

FC-72를 이용한 마이크로 핀 표면에서의 핵비등 열전달

임태우 · 유삼상[†] · 김환성
(한국해양대학교)

Nucleate Boiling Heat Transfer from Micro Finned Surfaces with Subcooled FC-72

Tae-Woo LIM · Sam-Sang YOU[†] · Hwan-Sung KIM

Korea Maritime University

(Received July 14, 2008 / Accepted October 13, 2008)

Abstract

To evaluate the performance of nucleate boiling heat transfer between a plain and micro-fin surfaces, the experimental tests have been carried out under various conditions with fluorinert liquid FC-72, which is chemically and electrically stable. Two kinds of micro fins with the dimensions of 200 μ m x 20 μ m and 100 μ m x 10 μ m (width x height) were fabricated on the surface of a silicon chip. The experiments were performed on the liquid subcooling of 5, 10 and 20K under the atmospheric condition. The presented data showed a similar trend in the comparison with result of Rainey & You. Due to its expanded surface areas, the heat flux properties has been significantly enhanced on micro-fin surface comparing to the plain surface.

Key Words : micro fin, subcooling, silicon chip, nucleate boiling, heat flux

I. 서론

MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)(윤 등, 2004)는 마이크로 시스템, 마이크로 머신, 마이크로 메카트로닉스 등의 동의어로서 혼용되고 있으며, 초소형 시스템이나 초소형 기계를 의미하며, 입체적인 미세구조와 회로, 센서와 액추에이터 등을 실리콘 기판위에 집적화 시킨 것으로 소형이면서도 복잡하여 고도의 동작을 하는 시스템이다. 이러한 MEMS는 현재 세계적으로 거의 모든 초소형 제품에 쓰이고 있으며 이러한 초소

형 장치들의 개발은 더욱 가속화 되고 있는 실정이다.

오늘날 MEMS를 이용한 Microengineering 기술의 발전에 따른 장치의 소형화로 전자 패키지(electronic packaging)의 집적 밀도(integration density)는 급속하게 증가되었으며(Mohamed, 2006; Nadim, 2000; 최, 2006), 이로 인해 발생된 고열유속의 열을 효과적으로 외부로 방열시켜 시스템이 정상적으로 작동될 수 있도록 하는 냉각 기술의 개발이 절실히 요구되고 있다.

전통적으로 공랭식 냉각방법은 대형 열침(large

[†] Corresponding author : 051-410-4366 sseyou@hhu.ac.kr

heat sink)에서 발생하는 열을 제거하기 위해 사용되어 왔으며, 단일 칩에서 제거해야 할 열유속은 100W/cm² 정도로 나타나고 있다. 그러나 앞으로는 고성능 단일 칩에서 제거해야 할 열유속이 100W/cm²을 초과할 것으로 예상되기 때문에 기존의 냉각방법은 새로운 냉각 기술로 대두되고 있는 액체 냉각방식으로 대체될 것으로 예상된다. 특히 유전성 액체(dielectric liquids)를 사용한 직접 액체냉각방식(은 고성능 전자 장비를 냉각하는 기술 중에 하나로 많은 연구들이 진행되고 있다.

최근 Honda는 FC-72의 비등열전달에 관한 마이크로 핀의 영향을 연구하였다(Honda, 2002). 실리콘 칩에 가공된 마이크로 핀에서의 열유속은 핵비등 영역에서 벽면 과열도가 증가함에 따라 뚜렷한 증가를 나타내었으며, 임계열유속에서의 벽면 온도는 85°C 이하였다. 또한 Honda는 FC-72의 비등 시 마이크로 핀 두께의 영향에 대해서 더 많은 연구를 하였다(Honda, 2002). 핀 크기는 10×60, 20×60, 30×60 and 50×60μm²(thickness×height)이고, 핀 피치는 두께의 두 배였다. 가장 큰 임계 열유속을 나타낸 마이크로 핀의 크기는 액체 과냉도를 증가시킴에 따라 감소하였다.

본 연구에서는 마이크로 스케일에서의 열전달 촉진 방법으로 실리콘 칩 표면에 MEMS기술을 이용하여 제작된 마이크로 핀을 유전성 액체에 담가 핀 형상에 따른 비등열전달 성능을 평가하였다.

