

# 휴대용 컴퓨터내의 이상유동 냉각시스템을 이용한 모사칩의 열성능에 관한 연구

박상희\*, 최성대#, Y. Joshi\*\*

## A Study on Thermal Performance of Simulated Chip using a Two Phase Cooling System in a Laptop Computer

Sang-Hee Park\*, Seong-Dae Choi#, Yogendra. Joshi\*\*

(Received 10 March 2011; received in revised form 20 June 2011; accepted 23 June 2011)

### ABSTRACT

In this study, a two-phase closed loop cooling system is designed and tested for a laptop computer using a FC-72. The cooling system is characterized by a parametric study which determines the effects of existence of a boiling enhancement microstructure, initial system pressure, volume fill ratio of coolant and inclination angle of condenser on the thermal performance of the closed loop. Experimental data show the optimum condition when the volume ratio of working fluid is 70%, the pump flowing is 6ml/min, and the inclination angle of condenser is 0°. This research shows the maximum values which can dissipate 33W of chip power with a chip temperature maintained at 95°C.

**Key Words** : Boiling Enhancement Microstructure(비등 촉진 마이크로 구조물), Overall Thermal Resistance (총 열저항), Two-phase Cooling System(이상 냉각시스템)

### 1. 서 론

휴대용 컴퓨터의 성능은 소비자들의 요구뿐만 아니라 기술의 발전으로 인해 점점 더 슬림화, 경량화 그리고 고성능화 되어지고 있다. 이러한 경향은 휴대용 컴퓨터 내에 실장된 CPU의 열처리 문제에 많은 영향을

미치고 있다. 최근 CPU 뿐만 아니라 컴퓨터 내에 실장되는 부품들은 단위 면적당 발열량이 점점 더 증가되고 있으며, 이들 부품의 신뢰성을 유지하기 위해 다양한 냉각방식이 연구되고 있다.

현재 휴대용 컴퓨터의 CPU의 냉각 방법으로는 한개의 히트파이프와 팬을 조합한 냉각방법을 이용하고 있다. 이 냉각방법은 팬의 높은 소음과 배출되는 열풍으로 인해 소비자의 만족도를 따라주지 못하는 실정이다. 따라서 컴퓨터에서 발생하는 소음을 줄이면서 CPU의 신뢰성을 높일 수 있는 우수한 냉각 방식에 대한 연구가 절실히 필요하다.

\* 금오공과대학교 기계공학과

# 교신저자 : 금오공과대학교 지능기계공학과

E-mail : sdchoi@kumoh.ac.kr

\*\* Georgia Tech Mechanical engineering

본 논문에서는 새로운 CPU의 냉각방법으로 비등 촉진 마이크로 구조물(microstructure)을 가진 증발기를 이용한 이상유동(two phase flow) 액체냉각 시스템을 구축하여 휴대용 컴퓨터의 CPU의 냉각에 대하여 연구하고자 한다.

휴대용 컴퓨터의 CPU를 냉각하기 위해 이상유동 냉각시스템을 이용한 선행연구자들의 연구는 다음과 같다. Mochizuki 등<sup>[1]</sup>은 휴대용 컴퓨터의 LCD 화면에 히트파이프(heat pipe) 냉각시스템을 장착하여 CPU로부터 10~12W 정도의 열을 제거하였다. Pal 등<sup>[2]</sup>은 이상유동 냉각시스템에서 증발기 내에 비등 촉진 마이크로 구조물을 6층으로 적층시켜 CPU의 온도를 105℃ 이하로 유지하면서 CPU로부터 81W의 열을 제거하였다. Camil-Daniel과 Joshi<sup>[3]</sup>는 작동유체로 FC-72를 이용하여 비등촉진 마이크로 구조물의 적층두께에 따른 칩의 열성능에 관해 실험을 수행하였다.

최근, Jiang 등<sup>[4]</sup>은 이상유동 마이크로채널 냉각시스템을 이용하여 칩의 온도를 120℃ 이하로 유지하면서 칩으로부터 38W의 열량을 제거하였다. Kondo<sup>[5]</sup>는 휴대용 컴퓨터의 LCD 화면의 뒷면을 방열확산자로 이용하는 액체 냉각시스템을 구축하여 연구하였다. Park 등<sup>[6]</sup>은 Cold plate와 이상유동 냉각시스템을 이용하여 컴퓨터 CPU의 열성능을 연구하였다.

