

# 전자기기 냉각용 마이크로채널 워터블록의 냉각성능에 관한 수치해석

최미진<sup>†</sup> · 권오경\* · 차동안\* · 윤재호\* · 이찬\*\*

## A Numerical Analysis on Cooling Performance of Microchannel Waterblock for Electronic Devices Cooling

Mi-jin Choi, Oh-kyung Kwon, Dong-an Cha, Jae-ho Yun and Chan Lee

**Key Words:** Microchannel(마이크로채널), Pressure drop(압력강하), Thermal resistance(열저항),  
Waterblock(워터블록)

### Abstract

The microchannel waterblock has a good capability in the cooling of electronic devices. The object of this paper is to establish the scheme of design for the microchannel waterblock. The effects of flow rate and channel size on the cooling performances are investigated. It was found that the optimum flow rates were ranged from 0.7 lpm to 1.4 lpm. The thermal resistance at 2.0 lpm and 100 W was 0.13 °C/W. Decrease in the width of channels is more effective for the improvement in the cooling performances of microchannel waterblock than increase in the height of channels. The increase of pressure drop resulted from decrease in the width of channels can be decreased by increasing the height of channels.

### 기호설명

$c_p$	: 비열 [J/kg · K]	base	: 워터블록 바닥면
H	: 높이 [m]	ch	: 채널
k	: 열전도계수 [J/m · K]	f	: 유체
L	: 채널 길이 [m]	fin	: 핀
Q	: 열량 [W]	in	: 워터블록 입구
R <sub>th</sub>	: 열저항 [°C/W]	s	: 고체
T	: 평균온도 [°C]		
W	: 폭 [m]		
$\rho$	: 밀도 [kg/m <sup>3</sup> ]		
$\mu$	: 점성계수 [kg/m · sec]		

하첨자

### 1. 서론

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. 이러한 상황에서 칩으로부터 발생하는 열을 효율적으로 순환시켜 주지 못할 경우, 시스템 온도 상승으로 인해 칩 성능의 안정성에 문제가 발생한다. 이러한 이유로 전자통신 기기 및 부품의 냉각기술은 그 성능과 직결되어 다양한 형태로

† 책임저자, 한국생산기술연구원 열유체시스템팀

E-mail : kut01@kitech.re.kr

TEL : (041)589-8342 FAX : (041)589-8330

\* 회원, 한국생산기술연구원 열유체시스템팀

\*\* 회원, 수원대학교 기계공학과

연구가 진행되어 왔다.

그중 하나인 마이크로채널은 Tuckerman 등이 초고집적회로의(VLSI) 냉각을 위해 처음으로 제안하였다. 마이크로채널은 제작기술의 발달로 단위부피당 열교환 면적을 극대화 ( $\sim 10^5 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ) 할 수 있다.<sup>(1)</sup> 또한 물을 작동유체로 사용할 경우 공기를 사용할 때 보다 열전달 계수가 100배정도 큰 이점을 가지고 있다.<sup>(2)</sup> 이 때문에 물을 작동유체로한 마이크로채널에 대해 실험적, 해석적으로 활발한 연구가 진행되어 왔다. Chai et al.<sup>(3)</sup> 과 Liu and Lee<sup>(4)</sup> 은 마이크로채널내의 유체유동 및 열전달 특성을 수치적으로 해석하고 기존의 실험결과들과 비교하여 수치적 해석의 타당성을 보여주었다. Lee and Garimella<sup>(5)</sup>는 해석 결과를 바탕으로 채널내 열전달 특성을 채널의 형상비에 관한 상관식으로 나타내었으며, 그 타당성을 실험을 통해 보여주었다.

본 연구에서는 마이크로채널을 가진 워터블록에 대한 해석을 CFD상용코드인 FLUENT를 사용하여 수행 하였다. 실험결과와 비교하여 해석결

과의 타당성을 확인하였다. 또한 유량변화, 채널의 크기변화 등에 따른 워터블록의 열전달 특성 및 유동특성을 바탕으로 워터블록 설계방안을 확립하고자 한다.

