

미세채널 워터블록의 유입부 형상에 따른 유량분배 및 열유동 특성

최 미 진, 권 오 경[†], 윤 재 호
한국생산기술연구원 에너지설비기술지원센터

Flow Distribution and Heat Transfer Characteristic of the Microchannel Waterblock with Different Shape of Inlet

Mi-Jin Choi, Oh-Kyung Kwon[†], Jae-Ho Yun
Energy System Technology Center, Korea Institute of Industrial Technology, Cheonan, 330-825, Korea
(Received November 24, 2008; revision received June 16, 2009)

ABSTRACT: The present study has been studied on a thermal and flow characteristic of the microchannel waterblock with flow distributions in each channels. Results of a numerical analysis using the CFX-11 are compared with results of an experiment. Numerical analysis and experiment are conducted under an input power of 150 W, inlet temperature of 20 °C and mass flow rates of 0.7~2.0 kg/min. Base temperature and pressure drop are investigated with standard deviations of mass flow rates in each channels of samples. The flow distribution and j/f factor of the sample 4 is increased by about 65.7% and 42.6%, compared to that of the reference model sample 3.

Key words: Microchannel waterblock(미세채널 워터블록), Flow distributions(유량분배), Base temperature(바닥면 온도), 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]
 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 단위면적당 발열량의 증가, 기기의 소형화는 냉각 시스템의 공간적 제한이라는 이면을 가지고 있다. 실제 2000년 출시된 펜티엄 IV 1.5 GHz 칩의 발열량은 50 W 이상이었던 반면 최근 출시된 인텔의 코어 2 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

[†] Corresponding author

Tel.: +82-41-589-8528; fax: +82-41-589-8330
E-mail address: kwonok@kitech.re.kr

이유로 전자통신 기기 및 부품의 냉각기술은 그 성능과 직결되어 다양한 형태로 연구가 진행되어 왔다.^(2, 3)

제작기술의 발달로 미세채널 히트싱크는 단위부피당 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 미세채널 워터블록의 채널 내 유량분배에 영향을 미치는 헤더의 형태 및 입출구 위치에 따라 총 4개의 샘플을 선정하였다. 이들의 열 및 유동성능을 해석적 방법을 통해 예측해보았으며 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

미세채널 워터블록의 채널 내 유량분배에 영향을 미치는 입출구의 형태에 따라 총 4개의 샘플을 선정하였으며 이에 따른 계산영역을 Table 1에 나타내었다. 샘플 1~3은 입출구의 위치가 수평하며 샘플 4의 입출구는 수직하게 위치하였다. 샘플 1, 2, 4는 채널의 배열에 구배를 주었고 샘플 3의 경우 채널을 나란히 배열하였다. 샘플 2의

경우 샘플 1과 달리 입출구의 방향과 채널의 방향이 수직을 이루고 있다.

Table 2와 Fig. 1에 미세채널 워터블록의 자세한 형태와 치수를 나타내었다. Table 2의 세부 치수는 4개의 샘플 모두 동일하며 발열체에 부착되는 바닥면은 $40 \times 40 \text{ mm}^2$ 채널의 길이는 26 mm 입출구의 내경은 4.78 mm이다.

Table 1 Figures of computational domain



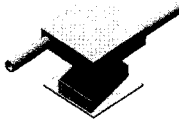

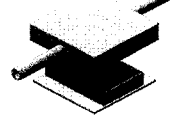



Sample No.	Solid	Fluid
1		
2		
3		
4		

Table 2 Specifications of waterblock

Parameters	size
D_{inlet} (mm)	4.78
D_h (mm)	0.94
H_{base} (mm)	1
H_{ch} (mm)	7.5
L_{base} (mm)	40
L_{ch} (mm)	26
W_{base} (mm)	40
W_{ch} (mm)	0.5
W_{fin} (mm)	0.5

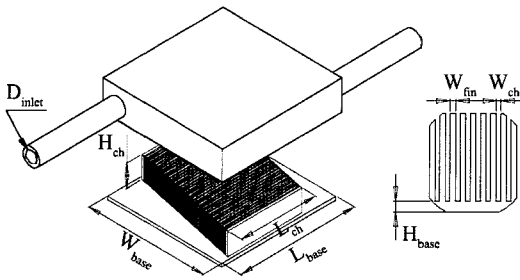


Fig. 1 Drawing of the microchannel waterblock.