II. MEMS기법을 이용한 마이크로 핀 제작 공정(황, 1999)

2.1 리소그래피 (Lithography) 과정

수분을 없앤 기판을 Spinner안에 넣어 PR용액(Az-5214)을 떨어뜨린다. 그 후에 3000rpm으로 회전시켜 골고루 퍼뜨린 뒤 baking과정을 통해

수분제거 및 웨이퍼와의 접촉을 강화시킨다. 아세톤으로 세척한 포토마스크를 Aligner에 고정 후 기판을 올려 X, Y축 배율을 조정한다. 그 후 그 위에 자외선을 쬐어준다.

2.2 증착(Deposition)과정

웨이퍼 전·후면에 Sputter를 사용하여 SiO₂결정을 증착시켜, 다음 Etching과정에서 웨이퍼를 보호하고 좀더 나은 결과물을 꾀한다. SiO₂ 증착면은 5000Å의 두께로 증착되었다.

2.3 식각(Ething)과정

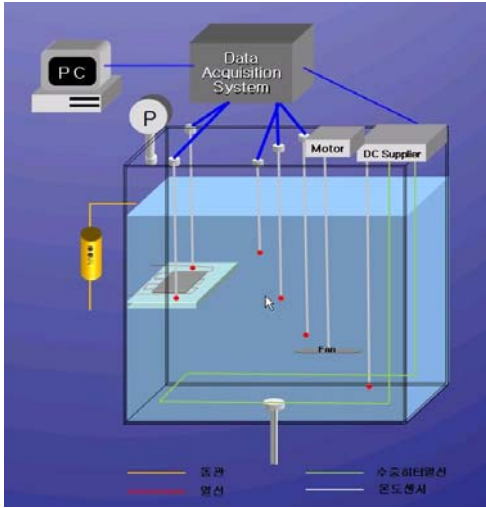
식각은 물리적, 또는 화학적 작용을 통해 불필요한 부분은 제거하고 필요한 부분을 남기는 과정을 의미한다. 크게 2가지로 분류할 수 있는데, 건식식각과 습식식각이 그 종류이다. 본 연구에서는 습식식각을 사용하였으며, 증착시킨 기판을 식각액(아세톤)에 담귀 P.R.층과 희생층을 제거하게 되면 원하는 형상만 남게 된다.

본 연구에서는 이러한 과정을 통해 마이크로 핀을 제작하였다.

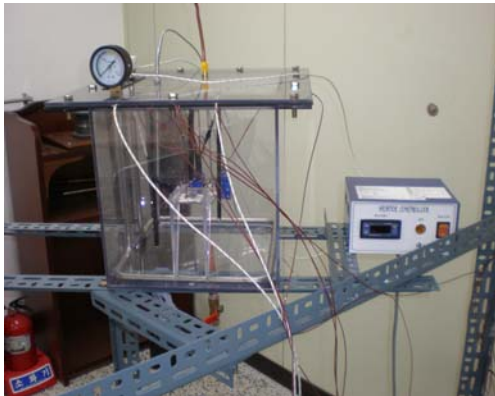
III. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

[그림 1]은 실험장치의 개략도를 나타낸다. 실험수조는 비교적 열에 잘 견디고 투명한 polycarbonate로 제작하였고 실험수조의 크기는 30x30x30(cm)이다. 실험유체의 온도는 수중용 카트리지히터를 설치하여 조절하였으며, 유체온도의 분포를 고르게 하기 위해 Fan을 설치하였다. 그리고 온도 측정을 위해 K-Type 열전대를 실리콘 웨이퍼 밑 표면에 2개, 위 표면에 1개 polycarbonate판 위에 1개, 그리고 주변 유체의 깊이에 따라 3개, 총 7개의 열전대를 설치하여 측정된 온도의 값을 구하였다. [그림 2]에 나타난



[그림 1] 실험장치의 개략도

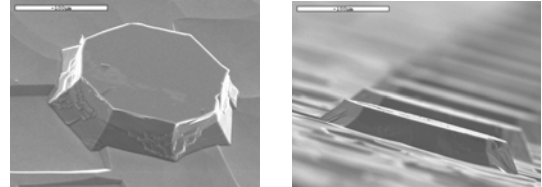


[그림 2] 시험수조

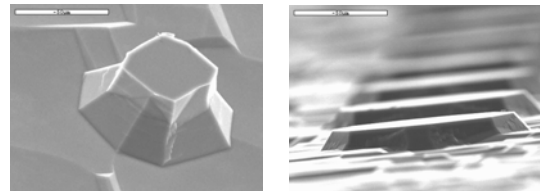
바와 같이 실험수조 상단 부분은 양면테이프를 이용, 이중패킹작업을 하여 최대한 열이 밖으로 빠져나가는 것을 방지 하도록 하였으며 압력게이지를 장착하여 실험수조의 압력을 측정하였다. 또한 실험수조 외부로의 열전달을 최소화하기 위해 단열재를 사용하였다.