상기의 연구자들은 이상액체 냉각시스템에 대하여 많은 연구를 수행하였지만, 주로 히터파이프 냉각시스템을 이용한 CPU의 냉각에 초점을 맞추었으며, 이 시스템들은 노트북 컴퓨터의 소형화 및 슬립화에 따른 칩으로부터의 열을 제거하는 데 한계가 있는 실정이다. 또한 증발기 내에 비등 촉진 마이크로 구조물을 부착한 휴대용 컴퓨터 냉각시스템에 대한 연구가 매우 부족한 실정이다.

따라서 이 연구의 목적은 Park 등<sup>[6]</sup>이 연구한 비등 촉진 마이크로 구조물을 가진 증발기를 이용하여 휴대용 컴퓨터 내에 이상유동 냉각시스템을 구축하여 칩의 열성능을 규명하는 것이다. 이 연구는 증발기 내의 비등 촉진 마이크로 구조물의 유무, 초기시스템 압력, 작동 유체의 체적비, 응축기의 경사각을 변화시켜서 연구를 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 크게 시험부, 전력공급장치, 데이터 획득 장치로 나누어진다. Fig. 1은 실험장치에서 시험부를 나타내며, 증발기, 응축기, 펌프, 압력계로 구성된다. 시험부의 전체 크기는 320mm X 320mm이다. 시험부의 각 부품들은 직경 4.5mm의 투명한 플렉시블 teflon 튜브로 연결시켜 완전 밀폐된 폐회로 루프 시스템으로 구성하여 루프 내에는 작동유체가 흐르도록 하였다. 발열원인 모사칩에 전력을 공급하는 전력공급장치는 VUPOWER AK-3005DD를 사용하였고, 데이터획득장치는 Agilent 34970A를 이용하였다. 각 측정부의 온도는 직경 0.127mm인 T-형 열전대를 이용하여 측정하였다.

본 실험에 사용된 작동유체는 절연성이 좋고, 화학적으로 안정한 플루오르화액체인 FC-72를 사용하였다. FC-72는 대기압에서 비등점이 56℃로 물보다 비등점이 약 2배가량 낮은 액체이다. 폐회로 루프 내에 채워진 액체상태의 작동유체는 유량가변형 펌프(Masterflex L/S 77200-60)에 의해 구동된다. 펌프의 최대유량은 600rpm일 때, 1700ml/min 까지 가능하며, 0~40℃에서 작동가능하다. 본 연구

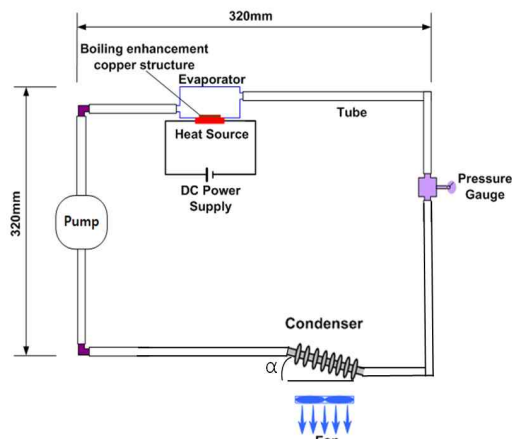


Fig. 1 Schematic diagram of a test section

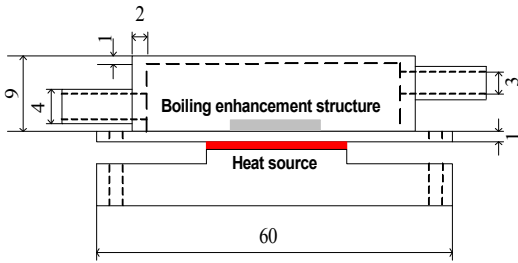


Fig. 2 Schematic diagram of evaporator

에서는 펌핑유량을  $Q=2\sim 6\text{ml/min}$ 로 1ml/min씩 증가시켰다.