2.2 해석방법

Table 3은 해석영역에 대한 격자계를 나타낸 것이다. 격자의 생성은 CFX-Mesh를 사용하였으며 비정렬 격자를 기본으로 열전달이 주로 일어나는 채널부의 벽면에 프리즘격자를 생성하여 계산의 정확도를 높였다.

Table 4는 샘플 1의 격자수 변화에 따른 바닥면의 온도 및 압력강하를 나타낸 것이다. 격자수가 큰 경우와 비교해서 해석결과는 1.8% 이내이므로 계산시간 등을 고려하여 고체부 약 1,085,428개, 유체부 약 1,520,072의 결과를 사용하였다.

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

Table 3 Figures of the grid

Domain	Grid
Solid	
Fluid	

Table 4 Effect of mesh numbers

Nodes	Solid	570,378	1,085,428	1,433,432
	Fluid	789,777	1,520,072	2,000,429
Base temperature (°C)		29.47	28.79	28.26
Pressure drop (kPa)		1.09	1.13	1.14

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-ε 난류모델을 사용하였다.

Table 5에 해석조건을 나타내었으며 이 조건은 실험결과와 비교하기 위해 실험조건과 동일하게 선정하였다. 미세채널 워터블록의 재질은 구리이며 작동유체는 물이다. 워터블록에 가해지는 열량은 150 W이고 물의 입구온도는 20 °C로 고정하였으며 유량은 0.7~2.0 kg/min이다.

Table 5 Analytical conditions

Domain	Surface	Settings	
Fluid (water)	Inlet	Temp. (°C)	20
		Flow rate (kg/min)	0.7, 1.2, 1.7, 2.0
	Outlet	Static pressure (Pa)	0
Solid (Copper)	Heated wall(W)	150	
	Heated wall(W)	150	
	Wetted wall	User profile data (heat transfer coefficient)	
	Wall	Adiabatic	

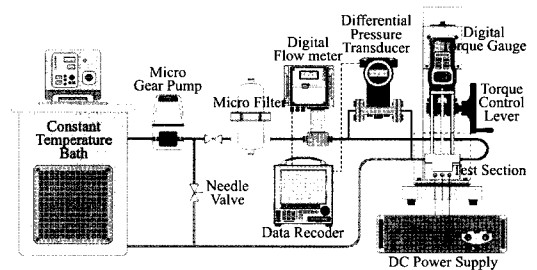


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup.

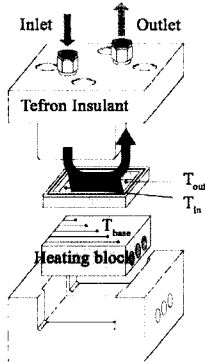


Fig. 3 Test section of experimental setup.

2.3 실험장치 구성

해석결과의 검증을 위한 실험장치 및 실험부를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 장치는 항온조, 마이크로 기어펌프, 마이크로 필터, 디지털 유량계, 차압계, 디지털 토크게이지, 전력공급장치, 데이터 레코더로 구성되어 있다. 작동유체는 물이며 유량은 0.7~2.0 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 ±0.1%, 온도 ±0.15%, 압력은 ±0.1%이며 실험 데이터에 대한 불확실성 해석을 통해서 입력열량은 ±1.12%, 열저항은 ±1.35%의 값을 가진다.⁽⁸⁾

2.4 결과처리

해석결과로부터 워터블록의 성능을 객관적으로 평가하기 위하여 식(1)~식(4)와 같은 무차원수들 사용하였다. 또한 워터블록의 열전달 성능 및 압력강하 성능을 함께 고려하기 위하여 j/f factor를 사용하였다.