## 2. 워터블록의 해석

### 2.1 워터블록의 형상

본 연구는 CPU 냉각을 위한 워터블록을 기본으로 하여 진행하였다. 냉각 시스템에서 알루미늄 재질의 워터블록은 CPU에 부착되며 원형관을 통해 유입된 물은 마이크로채널을 따라 흐른다. 이때 CPU로부터 발생된 열은 물과 함께 워터블록 외부로 빠져 나간다.

워터블록의 3차원 형상 및 세부형상은 Fig. 1과 같다. 열원에 부착된 워터블록 바닥면의 크기는 가로 세로 40 mm × 40 mm 이며 채널길이 L = 19 mm, 핀폭  $W_{fin} = 0.5\text{mm}$ , 베이스부 높이  $H_{base} = 10\text{mm}$ 이다. 각 케이스별 채널의 구체적인 치수는 Table 1 과 같다.

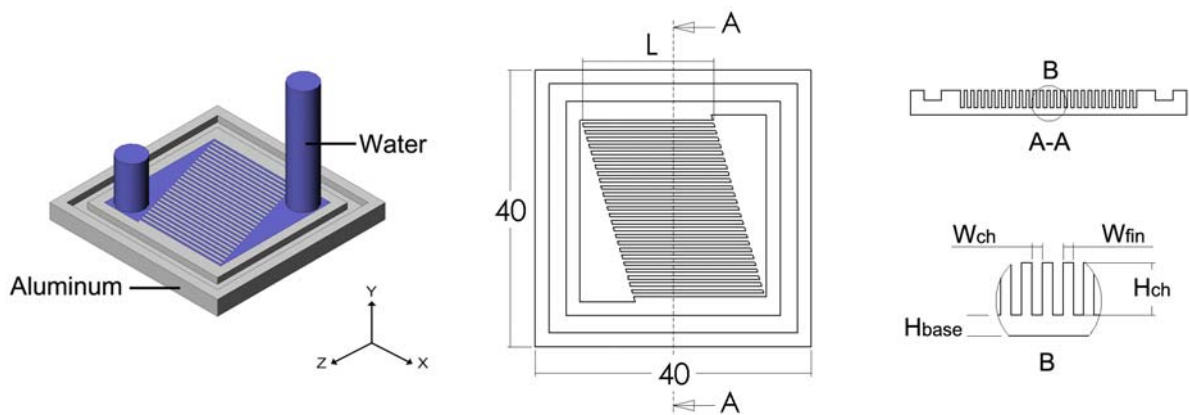


Fig. 1 Specifications of waterblock

Table 1 Dimensions of waterblock

Cases	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Wch (mm)	0.5	0.7	0.9	0.5	0.5	0.5
Hch (mm)	1.5	1.5	1.5	2.5	3.5	4.5

## 2.2 수치해법

워터블록의 수치적 해석을 위하여 CFD 상용코드인 FLUENT<sup>(6)</sup>를 사용하였으며 격자생성을 위해 GAMBIT 및 Tgrid를 사용하였다.

워터블록의 해석영역에 대해 해석의 단순화를 위해 다음과 같은 가정을 한다.

- (1) 정상상태
- (2) 층류유동
- (3) 비압축성유동
- (4) 복사열전달의 무시

이때 해석의 기본 지배방정식<sup>(6)</sup>은 다음과 같이 쓸 수 있다.

연속 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

운동량 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \quad (3)$$

에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i (\rho c_p T + \rho \frac{u_i^2}{2})) = \frac{\partial}{\partial x_i} (k_f \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_j \tau_{ij}) \quad (4)$$

$$-\frac{\partial}{\partial x_i} (k_s \frac{\partial T}{\partial x_i}) = 0 \quad (5)$$

격자계에 대한 이산화 방정식은 First order upwind scheme을 사용하였으며 압력항은 Simple 알고리즘을 사용하여 계산하였다.

해석영역에 대한 경계조건은 Fig. 2와 같다. 입구로 유입되는 물은 20°C로 일정하며, 유량은 0.2 l/min ~ 2.0 l/min 이다. 워터블록의 바닥면에는 100W의 열량이 균일하게 주어지며 해석영역의 나머지 면에 대해서는 단열로 가정하였다.