작동유체는 절연성과 화학적으로 안정성이 있는 FC-72를 사용하였다. FC-72에 대한 성질을 보면 비등점이 56° (1atm)이며 밀도가 $1680\text{kg}/\text{m}^3$ 이고 비열이 $1100\text{J}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ 그리고 열전도도가 $0.057\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$ 이다. 독성이 없으며, 플라스틱과

금속물질 등에 잘 용화되는 성질을 가지며 인체에 무해한 환경 친화적인 액체이다. 이러한 특성 때문에 전기실험용등의 용도로 많이 쓰이고 있다.

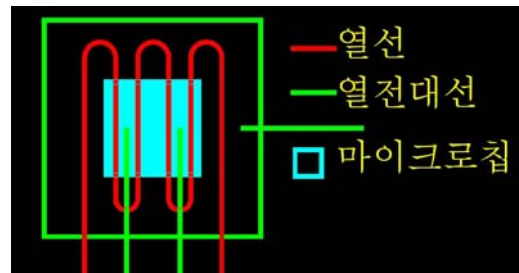


(a) 표준 바(bar) : 100 μm



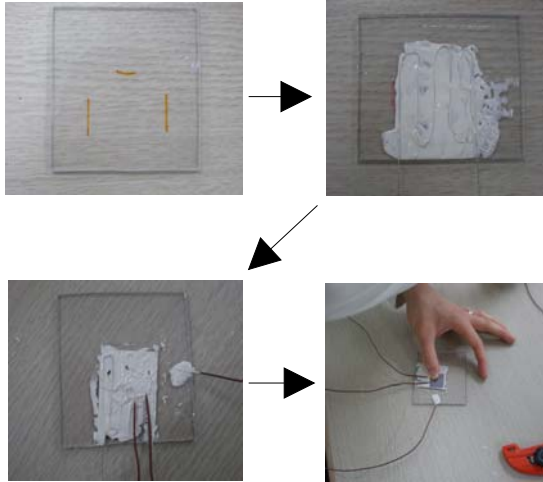
(b) 표준 바(bar) : 50 μm

[그림 3] 마이크로 핀의 SEM 사진



[그림 4] (시험편)마이크로 핀의 발열부

유체의 온도와 발열부의 온도는 K-type 열전대를 사용하여 온도를 측정하였으며, 측정된 자료는 data acquisition system을 사용하여 PC에 저장하였다. 마이크로 핀의 발열부에 공급되는 발열량은 DC 전원 공급기를 이용하여 조절하였다. 시험부가 정상상태가 되었다고 판단되면 데이터를 저장한 다음 전압을 올려 다음 실험을 수행하였다.



[그림 5] 시험편 제작 과정

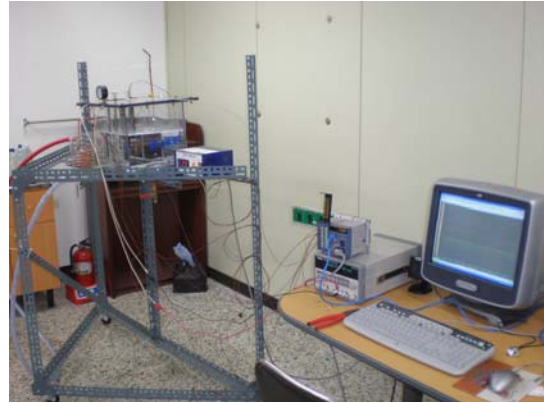


[그림 6] 완성된 시험편

3.2 시험편 제작

실험에는 실리콘 웨이퍼 (2cm x 2cm)위에 식각을 통해 핀(10 μ m x 10 μ m 와 20 μ m x 20 μ m, 각각 너비 x 높이)을 만들어 실험을 하였다. [그림 3]은 본 연구에서 제작된 마이크로 핀의 형상을 나타낸다. [그림 4]에 나타난 바와 같이 P/C 판 위에 우선 실리콘 본드(1.55W/m)를 이용하여 DC 전원 공급기에 연결할 열선을 접착하였다. 그리고 웨이퍼 아래에서 웨이퍼의 온도를 측정하기 위한 열전대 2개와 P/C판의 온도를 측정할 열전대 1

개를 접착 후, 웨이퍼를 열선과 열전대 위에접착하여 샘플을 완성하였다. [그림 5]는 위의 제작과정을 나타내며, [그림 6]은 완성된 시험편을 나타낸다. 핀이 제작된 시험편 2개, 핀이 없는 시험편 1개 총 3개의 시험편을 제작하여 실험에 사용하였다.