$$Re = \frac{\rho_f D_h v}{\mu_f} \tag{1}$$

$$Nu = \frac{h D_h}{k_f} \tag{2}$$

$$j = \frac{Nu}{Re \cdot Pr^{1/3}} \tag{3}$$

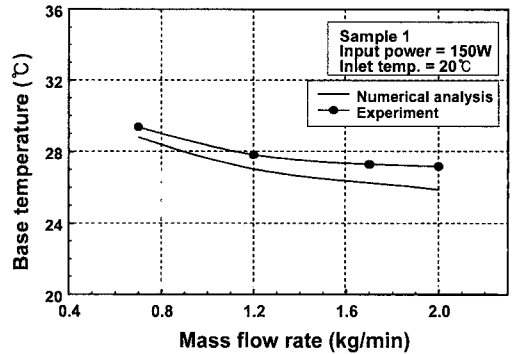
$$f = \frac{2\Delta P \cdot D_h}{\rho u^2 L} \tag{4}$$

3. 결과 및 고찰

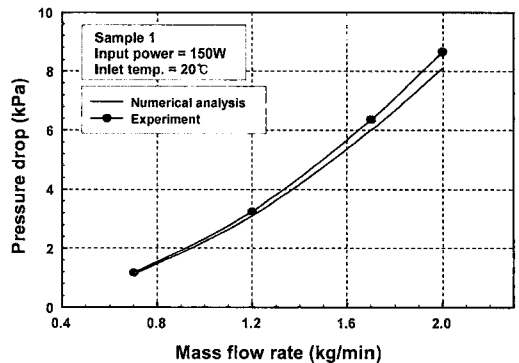
3.1 해석결과의 검증

Fig. 4는 수치해석과 실험결과의 비교를 나타낸 것이다. 실험결과와 비교해보면 바닥면의 온도에서 약 2~5%, 압력강하에서 약 4~7%의 차이를 나타내었으며 실험결과가 해석결과에 비해 다소 높게 나타났다.

이것은 수치해석에서는 바닥면의 온도추정을 발열부의 상부면의 온도와 근사하다는 가정 하에 수행하였지만, 실험에서는 온도센서를 발열부 상부면에 약 0.5 mm 정도 홈을 낸 후 위치시켰고 이로 인



(a) Variations of base temperature



(b) Variations of pressure drop

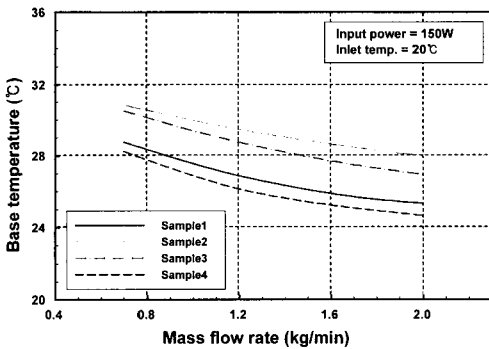
Fig. 4 Results of numerical analysis compared with experimental results for Sample 1.

해 바닥면의 온도가 약간씩 크게 측정된 것으로 판단된다. 또한 압력강하와 온도 측정을 위하여 워터블록 입출구 양단에 Tee fitting을 사용하였으나 수치해석에서는 이를 고려하지 않았으며 그 결과 측정 값이 크게 나타난 것으로 판단된다.

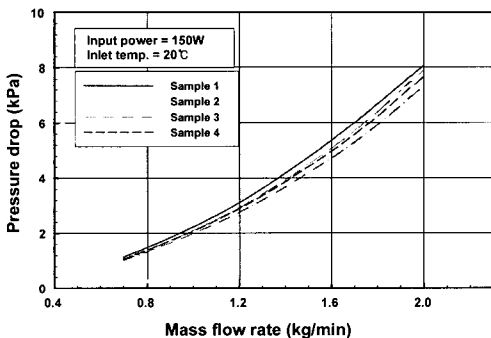
3.2 열 및 유동특성

Fig. 5는 질량유량 변화에 따른 바닥면의 평균 온도와 압력강하의 변화를 나타낸 그림이다. 유량이 증가함에 따라 바닥면의 평균온도는 감소하고, 압력강하가 증가하는 일반적인 경향을 보이고 있다. 열전달 측면에서 바닥면의 평균온도가 가장 낮은 샘플 4가 우수하고 샘플 3의 압력강하가 가장 낮게 나타났다.

