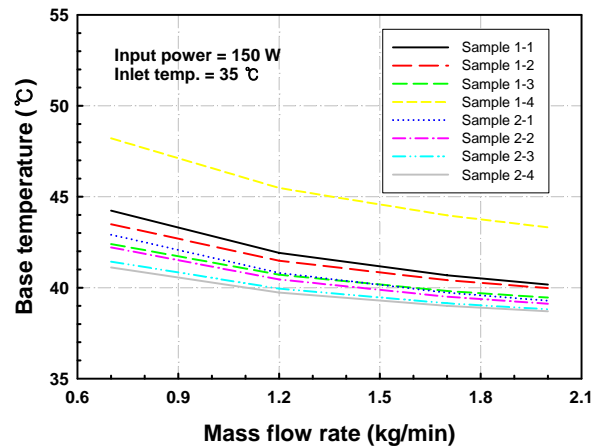


Fig. 4 Variation of base temperature with the mass flow rate.

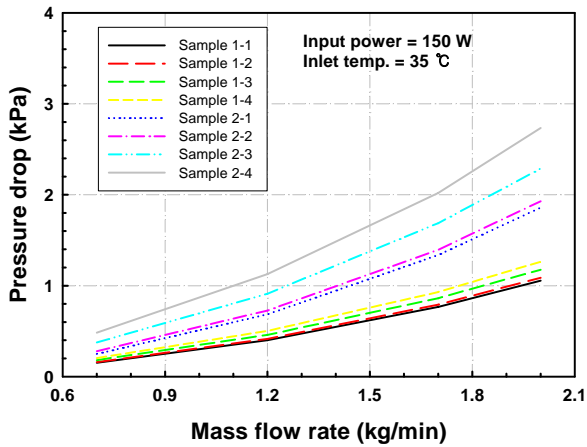


Fig. 5 Variation of pressure drop with the mass flow rate.

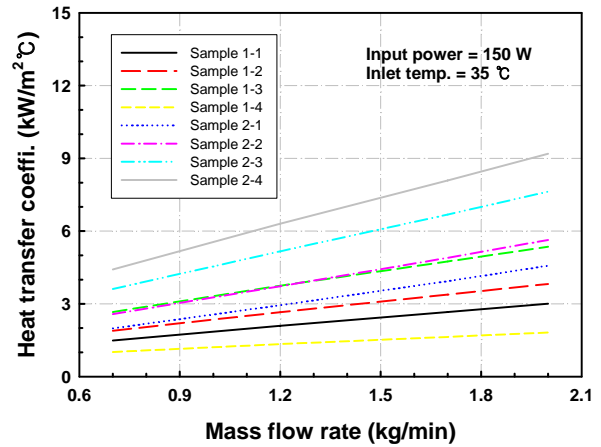


Fig. 7 Variation of heat transfer coefficient with the mass flow rate.

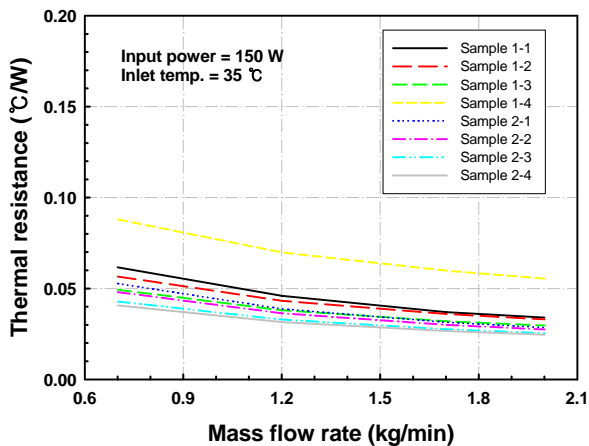


Fig. 6 Variation of thermal resistance with the mass flow rate.

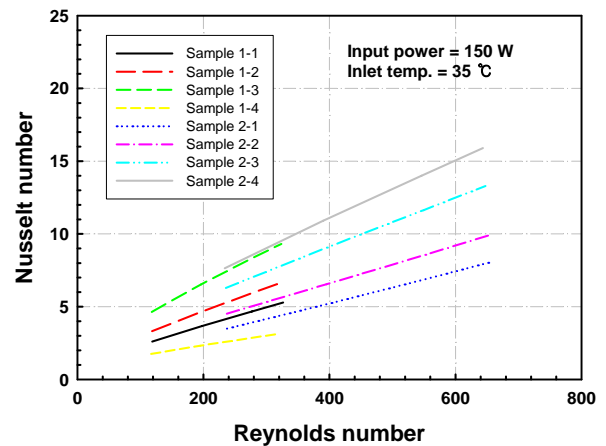


Fig. 8 Variation of Nusselt number with the mass flow rate.

과가 뛰어나서 가장 우수한 열전달 성능을 나타내었으며, Sample 1-4는 후단부 메니폴더 근처에서 유체의 역류로 인한 정체로 인하여 열전달 성능이 저하하였다.

Fig. 5는 질량유량 변화에 따른 압력강하의 변화를 나타낸 그림이다. 질량유량이 증가함에 따라 압력강하는 점차 증가하는 경향을 나타내었으며, 표면온도가 가장 낮은 Sample 2-4가 압력강하 측면에서는 성능이 가장 낮게 나타났다.

