

컴퓨터 CPU 냉각용 미세채널 워터블록의 열성능에 관한 연구

권오경[†] · 최미진* · 차동안* · 윤재호*

(2008년 6월 24일 접수, 2008년 8월 21일 수정, 2008년 8월 25일 심사완료)

A Study on Thermal Performance of Micro Channel Water Block for Computer CPU Cooling

Oh-Kyung Kwon, Mi-Jin Choi, Dong-An Cha and Jae-Ho Yun

Key Words: Base Temperature(표면온도), Micro Channel(미세채널), Pressure Drop(압력강하), Thermal Resistance(열저항), Water Block(워터블록)

Abstract

The object of this paper is to study on the thermal performance of a micro channel water block for computer CPU cooling. The effects of liquid flow rate, micro channel width and height on the thermal performances of water block are investigated experimentally. The water block was fabricated Al and machined with a micro milling. The water block consisted of rectangular micro channels 0.5 to 0.9 mm width and 1.5 to 4.5 mm height. The experiments were conducted using deionized water, over a liquid flow rate ranging from 0.2 to 2.0 kg/min. The base temperature and thermal resistance decrease with increasing of liquid flow rate. The increase of a channel height is more effective on the thermal resistance than the decrease of a channel width. At the flow rate of 0.7 kg/min, input power of 100 W, the base temperature and thermal resistance of sample 6 is 33°C and 0.13 °C/W respectively.

기호설명

C_p	: 비열	[J/kg · °C]
D_h	: 수력직경	[mm]
H_{ch}	: 채널높이	[mm]
I	: 전류	[A]
ΔP	: 압력강하	[kPa]
Q	: 열전달량	[W]
R	: 열저항	[°C/W]
T_{base}	: 워터블록 표면 온도	[°C]
Δt	: 입출구 온도차이	[°C]
V	: 전압	[V]
W_{ch}	: 채널폭	[mm]
a	: 종횡비	

1. 서론

최근의 전자기기는 갈수록 고집적화, 고성능화가 되면서 이로 인해 시스템의 단위 면적당 발열량이 급격히 증가하여 열적인 문제로 인한 시스템 오류와 기기 수명이 크게 단축되고 있는 실정이다. 이에 따라서 국내외의 많은 연구자들은 고성능, 컴팩트한 전자기기 냉각장치 개발에 연구를 집중하고 있으며, 이러한 경향은 앞으로 더욱 가속될 전망이다.

국내외에서 전자기기 냉각방법으로 많이 사용되고 있는 공냉 방식(Air Cooling)의 경우 팬터입 4이상의 CPU가 등장하면서 CPU 소비전력은 100 W 정도에 이르게 되어 냉각의 한계성, 소음 등이 점차 문제로 제기되고 있다. 이에 대한 기술 대안으로 일본, 대만 등을 중심으로 수냉 방식(Liquid Cooling)의 제품들이 출시되어 컴퓨터에

[†] 책임저자, 회원, 한국생산기술연구원 열유체시스템팀
E-mail : kwonok@kitech.re.kr

TEL : (041)589-8528 FAX : (041)589-8330

* 회원, 한국생산기술연구원 열유체시스템팀

장착되고 있다.

수냉 방식은 펌프를 통하여 액체가 순환되며 워터블록에서 열을 흡수하고 라디에이터에서 열을 방출하여 냉각하는 방식으로서 물이 가지는 높은 열전도율로 인하여 냉각시스템의 효율과 소음이 크게 향상되는 것으로 보고되고 있다. 수냉 방식은 워터블록(Water block), 라디에이터(Radiator), 펌프(Pump), 팬(Fan), 저장조(Reservoir) 및 냉각수 배관 등으로 구성되어 있으며 이중에서도 워터블록의 성능이 수냉 방식에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

특히 Tuckerman 등⁽¹⁾은 미세채널을 이용한 초고집적회로(VLSI)의 냉각에 관한 연구를 처음으로 제안하였으며, 이들은 정상상태의 관내유동에서 관내 열전달계수가 관경에 반비례한다는 것에 착안하여 미세채널을 만들고 그 채널속으로 유체를 흘려 냉각하는 방식을 구현하였고 이 미세채널을 이용한 냉각실험을 통하여 790 W/cm^2 이라는 높은 냉각성능을 구현하였으며 이는 그 당시 알려진 어떤 방식보다 큰 냉각능력을 나타낸 것이었다. 이후 많은 연구자들이 보다 효율적인 냉각메커니즘으로 미세채널을 이용한 열전달에 큰 관심을 갖게 되었으며 미세채널 히트싱크에 대한 실험 및 수치해석 등의 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽²⁻⁵⁾