Fig. 6은 워터블록의 열전달과 압력강하 측면이 함께 고려된 j/f factor에 대한 결과이다. j 와 f



(a) Variations of base temperature



(b) Variations of pressure drop

Fig. 5 Variations of base temperature and pressure drop with mass flow rate.

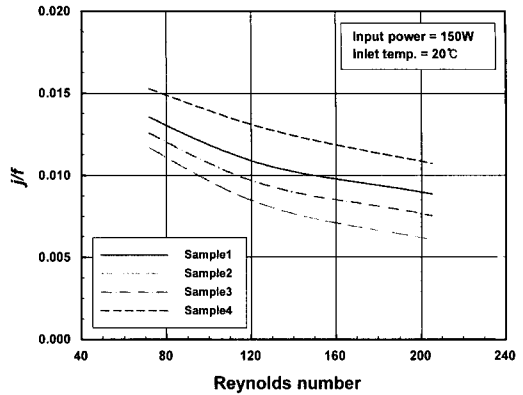


Fig. 6 Variations of j/f with Reynolds number.

factor는 식(3)과 식(4)를 사용하여 구하였으며, j/f factor는 레이놀즈수가 증가함에 따라 점차 감소하는 경향을 보였다.

샘플별로 j/f factor를 비교해보았을 때, 샘플 4 > 1 > 3 > 2의 순서로 나타났다. j/f factor가 가장 큰 샘플 4의 경우 가장 작은 샘플 2에 비해 레이놀즈수 72에서 약 30.8%, 레이놀즈수 205에서 최대 약 78.3%로 레이놀즈수가 증가함에 따라 그 증가폭은 상승하였다.

Fig. 7에서 Fig. 9는 워터블록의 온도분포와 작동유체의 속도분포를 나타낸 것으로 샘플 4의 온도분포와 속도분포가 가장 균일함을 확인할 수 있다. Fig. 9는 샘플 2의 속도벡터로 채널을 빠져나온 일부가 다시 흘러 들어감을 확인할 수 있으며 이로 인해 열전달과 압력강하 특성에 영향을 준 것으로 판단된다.

3.3 입출구 형태에 따른 채널 내 유량분배

워터블록의 채널에 대한 번호체계를 Fig. 10에 나타내었다. 샘플 3을 제외한 나머지 샘플에 대해 입구와 가까운 채널부터 1번으로 지정하였으며 모든 샘플의 채널개수는 41개이다.

김 등⁽⁷⁾은 단상유동에서 채널내로 분배되는 유량의 균일도를 정량적으로 비교하기 위해 식(5), 식(6)을 제안하였다. $FR(\%)$ 는 각 채널에 분배되는 유량의 전체유량에 대한 유량비이다. N_c 는 채널의 개수이며 m_i 는 각 채널의 질량유량, m_{ideal} 은 전체 유량이 균등하게 분배 되었을 때의 유량이다. S 는 표준편차의 개념을 기본으로 하였기