Fig. 2는 증발기의 개략도이다. 증발기는  $40 \times 40 \times 14\text{mm}^3$ 의 크기의 덮개와 밀판( $60 \times 60 \times 2\text{mm}^3$ )을 접합시켰다. 밀판의 두께는 2mm이며, 재질은 구리이다. 증발기 내부에 위치한 비등촉진 마이크로 구조물은 증발기 밀판의 중앙부분 즉 모사칩과 접촉되는 부분에 부착시켰다. 증발기의 양 측면에서 작동유체가 출입할 수 있도록 직경 3mm의 구멍을 뚫고 구리관을 부착하였다. 그림과 같이 작동유체가 유출입하는 입출구관의 부착위치는 입구관보다 출구관을 좀 더 높게 설치하여 비등촉진 구조물에서 발생한 기포를 쉽게 배출할 수 있도록 하였다. 증발기 밑면과 칩과의 접촉 열저항을 줄이기 위하여 볼트를 이용하여 아크릴 재질의 받침대에 의해 고정되어 있다.

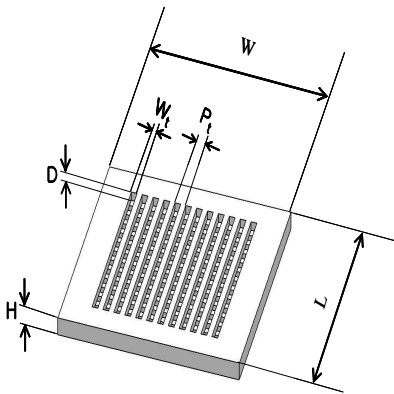


Fig. 3 Schematic diagram of boiling enhancement microstructure

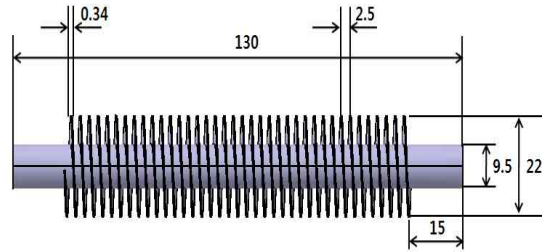


Fig. 4 Schematic diagram of condenser

본 실험에서는 열원으로 Delphi에서 제공된 모사칩을 사용하였다. 칩의 크기는  $12.7 \times 12.7\text{mm}^2$ 이며, 총열저항은  $72\Omega$ 이다. 모사칩으로의 공급전력은  $Q_p=5\sim 35\text{W}$ 로 5W씩 증가시켰으며, 이에 대응하는 열유속은  $q=3.5\sim 22\text{W/cm}^2$ 이다.

Fig. 3은 비등촉진 마이크로 구조물의 개략도를 나타낸다. 이 구조물은 증발기 내부의 표면적을 증가시키고, 핵생성 자리를 제공하기 때문에 비등이 일어날 때 무수한 기포를 발생시켜 칩으로부터의 열전달을 증진시킨다. 그림과 같이 마이크로 구조물의 전체크기는 폭(W) 30mm, 길이(L) 30mm 그리고 두께(H) 0.9mm이며, 구조물 내의 채널 폭( $W_c$ ) 0.4mm, 채널 간격(P) 0.4mm, 채널 깊이(D) 0.7mm를 가진다. 이 구조물의 재질은 구리이며, 구조물 내의 채널은 구리관 조각 위에 핵형성 자리를 만들기 위해 직각 방향으로 양쪽 면을 기계 가공하였다.

응축기는 증발기에서 배출되는 고온의 유체의 온도를 낮추기 위한 것으로 본 실험에서는 Fig. 4와 같은 환-관 응축기를 사용하였다. 이 응축기는 관 직경이 9.5mm, 관 길이 130mm, 관 중심에서 환 가장자리까지의 높이는 11mm이다. 환의 형상은 헬리컬 모양의 원형 환으로 재질은 구리이다. 응축기에 부착된 환 사이의 간격은 2.5mm, 환 두께는 0.34mm이며 환 개수는 38개로서 응축기의 전체 표면적은  $220\text{cm}^2$ 이다.