격자계의 타당성을 검증하기 위해 Case 4의 격자수를 달리 하여 해석을 수행하였으며 그 결과는 Table 2와 같다. 격자수 1,085,428개의 해석

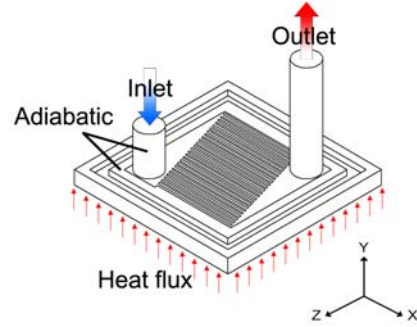


Fig. 2 Boundary conditions

Table 2 Result of numerical analysis for different grid

격자수 (개)	570,378	1,085,428	1,633,432
Base 온도 (°C)	33.06	32.30	31.71
압력강하 (kPa)	1.65	1.61	1.62

결과와 270,378개, 1,633,432개 각각의 결과차이는 3% 이내였다. 따라서 본 수치해석에서는 해석시간 등을 고려하여 1,085,428개의 결과를 사용하였다.

## 2.3 워터블록의 성능

CPU 냉각을 위한 워터블록의 성능에서 중요한 개념은 열저항이다. 워터블록의 열저항  $R_{th}$ 는 식 (6) 과 같이 정의하였다.

$$R_{th} = \frac{T_{base} - T_{in}}{Q} \quad (6)$$

$T_{base}$ 는 워터블록의 바닥면 평균온도이며  $T_{in}$ 은 유체의 유입온도,  $Q$ 는 열원으로부터 주어지는 열량이다. 열저항이 작을수록 열원과 유체의 열교환이 효율적으로 이루어진다.

워터블록의 성능에서 중요한 또다른 개념은 블록의 입구에서부터 출구에 이르기까지의 압력 강하이다. 압력 강하는 곧바로 시스템에서의 펌프 동력과 연계된다. 압력강하가 클수록 그만큼 요구되는 펌프 동력이 커지기 때문에 시스템 효율 면에서 압력강하가 작은 워터블록이 필요하다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 유량의 영향

유량에 따른 워터블록의 열저항 및 압력강하를 Fig. 3 및 Fig. 4에서 살펴보았다. 이는 Case 4에 대한 결과이며 주어진 열량은 100W이다. 해석 결과를 통해 유량이 커질수록 열저항은 감소하고 있으며 그 영향은 점차 감소함을 알 수 있다. 최고유량에서의 열저항은 0.13°C/W이다. 유량이 커질수록 압력강하는 증가하고 있으며 최고유량에서는 10kPa에 근접하고 있다. 그러나 유량증가에 따른 열저항 감소율이 둔화되고 있으므로, 워터 블록의 작동조건을 0.7 ~ 1.4 ℓ/min 이내로 제한할 경우 압력강하는 8kPa 이내이다. 실험<sup>(7)</sup>의 결과와 비교한 압력강하는 오차범위 5% 이내였으며 열저항 또한 실험과 유사한 경향을 보이고 있다.