또한 최근에는 로봇 냉각을 위해서 비금속 재질을 이용한 수냉식 냉각판에 대한 연구도 수행되었다.⁽⁶⁾

본 연구에서는 컴퓨터 CPU 냉각용 미세채널 워터블록의 열성능 특성을 평가하기 위한 실험을 수행하였다. 냉각수는 증류수를 사용하고 채널폭과 높이가 다른 6종류의 미세채널 워터블록을 설계, 제작하여 냉각수유량, 채널폭, 높이 등이 열저항 및 압력강하에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 워터블록

Fig. 1은 실험에 사용된 워터블록을 나타낸 것으로 크기는 $40 \times 40 \text{ mm}$, 채널길이는 19 mm 이며, 알루미늄 재질로 마이크로 밀링가공을 통하여 제작하였다. 워터블록 외면에는 오링을 체결하여 누설을 방지할 수 있도록 하였으며, 일정한 헤더

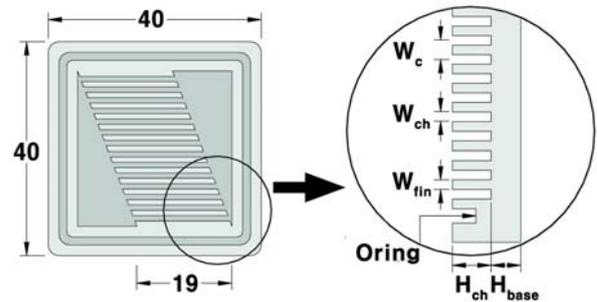


Fig. 1 Details of micro channel water block

부를 가질 수 있게 설계하였다.

Table 1은 실험에 사용된 미세채널 워터블록 6종류의 샘플 사양을 나타낸 것이며, 채널의 폭은 $0.5 \sim 0.9 \text{ mm}$ 이고, 채널의 높이는 $1.5 \sim 4.5 \text{ mm}$ 이다. 샘플별 수력직경(Hydraulic diameter)은 $0.75 \sim 1.13$, 종횡비(Aspect ratio)는 $1.67 \sim 9.0$ 에 해당된다.

2.2 열원부

열원부를 모사하기 위해 $40 \times 40 \text{ mm}^2$ 의 면적과 20 mm 의 높이를 가지는 구리재질의 히팅블록에 내경 6 mm 구멍 3개를 뚫어 각각 100 W (2 A , 50 V) 용량의 카트리지 히터를 삽입하여 최대 300 W , 18.75 W/cm^2 의 열유속이 발생할 수 있도록 제작하였다. 열원부는 외부로의 열손실을 최소화하기 위해 테프론 재질의 단열블록(상하 20 mm , 폭 30 mm)으로 단열하였다. 히터의 발생열량은 직류 전원공급장치(Kikusui, PAN250-4.5A)의 전압을 조절함으로써 조절하였다.

히팅블록 상부 표면에는 T 타입의 열전대 5개를 설치하여 온도를 측정할 수 있도록 하였으며, 히팅블록의 표면 온도는 열전대 5개의 평균값을 사용하였다.

Fig. 2는 열원부를 포함하는 시험부를 나타낸 것으로 냉각수 입출구포트, 미세채널 워터블록, 히팅블록, 상하 테프론 단열재 등으로 되어 있다.

워터블록의 바닥면과 히팅블록의 상부 표면에는 TIM(Thermal Interface Material)인 써멀그리스(Shinetsu, G-746)를 일정두께로 도포하여 접촉저항을 감소시켰다.