이 응축기는 관 표면과 환 사이의 접촉저항을 최소화하기 위하여 납땜으로 집착하였다. 또한 응축기로부터의 열전달을 더욱더 증진시키기 위하여 응축기 표면에 크기가  $40\text{mm} \times 40\text{mm}$ 인 팬 2개를 사용하여 강제공랭시켰다. 팬의 전압과 전류는 각각 DC 12V와 0.18A이다.

### 2.2 실험방법

본 연구의 실험방법은 다음과 같다. 먼저 폐회로 시스템 내에 작동유체를 주입하기 위하여 진공펌프를 이용하여 진공 상태로 만든다. 폐회로 시스템 내부를 진공시킨 후, 일정량의 작동유체를 시스템 내부에 주입시킨다. 작동유체는 증발부에서부터 응축부까지 작동유체가 모두 채워지도록 주입시킨다. 주입 작업이 끝난 후에 칩에 전력을 공급하면서 유량변형 펌프와 팬을 가동시킨다. 펌프에 의해 액체상태의 작동유체는 증발기 입구로 흘러들어가게 되며, 증발기내에서 비등이 발생되어 액체의 일부분이 기화되게 된다. 증발기 출구에서 유출되는 액체-기체 혼합물 상태의 작동유체는 펌프에 의해 응축기로 이송된다. 응축기를 통과한 액체 상태의 유체는 다시 펌프에 의해 증발기로 공급되게 된다. 이러한 일련의 과정이 폐회로 시스템 내에서 반복적으로 일어나게 되며, 실험시 온도측정은 증발기 입출구, 응축기 입출구 그리고 히터 및 실내온도를 측정하였다. 본 실험에서는 칩의 최대허용 작동온도를  $T_j=95^{\circ}\text{C}$ 로 하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서 사용된 작동유체의 체적비 FR는 다음 식으로 계산하였다.

$$FR = \frac{\text{작동유체의 체적}}{\text{냉각시스템의 전체체적}} \times 100 \quad (1)$$

여기서 폐회로 시스템의 전체 체적은 26.9ml이다.

본 연구에서는 총열저항으로 액체 냉각시스템의 열적 성능을 평가하였으며, 총열저항이 큰 값을 가지면 칩과 작동유체 사이에 열전달이 잘 이루어지지 않는다는 것을 의미한다. 본 연구에서의 총 열저항  $R_T$ 는 다음 식으로 계산하였다.

$$R_T = \frac{T_c - T_{am}}{Q_p} \quad (2)$$

식 (2)에서  $T_c$ 는 모사칩의 온도,  $T_{am}$ 은 시험부내의 공기온도,  $Q_p$ 는 모사칩에 공급되는 전력이다.

### 3.1 비등 촉진 마이크로 구조물의 영향

비등 촉진 마이크로 구조물이 모사칩에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 구조물이 증발기 내부의 부착 유무에 따른 실험을 수행하였다.

Fig. 4는 펌프 유량을  $6\text{ml}/\text{min}$ 이고 작동유체의 체적비가 70%일 때 증발기 내부에 비등 촉진 마이크로 구조물의 설치 유무에 따른 모사칩의 온도 변화를 나타낸 것이다. 증발기 내부에 구조물이 없을 경우 칩 온도는  $98.2^{\circ}\text{C}$ 를 유지하면서 칩으로부터 최대  $4\text{W}/\text{cm}^2$ (6.5W)의 열을 제거하였다. 팔호안의 수치는 칩으로부터 열제거율을 나타낸다. 그러나 증발기 내부에 마이크로 구조물이 설치된 경우에는 칩 온도가  $92.0^{\circ}\text{C}$ 를 유지하면서 최대  $7\text{W}/\text{cm}^2$ (11W)의 열을 제거하였다. 따라서 증발기 내에 비등 촉진 마이크로 구조물을 부착한 냉각시스템은 구조물이 없는 경우보다 칩으로부터 열을 제거할 수 있는 능력이 약 41% 정도 증가함을 보였다. 이후의 모든 실험에서는 비등 촉진 마이크로 구조물이 부착된 증발기를 사용하였다.