Fig. 6은 워터블록의 열전달 성능을 나타내는 열저항을 나타낸 것이다. 모든 Sample에서 질량유량이 증가함에 따라 열저항은 점차 감소하는 경향을 보였으며, 표면온도가 가장 낮은 Sample 2-4에서 질량유량에 따라 열저항 0.03~0.04 °C/W의 값

을 나타내었다.

Fig. 7은 질량유량 변화에 따른 열전달계수의 특성을 나타낸 것이다. 열전달계수는 워터블록 벽면온도와 작동유체 입출구의 평균온도를 적용하여 계산하였다. 활발한 대류의 영향으로 Sample 2-4가 열저항과 마찬가지로 높은 열전달계수를 나타내었으며, 질량유량에 따라 4,420~9,190 W/m²°C를 나타내었다.

Fig. 8은 레이놀즈수에 따른 누셀수의 변화를 나타낸 것이다. 레이놀즈수 증가에 따라 누셀수는 거의 선형적으로 증가하며 Fig. 7의 열전달계수의 영향으로 누셀수에서도 Sample 2-4에서 가장 높게 나타났으며 레이놀즈수에 따라 누셀수는 7.65~15.91의 값을 나타내었다.

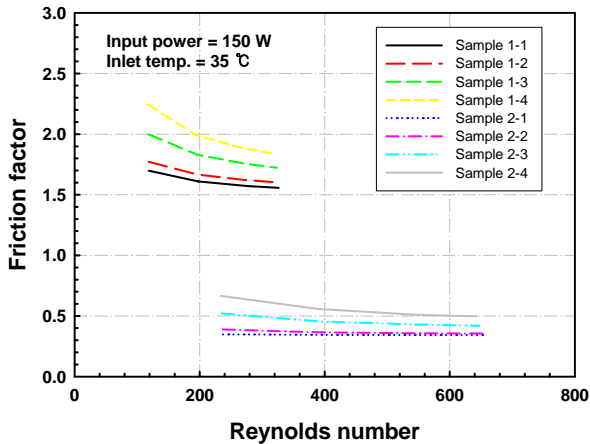


Fig. 9 Variation of friction factor with the mass flow rate.

Fig. 9는 레이놀즈수에 따른 관내 마찰계수의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 5에서 압력강하는 Sample 2군 계열에서 높게 나타났지만 식 (5)를 통해서 보면 작동유체의 속도와 유로의 길이의 영향으로 Sample 2군 계열이 마찰계수는 크게 줄어드는 것으로 나타났다. 마찰계수는 Sample 2-1에서 가장 낮게 나타났으며 레이놀즈수에 따라 점차 작아지는 경향을 나타내었다.

4. 결론

패스변화에 따른 미세채널 워터블록의 열전달 및 유동특성에 대해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) CFD를 활용한 미세채널 워터블록의 열유동 해석결과와 실험결과는 히팅블록 표면온도에서 약 3~5% 잘 일치하였고, 실험시 열평형은 $\pm 10\%$ 내외에서 일치하여 타당성을 검증할 수 있었다.

(2) 히팅블록 표면의 평균 온도변화 비교에서 2 Pass군 Sample이 1 Pass군의 Sample보다 우수한 열전달 성능을 나타내었으며 9 Path의 Sample 2-4가 가장 우수한 열전달 성능을 나타내었다. 열저항은 $0.03 \sim 0.04 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$, 열전달계수는 $4,420 \sim 9,190 \text{ W}/\text{m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$, 누설수 7.65~15.91의 값을 나타내었다.

(3) 압력강하는 Sample 2군 계열에서 Sample 1군 계열보다 높게 나타났으며 Sample 2-4에서 가장 높게 나타났다. 그러나 관내 마찰계수는 작동유체의 속도와 유로의 길이의 영향으로 Sample 2

군 계열이 마찰계수는 크게 줄어드는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 산업기술연구회의 "초고속 전자기기용 마이크로 냉각시스템 상용화 기술개발"에 의해 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

1. Pecht, M., 1990, Handbook of Electronics Package Design, Marcel Dekker, Inc. pp. 40-43.
2. Pastukhov, V. G., Maidanik, Yu. F., Vershinin, C. V., Korukov, M. A., 2003, Miniature Loop Heat Pipes for Electronics Cooling, Applied Thermal Engineering, Vol. 23, Issue 10, pp. 1125-1135.
3. Yasushi, K., Hideaki, I., Masataka, M., Yuji, S., Shuichi, T., 2006, Numerical Analysis and Experimental Verification on Thermal Fluid Phenomena in a Vapor Chamber, Applied Thermal Engineering, Vol. 26, Issue 14-15, pp. 1669-1676.
4. Pastukhov, V. G., Maydanik, Y. F., 2007, Low-Noise Cooling System for PC on the Base of Loop Heat Pipes, Applied Thermal Engineering, Vol. 27, Issue 5-6, pp. 894-901.
5. Incropera, F. P., 1999, Liquid Cooling of Electronic Devices by Single-phase Convection, Wiley, New York, pp. 151-153.
6. Steinberg, D. S., 1991, Cooling Techniques for Electronic Equipment, Wiley, New York, pp. 371-372.
7. Holman, J. P., 2000, Experimental Method for Engineer, 7th ed., McGraw-Hill, pp. 51-60.
8. Kwon, O. K., Choi, M. J., Cha, D. A., Yun, J. H., 2008, A Study on Thermal Performance of Micro Channel Water Block for Computer CPU Cooling, Trans. of the KSME B, Vol. 32, No. 10, pp. 776-783.