2.3 실험장치

Fig. 3은 본 연구에 사용된 실험장치를 나타낸 것이다. 냉각수의 온도와 유량을 일정하게 유지

Table 1 Specifications of water block

Sample No.	W_{ch} (mm)	H_{ch} (mm)	W_{fin} (mm)	H_{base} (mm)	W_c (mm)	D_h (mm)	α	Number of channel	Heat transfer area(A_{conv} , m^2)
1	0.5	1.5	0.5	1.0	0.5	0.75	3.0	26	2.116×10^{-3}
2	0.7	1.5	0.5	1.0	0.6	0.95	2.15	21	1.845×10^{-3}
3	0.9	1.5	0.5	1.0	0.7	1.13	1.67	18	1.695×10^{-3}
4	0.5	2.5	0.5	1.0	0.5	0.83	5.0	26	3.223×10^{-3}
5	0.5	3.5	0.5	1.0	0.5	0.88	7.0	26	4.329×10^{-3}
6	0.5	4.5	0.5	1.0	0.5	0.9	9.0	26	5.436×10^{-3}

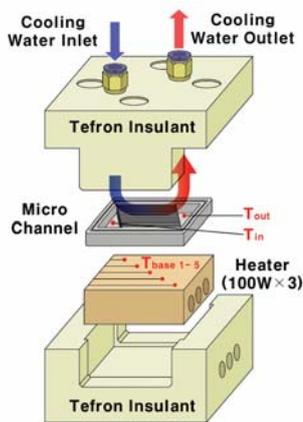


Fig. 2 Test section of experimental setup

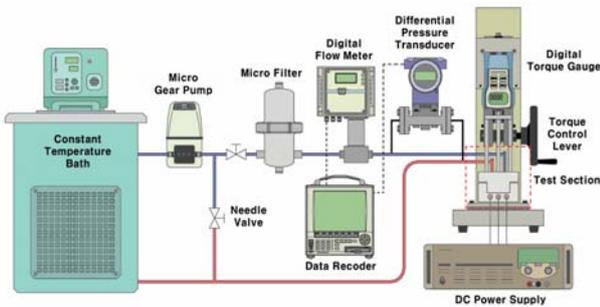


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

하기 위해 항온조(Jeio tech, RW-0525G)와 정유량 펌프(Micropump, GB-P35)를 사용하였다. 시스템의 맥동방지를 위해 바이패스 밸브를 사용하였고, 냉각수의 이물질을 여과하기 위해 5 μ m의 마이크로 필터(Ultrafilter GmbH, P-SM 03/10)를 사용하였다. 시험부의 접촉저항을 최소화하기 위해 디지털 토크 게이지(Shimpo, FGN-20B)를 사용하여 20kgf/cm²의 힘을 가하였다. 시스템 및 시험부의 열손실을 막기 위해 실험장치 전구간에 걸쳐 단열 처리를 하였다.

또한 워터블록 입출구의 열교환량을 측정하기 위해 질량유량계(Badger Meter, RCM-125), 열전대

(Omega, T-type), 차압계(Rosemount, 3051S)를 설치하였다. 각 계측장치는 보정(Calibration)을 수행한 후 유량, 온도 및 차압 등을 데이터 레코더(Yokogawa, MV200)를 이용하여 정상상태에서 모든 결과를 0.5초 간격으로 저장하였다.

계측장비의 오차로써 유량은 $\pm 0.1\%$, 온도는 $\pm 0.15\%$, 압력은 $\pm 0.1\%$ 이다. 실험 데이터에 대한 불확실성⁽⁷⁾ 해석을 통해서 입력열량은 $\pm 1.12\%$, 열저항은 $\pm 1.35\%$ 의 값을 가진다.

2.4 실험방법

실험에 사용된 냉각수는 증류수를 사용하였으며, 냉각수의 입구 온도는 항온조를 통하여 20 $^{\circ}$ C로 일정하게 고정시켜 놓고 정유량펌프를 통하여 냉각수의 유량을 변화시켰다. 히팅블록에는 직류 전원공급장치의 전압을 조절함으로써 히터의 발생 열량을 조절하였다. Table 2는 실험에 사용된 실험조건을 나타낸 것이다.

실험은 냉각수의 입·출구온도 및 히팅블록의 표면온도가 3분 이상 변화가 없으면 정상상태로 보고 이 때의 실험데이터를 취득하였으며, 각각 수회 이상 반복실험하고 평균값을 취하여 실험에 의한 오차를 최소화하였다. 또한 입력 열량($P_{input} = IV$)과 출력 열량인 냉각수의 입출구 열교환량($Q = \dot{m}_c c_p (T_{c,out} - T_{c,in})$)의 열평형(Heat balance)을 비교하여 10%이내에 들어오는 값을 데이터 처리하였다.