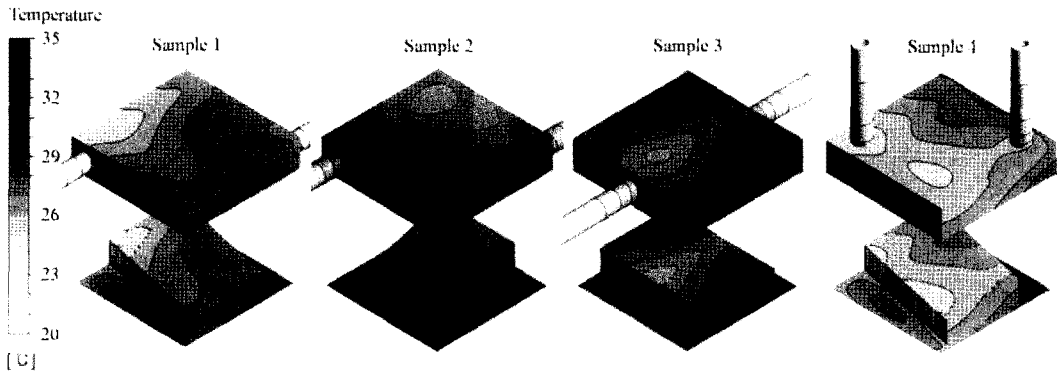


Fig. 7 Temperature contours(150 W, 0.7 kg/min, 20 °C).

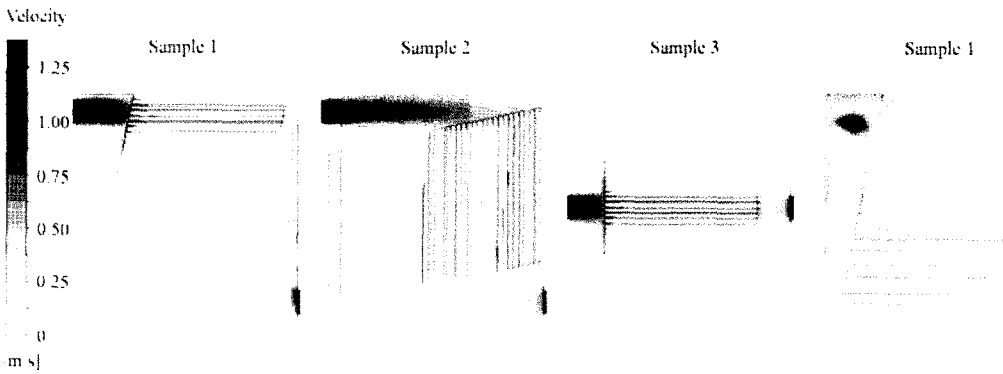


Fig. 8 Velocity contours(150 W, 0.7 kg/min, 20 °C).

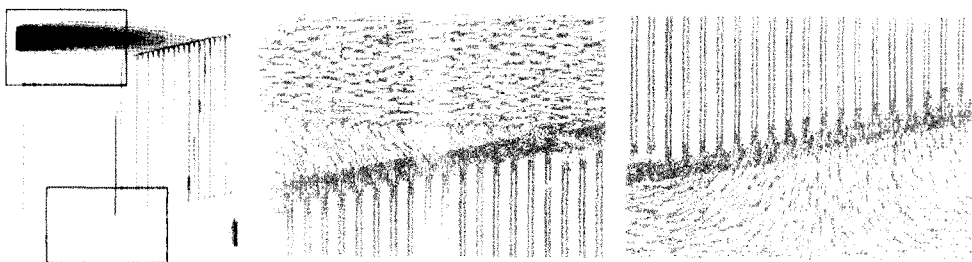


Fig. 9 Vector plot of sample 2.

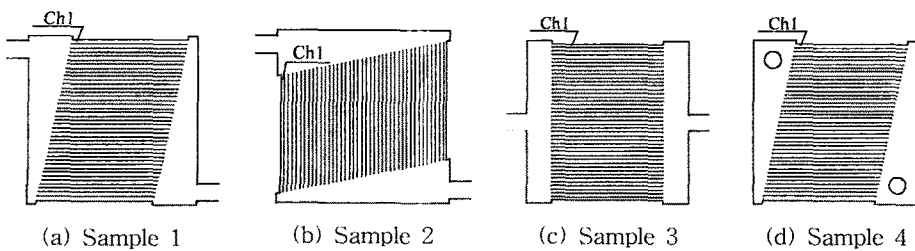


Fig. 10 Number of channel for each sample.