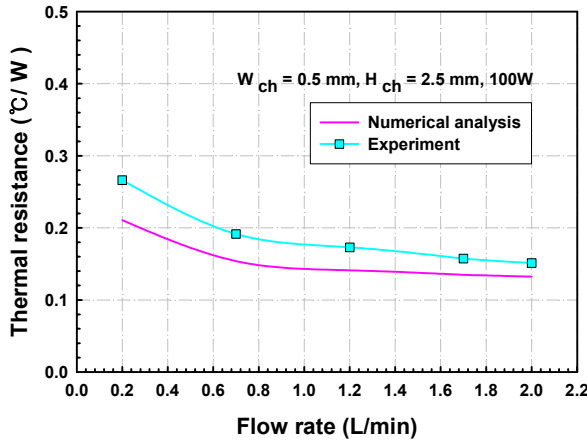


Fig. 3 Variations of thermal resistance with flow rate

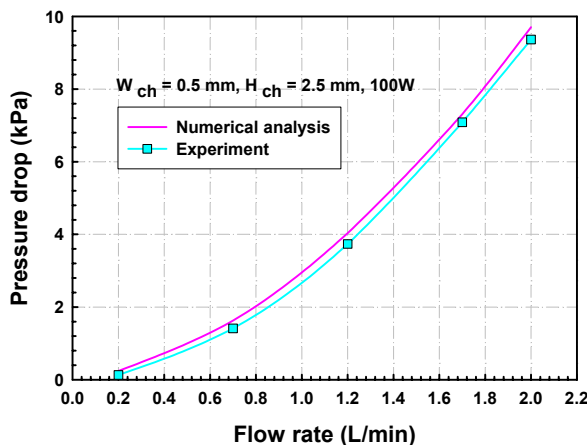


Fig. 4 Variations of pressure drop with flow rate

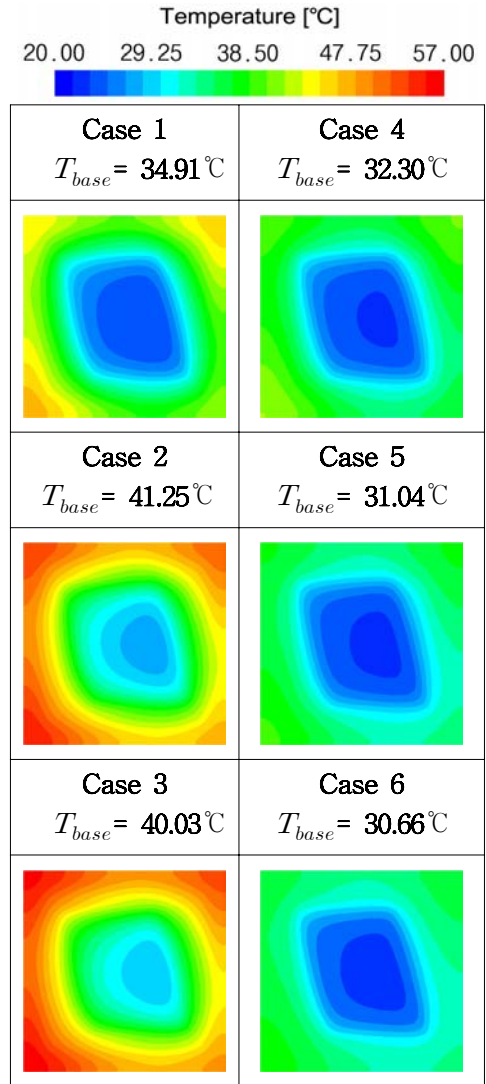
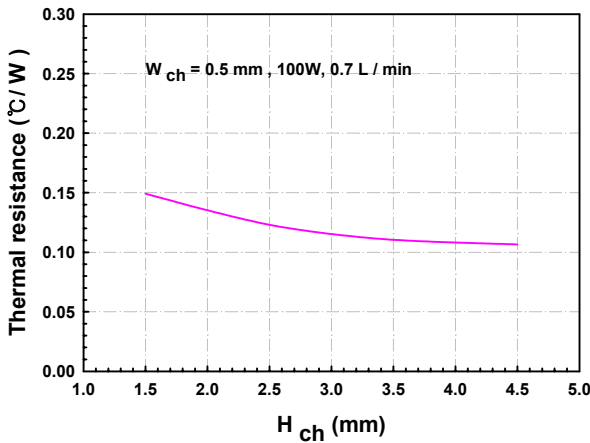