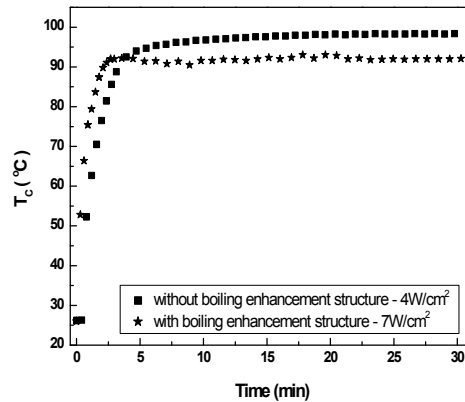
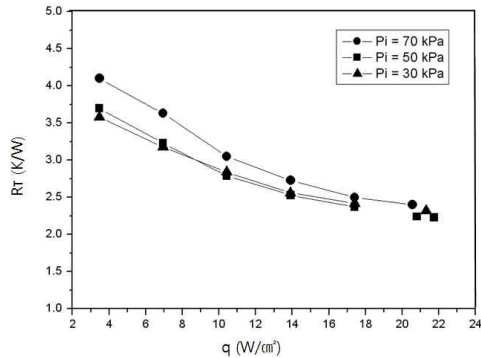


Fig. 4 Effect of microstructure on chip temperature at flow rate 6ml/min and volume fill ratio 70%

### 3.2 시스템 초기 압력의 영향

Fig. 5는 펌프 유량을  $Q=6\text{ml}/\text{min}$ 이고 작동유체의 체적비  $FR=70\%$ 일 때 폐회로 냉각시스템의 초기압력에 따른 총 열저항의 변화를 나타낸 것이다.

시스템 내의 초기압력은  $P_i=30, 50, 70\text{kPa}$ 로 변화시켰으며, 시스템 내의 압력이 낮을수록 총 열저항은 감소하였고 칩으로부터 더 많은 양의 열을 제거하였다.



**Fig. 5 Effect of initial system pressure on thermal performance with boiling enhancement microstructure at  $Q=6\text{ml/min}$  and  $FR=70\%$**

즉 열유속이  $3.47\text{W/cm}^2(5\text{W})$ 로 일정할 때 총 열저항은 압력이  $70\text{kPa}$ 에 비해  $30\text{kPa}$ 의 경우가 약 13% 정도 감소하였으며, 열유속을 5배 증가시켰을 때 즉  $17.4\text{W/cm}^2(28\text{W})$ 에서는 총 열저항의 감소량이 3% 정도로 줄었다. 이것은 칩에 공급되는 입력전력이 작을 경우에는 시스템 내의 초기압력에 크게 의존하지만, 입력전력이 높을 경우에는 초기압력에 독립적임을 의미한다.

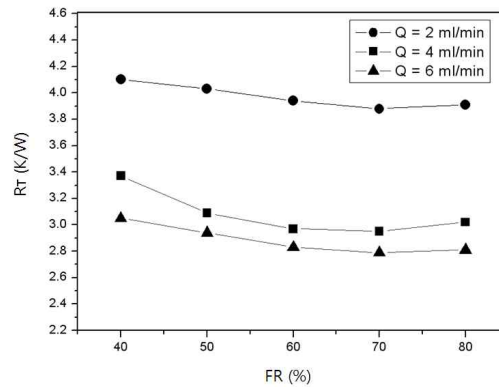
또한 시스템 내의 압력에 따른 칩으로부터의 최대 열제거량은  $70\text{kPa}$ 일 때가 약  $29\text{W}$  정도,  $50\text{kPa}$ 일 때 약  $33\text{W}$  정도,  $30\text{kPa}$ 일 때 약  $32\text{W}$  정도로  $50\text{kPa}$ 일 때가  $70\text{kPa}$ 보다  $4\text{W}$  정도 더 많은 열을 제거하였으며, 초기압력이  $50\text{kPa}$  이하에서는 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

### 3.3 작동유체 체적비의 영향

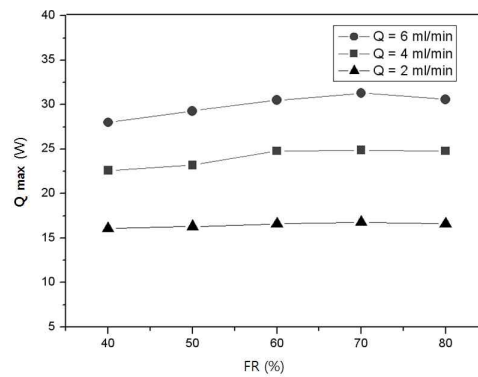
이상유동 액체 냉각에서는 폐회로 루프 내에 채워지는 유체의 양이 칩의 열성능에 큰 영향을 미치게 된다. 본 실험에서는 펌프 유동율을  $6\text{ml/min}$ 으로 고정하고, 체적비  $FR=40\sim 80\%$ 로의 범위에서 체적비를 10%씩 증가시키면서 실험을 수행하였다.