때문에 0에 가까울수록 유량분배가 균일하다.

$$FR(\%) = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^{N_c} m_i} \times 100 \quad (5)$$

$$S = \sqrt{\left\{ \sum_{i=1}^{N_c} \left(\frac{m_i - m_{ideal}}{m_{ideal}} \right)^2 \right\} / N_c} \quad (6)$$

Fig. 11은 질량유량이 0.7 kg/min일 때 각 채널의 유량비를 나타낸 것이다. 샘플 1과 3의 경우 각각 채널 3번과 21번에 유량이 편중됨을 확인하였다. 이러한 경향은 김 등⁽⁷⁾이 제시한 결과와 동일하며 이는 입출구의 방향과 채널의 방향이 평행하여 채널 내 유량분배가 입구의 관성의 영향을 많이 받기 때문이라 판단된다.

Table 6은 질량유량 0.7~2.0 kg/min에 대해서 샘플별로 유량분배의 균일도 S와 j/f factor를 비교한 결과이다. 샘플 3과 비교하였을 때 채널 유동 방향에 수직한 샘플 4의 경우 유량분배가 약 최대

약 65.7% 가량 개선되었으며 j/f factor도 최대 약 42.6% 향상됨을 알 수 있다. 샘플 2의 경우 S가 가장 작지만 작동유체의 재순환으로 인해 j/f factor에 부정적인 영향을 주었다고 판단된다.

3.4 채널 배열의 구배에 대한 영향

권 등⁽⁸⁻⁹⁾은 기존의 연구에서 채널의 폭과 높이가 워터블록의 성능에 미치는 영향을 실험과 수치적으로 연구한 바 있다. 연구결과로서 채널폭 0.5~0.9 mm, 채널높이 1.5~4.5 mm의 범위에서 열저항은 채널폭이 좁고 채널높이가 높을수록 낮게 나타났으며, 압력강하의 경우에는 채널폭이 좁고 채널높이가 낮을수록 크게 나타났다.

여기에서는 워터블록의 최적화를 위해 j/f factor가 가장 뛰어난 샘플 4를 기준으로 채널 배열의 구배를 증감하여 유량분배 및 성능에 미치는 영향을 수치해석으로 살펴보았다.

Table 6에서 채널 배열의 구배변화를 준 샘플 4-1과 4-2는 샘플 4에 비해 j/f factor는 거의 비

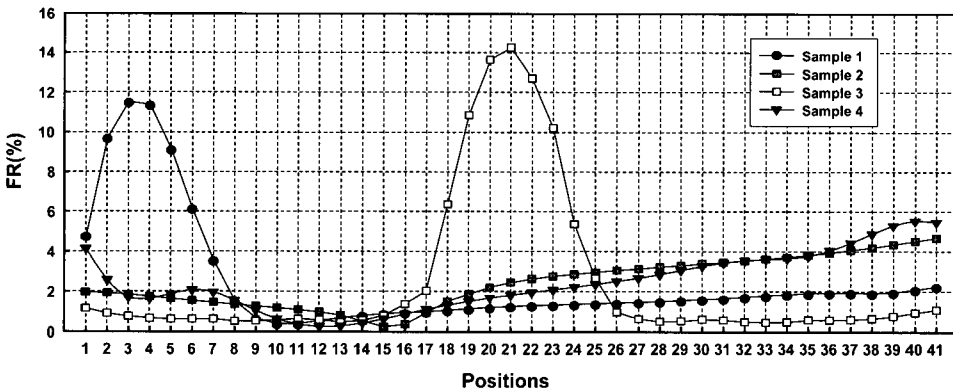
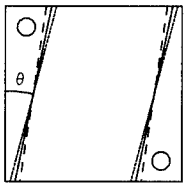


Fig. 11 Flow rate ratio in each channel.