2.5 결과처리

입력 열량(P_{input})에 대하여 발열체인 히팅블록의 표면온도(T_s)와 워터블록에 유입되는 냉각수의 입구온도($T_{c,in}$)를 이용하여 워터블록의 총 열저항(R_{th})을 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

총 열저항은 전도 열저항(R_{cond}), 확산 열저항

Table 2 Experimental conditions

Parameters		Range
Water	Flow rate (kg/min)	0.2, 0.7, 1.2, 1.7, 2.0
	Temp.(°C)	20
Input power(W)		100, 120

(R_{sp}), TIM 열저항, 대류 열저항(R_{conv})의 합으로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

또한 전도 열저항은 식 (3)과 같이, 대류 열저항은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 L 은 워터블록 밑면의 두께이며, A_s 는 히팅블록과 워터블록의 접촉면적이며, A_{conv} 는 유로와 냉각수의 접촉면적인 대류 열전달 면적이다.

TIM의 접촉 열저항은 $0.006 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$ 의 값을 적용하였으며, 확산 열저항은 히팅블록과 워터블록의 표면적이 동일하기 때문에 없는 것으로 간주하였다.

종횡비와 수력직경은 식 (5) 및 (6)과 같이, 레이놀즈수와 누셀트수는 식 (7) 및 (8)로 정의하였다.

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

$$R_{th} = R_{cond} + R_{sp} + R_{TIM} + R_{conv} \quad (2)$$

$$R_{cond} = \frac{L}{kA_s} \quad (3)$$

$$R_{conv} = \frac{1}{hA_{conv}} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{H_{ch}}{W_{ch}} \quad (5)$$

$$D_h = \frac{2W_{ch}H_{ch}}{W_{ch} + H_{ch}} \quad (6)$$

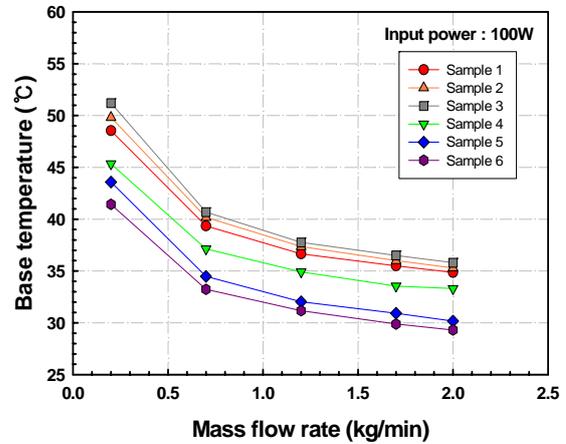
$$Re = \frac{\rho_f D_h V}{\mu_f} \quad (7)$$

$$Nu = \frac{hD_h}{k_f} \quad (8)$$

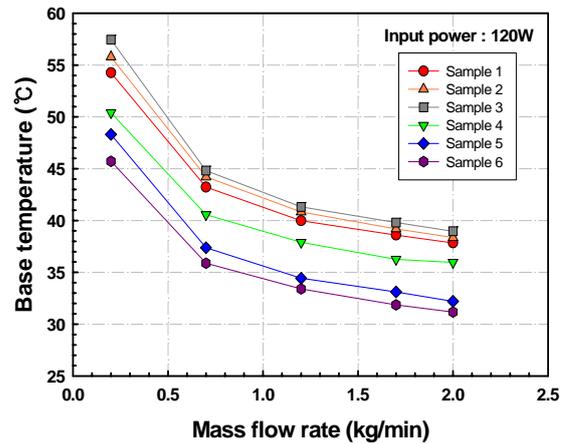
3. 결과 및 고찰

Fig. 4의 (a)와 (b)는 입력 열량 100 W 및 120 W인 경우 유량에 따른 히팅블록 표면의 온도변화를 나타낸 것이다.

Fig. 4 (a)에서 입력 열량 100 W인 경우 냉각수



(a) Input power : 100 W



(b) Input power : 120 W

Fig. 4 Variation of base temperature with the flow rate

질량유량 0.7 kg/min 이상에서 샘플 2와 3을 제외한 샘플에서 40°C 이하로 작동함을 알 수 있었다. 또한 Fig. 4(b)의 입력 열량 120 W인 경우 질량유량 0.7 kg/min에서 모든 샘플의 경우 100 W보다 약 5°C 상회하는 45°C 이하에서 작동함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 일반적으로 사용되는 CPU 허용온도가 70°C 이내이므로 유량 0.2 kg/min, 120 W인 경우에도 안전하게 사용할 수 있음을 확인하였다.