Fig. 6(a)~(b)는 칩으로의 입력전력이  $15\text{W}$ 일 때 작동유체의 체적비에 따른 시스템의 열적 성능을 나타낸 것으로, Fig. 6(a)는 총 열저항의 변화를, Fig. 6(b)는 모사칩으로부터의 최대 열제거량을 보여주고 있다.

Fig. 6(a)에서 총 열저항은 펌프 유량이 증가할수록 감소함을 보였다. 즉 체적비  $FR=40\%$ 일 경우에



(a)



(b)

**Fig. 6 Effect of working fluid fill ratio on thermal performance at input power  $Q_p=15\text{W}$**

는  $Q=2\text{ml/min}$ 보다  $6\text{ml/min}$ 일 때가 총 열저항이 약 34% 정도,  $FR=70\%$ 일 때는 약 39% 정도 감소하였다. 유량이  $6\text{ml/min}$ 에서  $FR=40\%$ 에서 총 열저항  $R_t=3.05\text{K/W}$ 로 평가되었으며, 이 열저항은  $FR$ 가 증가할수록 감소하다가  $FR=70\%$ 에서  $2.79\text{K/W}$ 로,  $FR=80\%$ 에서는  $2.81\text{K/W}$ 로 다시 증가함을 나타내었다. 이것은  $FR=70\%$ 일 경우에 최소 열저항이 존재함을 의미한다. 이러한 결과는 펌프 유량의 변화에 관계없이 동일한 경향을 나타내었다. 또한 본 실험의 결과를 살펴보면 시스템 내의 작동유체의 체적비  $40\sim 60\%$ 에서는 증발기 내에서 기화된 작동 유체의 양보다 응축액이 증발기로 돌아오는 양이 적기 때문에 증발기 내에서 dry out이 발생하여 칩의 온

도를 급격하게 상승시킴을 알 수 있었다.

따라서 Fig. 6(a)와 같이 FR=70%일 때가 총 열저항이 최소가 되므로 이 체적비에서 칩으로부터 최대의 열을 제거할 수 있음을 Fig. 6(b)에서 알 수 있다. 즉 Q=2ml/min에서는 약 17W, 4ml/min에서는 약 25W, 6ml/min에서는 약 33W를 칩으로부터 열을 방출시켰다.

### 3.4 응축기 경사각의 영향

Fig. 7은 펌프 유량이 6ml/min이고 체적비가 70% 일 때 응축기의 경사각에 따른 응축기의 입출구 온도차( $T_{ci} - T_{co}$ )의 변화를 나타낸 것이다. 여기서  $T_{co}$ 는 응축기 출구의 작동유체의 온도,  $T_{ci}$ 는 응축기 입구의 작동유체의 온도이다. 즉  $\Delta T_C = T_{ci} - T_{co}$ 이다. 본 실험에서는 응축기 내의 고온의 포화혼합물의 작동유체를 냉각시키기 위해 헨을 이용하여 강제공랭시켰다.

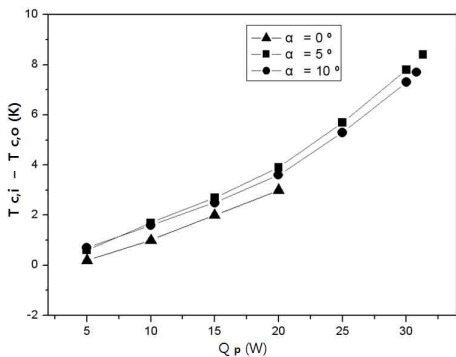


Fig. 7 Effect of condenser inclination angle on thermal performance at Q=6ml/min and FR=70%