Fig. 5 Temperature distributions of plate

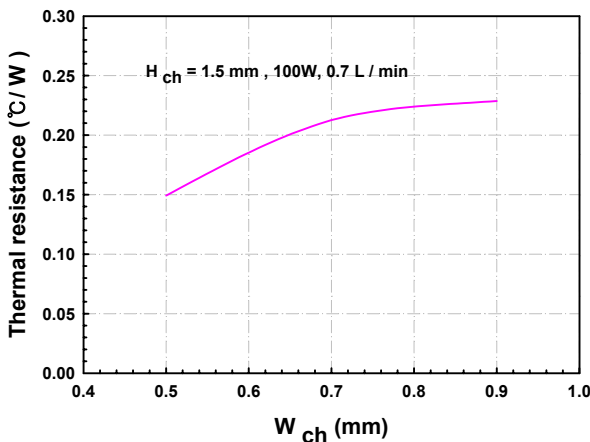
#### 3.2 채널 크기의 영향

안정된 성능을 유지하기 위한 CPU표면의 온도는 40°C~60°C이다.<sup>(5)</sup> 워터블록 바닥면의 평균온도 및 최고온도는 이를 만족해야 한다. Fig. 5에서는 각 Case에 대한 워터블록 바닥면의 온도분포를 나타낸 것이다. 채널이 위치한 부분에서 벗어날수록 온도가 높아지고 있다. 또한 채널의 폭이 넓어질수록(Case 1, 2, 3) 바닥면의 온도가 증가하는 반면, 채널의 높이가 높아질수록(Case 1, 4, 5, 6) 온도가 감소함을 확인할 수 있다. 모든 형상에서 베이스부의 평균 및 최고 온도가 적정범위 내에 있다. Case 2와 3을 제외한 나머지 결과에서는 베이스부의 최저온도가 입구온도에 근접하여 열전달 성능이 뛰어난 것을 예상 할 수 있다.

Fig. 6은 채널 높이와 폭의 변화에 따른 열저항을 살펴본 것이다. 채널 높이 증가에 따른 열저항의 감소율보다 채널 폭의 감소에 따른 열저항 감소율이 큰 것을 확인할 수 있다. 이것은 채널 높이 증가로 인한 열전달 면적의 증가보다 채널 폭 감소로 인한 열전달 면적의 증가가 더 크기 때문으로 판단된다. 또한 채널 높이 증가에 따른 열저항 감소율은 둔화되고 있는 반면 채널 폭 감소에 따른 열저항 감소율은 증가하고 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 효과적인 워터블록의 설계는 채널 폭을 좁혀 개수를 증가시키는 것이다. 그러나 Fig. 7을 통해 확인할 수 있듯이 채널 폭 감소는 압력강하의 상승을 동반한다. 이때 채널 높이를 높임으로서 제한적으로 압력강하를 감소시킬 수 있다.