Fig. 5는 입력 열량 100 W인 경우 냉각수의 질량유량에 따른 열저항의 변화를 나타낸 것이다. 냉각수 질량유량이 증가함에 따라 열저항은 1.2 kg/min이하의 적은 유량에서는 열저항이 크게 감

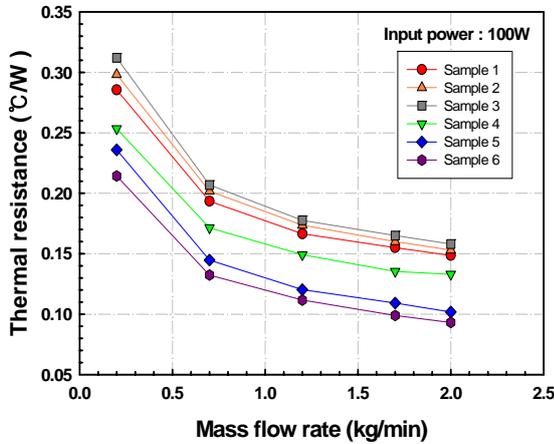


Fig. 5 Variation of thermal resistance with the flow rate at 100 W

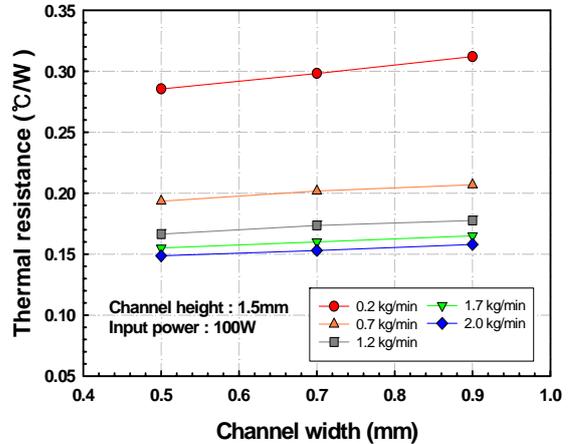


Fig. 7 Variation of thermal resistance with the channel width at 100 W

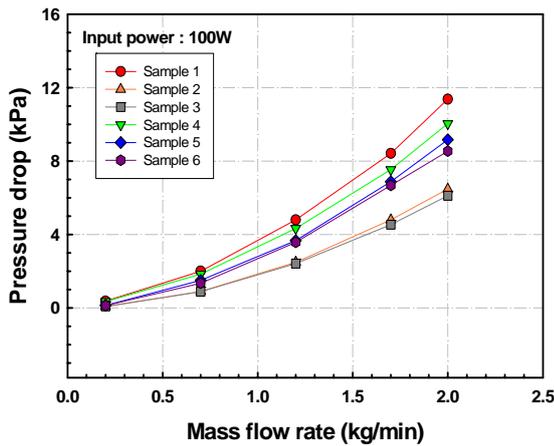


Fig. 6 Variation of pressure drop with the flow rate at 100 W

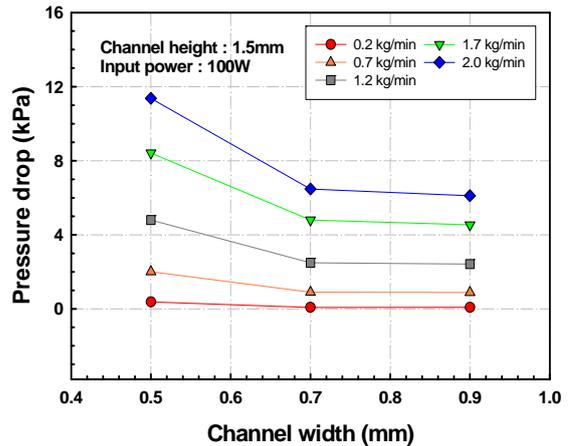


Fig. 8 Variation of pressure drop with the channel width at 100 W

소하다가 1.2 kg/min 이상에서는 변화의 폭이 상대적으로 적음을 알 수 있다. 6종류의 실험 샘플 중에서 채널폭이 좁고, 채널높이가 높은 샘플 6의 열저항이 가장 낮게 나타났으며, 채널폭이 넓고 채널높이가 낮은 샘플 3의 열저항이 가장 높게 나타났다. 이것은 채널폭이 좁고, 채널높이가 높아짐에 따라 채널내부에서의 핀에 의한 열전도와 유체의 대류열전달이 활발하게 일어나면서 얻어지는 결과로 판단된다.