Table 6 Comparison of results for different angle of channel arrangement

Sample No.	$\theta(^{\circ})$	Flow rate								
		0.7 kg/min		1.2 kg/min		1.7 kg/min		2.0 kg/min		
		S	j/f	S	j/f	S	j/f	S	j/f	
1	12	1.16	0.0135	1.26	0.0105	1.31	0.0091	1.34	0.0084	— Sample 4 - - - Sample 4-1 ····· Sample 4-2
2	12	0.51	0.0117	0.53	0.0083	0.54	0.0067	0.55	0.0060	
3	0	1.60	0.0126	1.75	0.0095	1.83	0.0082	1.85	0.0075	
4	12	0.60	0.0153	0.60	0.0130	0.63	0.0115	0.64	0.0107	
4-1	8	0.44	0.0156	0.53	0.0127	0.58	0.0113	0.62	0.0105	
4-2	16	0.33	0.0156	0.40	0.0128	0.46	0.0113	0.49	0.0105	

숫하지만, 유량분배의 균일도는 샘플 4-1에서 최대 약 26.7%, 샘플 4-2에서 최대 약 45% 크게 상승하였다. 따라서 채널각도 16°의 구배를 가지는 샘플 4-2가 가장 최적화된 워터블록이라 판단된다.

수치해석으로부터 얻어진 결과를 토대로 j 및 f 의 상관식을 최소자승법에 의한 회귀분석을 통하여 식(7)~(8)에 나타내었으며, j 의 상관식은 최대 4.7%, 최소 0.2%의 오차를 가지며, f 의 상관식은 최대 2.8%, 최소 0.1%의 오차를 가진다.

$$j = 0.861(Re)^{-0.486}(\tan\theta)^{0.008} \quad (7)$$

$$f = 10.913(Re)^{-0.121}(\tan\theta)^{-0.056} \quad (8)$$

4. 결 론

미세채널 워터블록의 채널 내 유량분배에 따른 열유동 특성에 대해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) CFD를 활용한 미세채널 워터블록의 열유동 해석결과와 실험결과는 바닥면의 온도에서 약 2~5%, 압력강하에서 약 4~7% 이내에서 잘 일치하고 있어 해석의 타당성을 검증할 수 있다.

(2) 입출구의 위치가 채널 유동방향에 수직한 샘플 4의 경우 샘플 3에 비해 유량분배의 균일도가 최대 약 65.7% 가량 개선되었으며 j/f factor도 최대 약 42.6% 향상됨을 알 수 있다.

(3) 워터블록의 최적화를 위해 j/f factor가 가장 뛰어난 샘플 4를 기준으로 채널 배열의 구배변화를 준 샘플 4-1과 4-2는 샘플 4에 비해 j/f factor는 거의 비슷하지만, 유량분배의 균일도는 샘플 4-1에서 최대 약 26.7%, 샘플 4-2에서 최대 약 45% 상승하였다. 따라서 채널각도 16°의 구배를 가지는 샘플 4-2가 가장 최적화된 워터블록이라 판단된다.

(4) 수치해석으로부터 얻어진 결과를 토대로 j 및 f 의 상관식을 식(7)~(8)에 나타내었으며, j 의 상관식은 최대 4.7%, 최소 0.2%의 오차를 가지며, f 의 상관식은 최대 2.8%, 최소 0.1%의 오차를 가진다.

후 기

본 연구는 산업기술연구회의 “초고속 전자기기

용 마이크로 냉각시스템 상용화 기술개발”에 의해 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

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, No. 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, No.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, No.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. Kim, M.S., Lee, K.S., 2006, Performance analysis on a multi-pass multi-branch heat exchanger according to pass arrangement, Trans. of the KSME B, Vol. 30, No. 8, pp. 741-748.
8. Kwon, O.K., Choi, M.J., Cha, D.A., Yun, J.H., 2008, A study on thermal performance of micro channel waterblock for computer CPU cooling, Trans. of the KSME B, Vol. 32, No. 10, pp. 776-783.
9. Kwon, O.K., Choi, M.J., Cha, D.A., Yun, J.H., 2007, A Numerical analysis on the cooling performance of microchannel waterblock for computer CPU cooling, Journal of Industrial Technology, Vol. 17, No. 4, pp.176-187.