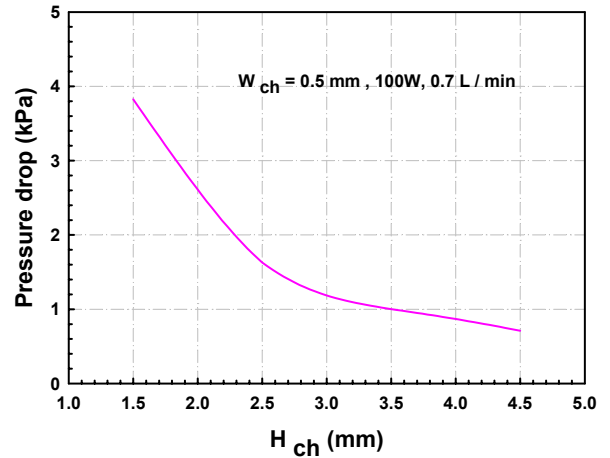


(a) Thermal resistance with H<sub>ch</sub>

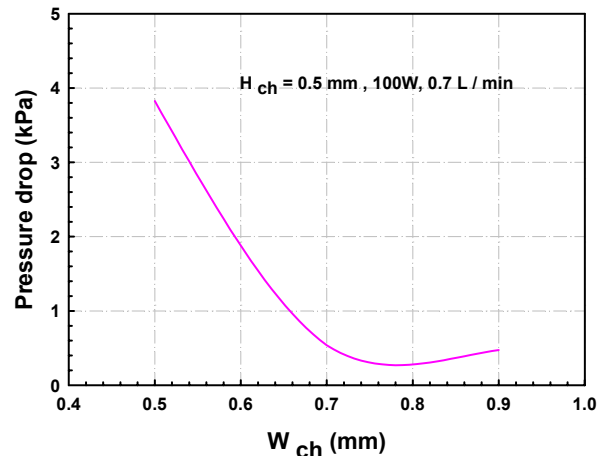


(b) Thermal resistance with W<sub>ch</sub>

Fig. 6 Variations of thermal resistance with H<sub>ch</sub> and W<sub>ch</sub>



(a) Pressure drop with H<sub>ch</sub>



(b) Pressure drop with W<sub>ch</sub>

Fig. 7 Variations of pressure drop with H<sub>ch</sub> and W<sub>ch</sub>

### 3.3 채널내 유량분포

각 채널 내의 유량분포가 균일하지 않을 경우 워터블록의 밀면에 국부적으로 높은 온도가 발생한다. 그 때의 온도가 60°C 이상일 경우 CPU 성능 저하를 가져올 수 있다. Fig. 8에서는 Case 4, 유량 0.7 l/min (0.012 kg/s) 의 결과에 대해 각 채널 내의 유량을 나타내었다. 입구의 영향을 직접 받는 3~6번 채널이 주변 채널보다 많은 유량을 보이고 있으며 출구에 가까워 질수록 채널 내 유량이 증가하고 있다. 이는 채널이 끝나는 지점에서 출구와 가까울수록 헤더의 공간이 점점 넓어지고 있기 때문으로 판단된다. 이 결과는 향후 채널 및 헤더 형상 설계시 참고 자료로 사용하고자 한다.

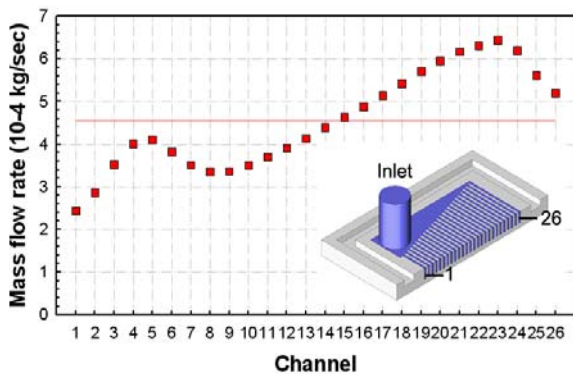


Fig. 8 Distribution of flow rate with each channel

#### 4. 결론

본 연구에서는 마이크로채널 워터블록의 열전달 및 유동 특성을 수치해석으로 파악하였으며, 이를 바탕으로 전자기기 액체냉각용 워터블록의 설계방안을 확립하고자 하였다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) 유량이 증가함에 따라 열저항은 감소하며 압력강하는 증가한다. 유량 증가에 따른 열저항 감소율이 둔화되고 있기 때문에 0.7 l/min ~ 1.4 l/min 내에서 작동할 경우 압력강하의 증가를 완화시킬 수 있다.

(2) 열전달 성능을 향상시키기 위한 효과적인 방법은 채널의 폭을 감소 시키는 것이다. 채널 폭 감소에 따른 압력강하는 채널 높이 증가를 통해 제한적으로 감소시킨다.

(3) 채널이 끝나는 지점에서 출구에 가까워 질수록 채널 내의 유량 증가하고 있음을 확인하였다. 이 결과는 향후 채널 폭 및 헤더 형상 설계 시 참고자료로 사용하고자 한다.

#### 후기

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

#### 참고문헌

- (1) Incropera, F. P., 1999, *Liquid Cooling of Electronic Devices by Single-phase Convection*, Wiley, New York, pp. 151~153.
- (2) Steinberg, D. S., 1991, *Cooling Techniques for Electronic Equipment*, Wiley, New York, pp. 371~372.
- (3) Toh, K. C., Chen, X. Y. and Chai, J. C., 2002, "Numerical Computation of Fluid Flow and Heat Transfer in Microchannels," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, Issue 25, pp. 5133~5141.
- (4) Liu, D. and Lee, P. S., 2003, "Numerical Investigation of Fluid Flow and Heat Transfer in Microchannel Heat Sinks," ME 605 Convection of Heat and Mass, Project Report.
- (5) Lee, P. S. and Garimella, S. V., 2006, "Thermally Developing Flow and Heat Transfer in Rectangular Microchannels of Different Aspect Ratios," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, Issue 17-18, pp. 3060~3067.
- (6) Fluent Inc., 1998, *Fluent User's Guide*.
- (7) 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," 2007 *The Annual Spring Conference of The Korea Society of Mechanical Engineers*.