일반적으로 히트싱크(Heat sink)의 열저항이 0.3 °C/W 내외⁽⁸⁾ 인 점으로 보았을 때 본 연구에서 제안하는 미세채널을 이용한 수냉식 워터블록은 실제 펌프 작동유량인 0.7 kg/min에서 0.2 °C/W이

소하게 성능이 매우 우수함을 알 수 있다. Fig. 6은 입력 열량 100 W인 경우 냉각수의 질량유량에 따른 압력강하의 변화를 나타낸 것이다. 유량이 증가함에 따라 실험 대상 모든 샘플에서 압력강하는 크게 증가하였으며, 그중에서 채널폭이 좁고, 채널높이가 낮은 샘플 1의 압력강하가 가장 크게 나타났으며, 채널폭이 넓고 채널높이가 낮은 샘플 3의 압력강하가 가장 낮게 나타났다. 이것은 채널폭이 좁고, 채널높이가 낮아짐에 따라 채널내부의 마찰저항과 유동저항의 증대에 따른 차압이 증가하는 것으로 판단된다. Fig. 7은 채널폭에 따른 미세채널 워터블록의 열저항을 살펴본 것이다. 채널높이가 1.5 mm인

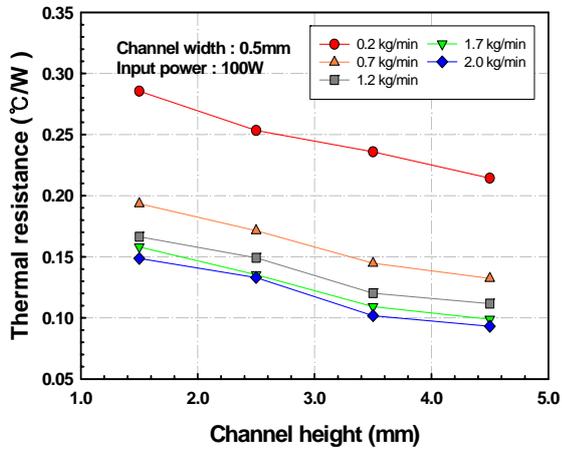


Fig. 9 Variation of thermal resistance with the channel height at 100 W

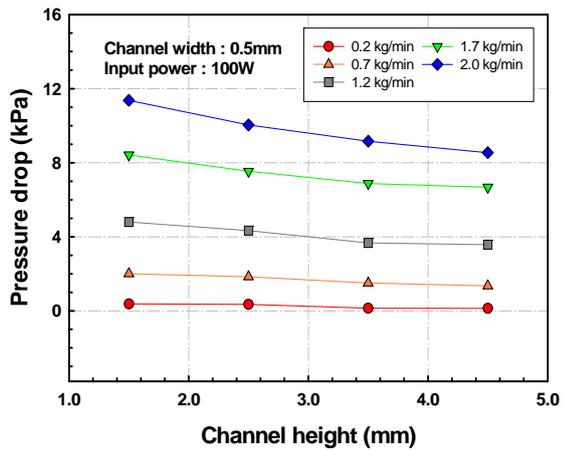


Fig. 10 Variation of pressure drop with the channel height at 100 W

경우 동일한 유량에서 채널폭이 넓어짐에 따라 열저항은 다소 증가하는 경향을 보였다. 냉각수 유량이 적은 경우 열저항의 변화가 크게 나타났으나 냉각수 질량유량 2.0 kg/min에서는 채널폭의 영향이 거의 나타나지 않았다.

Fig. 8은 채널폭에 따른 미세채널 워터블록의 압력강하를 살펴본 것이다. 채널높이가 1.5 mm인 경우 동일한 질량유량에서 채널폭이 좁아짐에 따라 압력강하는 크게 증가하는 경향을 보였으며, 냉각수유량이 큰 경우 큰 폭으로 변화하였다.