Fig. 7에서 응축기의 경사각  $\alpha = 0^\circ$  일 때  $Q_p = 5W$ 에서는 응축기의 입출구 온도차  $\Delta T_C = 0.2K$ , 20W에서는  $\Delta T_C = 3K$ 로 증가하였으며, 칩의 최대 열제거량은  $Q_{max} = 20W$ 이다. 경사각  $\alpha = 5^\circ$ 에서는  $Q_p = 5W$ 에서는  $\Delta T_C = 0.6K$ , 20W에서는  $\Delta T_C = 4K$ 로 증가하였으며,  $Q_{max} = 33W$  정도이다. 그러나  $\alpha = 10^\circ$ 에서는  $\alpha = 5^\circ$ 와  $\Delta T_C$ 가 약간 감소함을 보였다. 이것은  $\alpha = 0^\circ$ 에서는 응축기 내에 흐르는 포화혼합물 유체가 빠르게 통과하여 작동유체가

냉각이 잘 되지 않았고, 경사각이 증가할수록 응축기 내에서 유체가 천천히 흐르기 때문에 냉각이 더욱더 잘 이루어짐을 알 수 있었다.

## 4. 결론

본 연구는 휴대용 컴퓨터 내에 이상 냉각 폐회로 시스템을 구축하여 증발기 내에 비등 촉진 마이크로 구조물의 설치유무, 냉각시스템의 초기압력, 작동유체의 체적비, 응축기의 경사각을 변화시켜 실험을 수행한 결과 모사칩의 열저항에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 증발기 내에 비등 촉진 구조물의 설치하였을 때 구조물이 없는 경우보다 칩으로부터 열을 제거할 수 있는 능력이 약 41% 정도 증가함을 보였다.
2. 폐회로 냉각시스템 내의 초기압력이 낮을수록 총 열저항은 감소함을 보였고, 본 실험에서는 초기압력이 50kPa일 때 약 33W 정도로 칩으로부터 가장 많은 열을 제거함을 알 수 있었다.
3. 이상 냉각시스템에서 작동유체의 체적비가 70%이고 펌프 유동율이 6ml/min일 때 최소의 열저항으로 평가되었으며, 펌프 유동율에 관계없이 동일한 경향을 보였다. 따라서 본 연구의 냉각시스템에서 최적의 체적비는 70%임을 알 수 있었다.
4. 응축기의 경사각이 증가할수록 응축기 입출구의 작동유체의 온도차는 더욱더 증가하였고, 경사각  $\alpha = 0^\circ$ 일 때보다  $5^\circ$ 일 때가 칩으로부터 제거할 수 있는 발열량이 약 13W로 더 증가함을 보였다.

## 후 기

본 연구는 금오공과대학교의 지원에 의하여 연구된 실적물입니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Mochizuki, M., Saito, Y., Goto, K., Nguyen, T., Ho, P., Malcolm, M., Morando, M.P., 1997, "Hinged Heat Pipes for Cooling Notebook PCs" IEEE 13th SEMI-THERM Symposium, pp. 64-72.

2. Pal, A., Joshi, Y., Beitelmal, M.H., Patel, C. D., and Wenger, T., 2002, "Design and Performance Evaluation of a Compact Thermosyphon", IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies.
3. Camil-Daniel Ghiu, and Joshi, Y., 2005, "Boiling Performance of Single-Layered Enhanced Structures", ASME, J. of Heat Transfer, Vol. 127, pp. 675-683.
4. Jiang, L., Mikkelsen, J., Koo, J.M., Huber, D., Yao, S., Zhang, L., Zhou, P., Maveety, J.G., Prasher, R., Santiago, J.G., Kenny, T.W., and Goodson, K.E., 2002, "Closed-Loop Electroosmotic Microchannel Cooling System for VLSI Circuits", IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, pp. 347-355.
5. Condo, Y., 2003, "Innovation Technology in Electronic Equipment", 4th ASME/JSME Joint Fluid Eng. Conference.
6. Park, S. H., Cho, N. H., and Choi, S. D., 2009, "A Study on Thermal Performance of Cooling System for Laptop Computer Using a Cold Plate", KSMPE, Vol. 8, No. 4, pp. 83-89.