Fig. 9는 채널높이에 따른 미세채널 워터블록의 열저항을 살펴본 것이다. 채널폭이 0.5 mm인 경우 동일한 질량유량에서 채널높이가 높아짐에 따

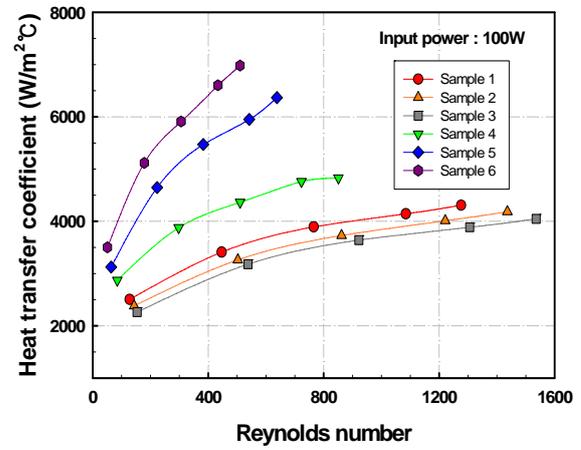


Fig. 11 Variation of heat transfer coefficient with the Reynolds number

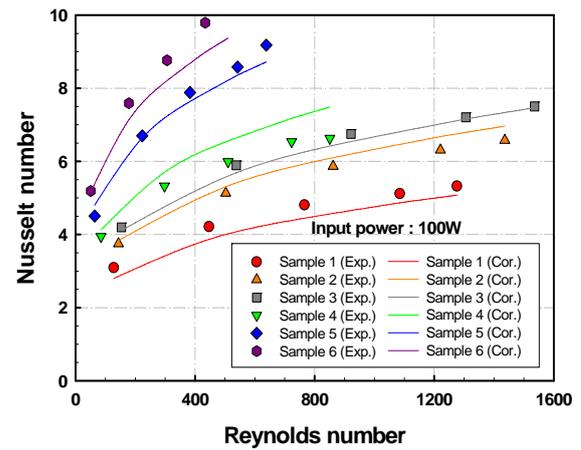


Fig. 12 Variation of Nusselt number with the Reynolds number

라 열저항은 크게 감소하는 경향을 보였으며, 냉각수유량이 적은 경우 그 경향은 더욱 크게 나타났다. Fig. 7의 채널폭의 변화에 비해 채널높이에 따른 열저항은 크게 변화하는 것으로 나타났다. 따라서 열저항은 채널폭 보다는 채널높이의 변화에 따라 그 영향이 더욱 크게 나타나는 것을 확인하였다.

Fig. 10은 채널높이에 따른 미세채널 워터블록의 압력강하를 살펴본 것이다. 동일한 질량유량에서 채널높이가 높아짐에 따라 압력강하는 크게 감소하는 경향을 보였으며, 냉각수 유량이 큰 경우 그러한 경향은 더욱 크게 나타났다. Fig. 8의 채널폭의 변화에 비해 채널높이에 따른 압력강하

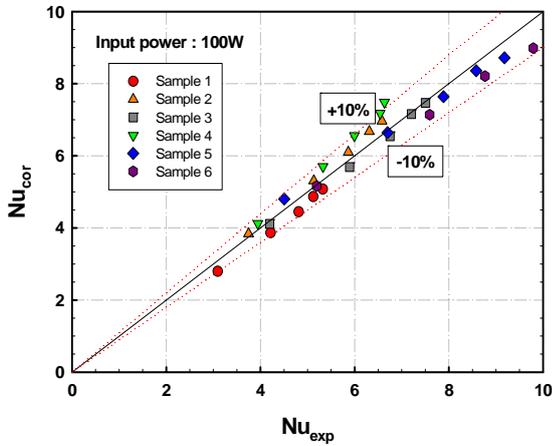


Fig. 13 Correlated Nusselt number verse measured Nusselt number

는 그 영향을 다소 적게 받음을 확인하였다.

Fig. 11과 12는 레이놀즈수 증가에 따른 열전달 계수와 누셀트수의 변화를 나타낸 것이다. 레이놀즈수가 증가함에 따라 열전달계수와 누셀트수는 증가하는 경향을 보이며, 특히 동일한 레이놀즈수에서 샘플 6과 5의 열전달성능이 가장 크게 나타났다.

Fig. 12에서 미세채널 워터블록의 열전달 현상을 나타내는 누셀트수에 대한 상관식은 센터에서의 채널거리(W_c), 수력직경(D_h), 채널폭(W_{ch}), 채널높이(H_{ch})를 무차원화하고, 냉각수 유량에 대한 레이놀즈수를 추가하여 상관식을 식 (9)와 같이 도출하였다. 식 (9)는 $51 \leq Re \leq 1536$, $Pr=6.97$ 범위에서 적용가능하다.

$$Nu = 0.062 \left(\frac{D_h}{W_c} \right)^{4.76} \left(\frac{W_{ch}}{H_{ch}} \right)^{0.016} Re^{0.259} Pr^{0.33} \quad (9)$$

Fig. 13은 실험으로 측정된 누셀트수와 상관식으로 얻어진 결과를 나타낸 것으로 실험값과 상관식과의 오차는 최대 12.89%, 평균 $\pm 5.28\%$ 이내로 비교적 잘 일치하였다.

4. 결론

컴퓨터 CPU 냉각용 미세채널 워터블록의 열성능을 실험적으로 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 입력 열량 100 W인 경우 냉각수 질량유량 0.7 kg/min 이상에서 샘플 2와 3을 제외한 샘플에서 40°C이하로 작동하였으며, 120 W인 경우 100 W보다 약 5°C 상회하는 45°C이하에서 작동을 알 수 있었다.

(2) 냉각수 질량유량이 증가함에 따라 열저항은 크게 감소하였으나 압력강하는 그와 반대로 크게 증가하였다. 열저항의 경우에는 채널폭이 좁고 높이가 높은 샘플 6이 가장 낮게 나타났으며, 압력강하의 경우에는 채널폭이 좁고 높이가 낮은 샘플 1이 가장 높게 나타났다.

(3) 열저항은 채널높이의 변화가 채널폭의 변화에 비해 크게 영향을 받는 것으로 나타났으며, 압력강하는 채널폭이 채널높이에 비해 그 영향을 크게 받는다는 것을 알 수 있었다.

(4) 레이놀즈수가 증가함에 따라 열전달계수와 누셀트수는 증가하는 경향을 보였으며, 동일한 레이놀즈수에서 특히 샘플 6과 5의 열전달성능이 가장 크게 나타났다. 미세채널 워터블록의 열전달 현상을 나타내는 누셀트수에 대한 상관식을 도출하였으며, 그 식은 $51 \leq Re \leq 1536$, $Pr=6.97$ 범위에서 실험값과 오차가 최대 12.89%, 평균 $\pm 5.28\%$ 이내로 비교적 잘 일치하였다.

$$Nu = 0.062 \left(\frac{D_h}{W_c} \right)^{4.76} \left(\frac{W_{ch}}{H_{ch}} \right)^{0.016} Re^{0.259} Pr^{0.33}$$

후 기

본 연구는 국가과학기술위원회산하 산업기술연구회가 지원하는 협동연구사업인 "차세대 냉각시스템 기술개발"의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Tuckerman, D.B and Pease, R.F., 1981, "High Performance Heat Sinking for VLSI," *IEEE Electronic Devices Letters EDL-2*, pp. 126~129.
- (2) Zhang, H.Y., Pinjala, D., Wong, T.N., Toh, K.C. and Joshi, Y.K., 2005, "Single-Phase Liquid Cooled Microchannel Heat Sink for Electronic Packages," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 25, pp. 1472~1487.

- (3) Lee, P.S., Garimella, S.V and Liu, D., 2005, "Investigation of Heat Transfer in Rectangular Microchannels," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 1688~1704.
- (4) Kawano, K., Sekimura, M., Minakami, K., Iwasaki, H. and Ishizuka, M., 2001, "Development of Micro Channel Heat Exchanging," *JSME International Journal B*, Vol. 44, pp. 592~598.
- (5) Kwon, O. K., Choi, M. J., Cha, D. A. and Yun, J. H., 2007, "An Experimental Study on Cooling Performance of Microchannel Waterblock for Electronic Devices Cooling," Proceedings of the KSME 2007 Spring Annual Meeting, pp. 2432~2437.
- (6) Karng, S. W., Lee, S. W., Hwang, K. D. and Kim, S. Y., 2007, "Thermal Performance Test of Liquid Cooling Type Cold Plates for Robot Cooling," Proceedings of the KSME 2007 Spring Annual Meeting, pp. 1864~1869.
- (7) Holman, J.P., 2000, *Experimental Method for Engineer*, 7th ed., McGraw-Hill pp. 51~60.
- (8) Incropera, Frank P., 1999, "Liquid Cooling of Electronic Devices by Single-Phase Convection," John Wiley and Sons, pp. 1~23.