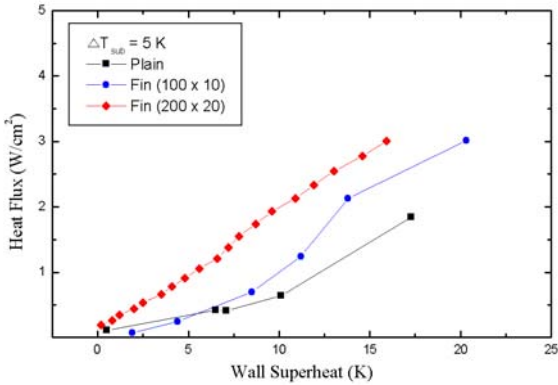
[그림 7] 실험장치

3.3 실험방법

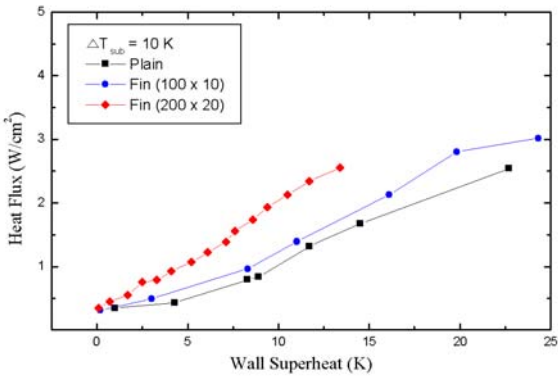
[그림 7]은 측정 중인 실험장치의 사진을 나타낸다. 시험편에 공급되는 열유속은 DC 전원 공급기를 이용하여 전압과 전류를 조절하면서 실험을 수행하였다. 수조 내 실험유체의 온도는 카트리리지 히터를 사용하여 일정한 과냉도($\Delta T_{sub} = \text{Boiling point} - \text{Liquid Temp.}$) 5, 10, 그리고 20K를 유지하도록 하였다. 수조내 불응축 가스는 배출구를 통해 배출되며, 증발된 작동유체는 밖으로 빠져나가 응축기에서 응축된다. 발열부와 실험유체의 온도는 열전대를 장착하여 각 부분의 온도를 측정하였다. 온도 측정에 대한 불확실성은 $\pm 0.5K$ 로 평가되었고, 열유속은 2W/cm²에서 약 8%의 불확실도를 나타내었다.

열유속과 열전달계수는 다음 식과 같이 정의된다.

$$q'' = IV/A = h \times (T_{wall} - T_{bulk})$$



[그림 9] 벽면 온도에 따른 열유속의 변화



[그림 10] 벽면 온도에 따른 열유속의 변화

$$h = \frac{q''}{(T_{wall} - T_{bulk})}$$

여기서, q'' 는 단위면적당 열유속(W/cm^2)이며, I 는 전류, V 는 전압, 그리고 A 는 발열부 표면의 전열면적을 나타낸다. 열유속 및 열전달계수는 작동유체(T_{bulk})의 온도와 발열부(T_{wall})내 열전대의 평균온도를 측정하여 계산된 온도로 평가하였다.

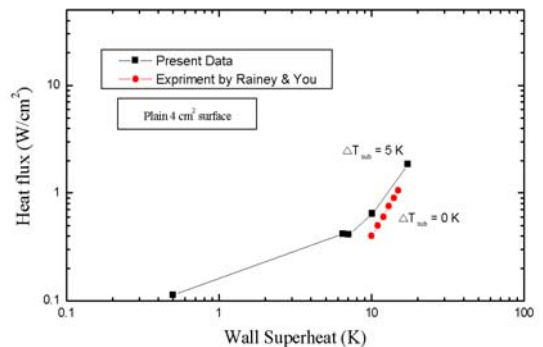
모든 실험은 과냉도 5K, 10K, 20K에서 수행되었다. 수조 안의 유체는 앞서 설명한 FC-72를 사용하였고 이 유체는 앞서 설명한 FC-72를 사용하였고 이 유체는 56°C에서 비등이 일어나므로 마이크로 핀의 온도는 이 유체의 비등점인 56°C 일 때부터 측정을 시작한다. DC 전원 공급기에서 전류는 그대로 둔 다음 전압을 서서히 증가시켰고 전압의 범위가 한계에 달하면 전류를 올려

다시 전압을 올리는 과정을 선택하였다.

한 개의 Plain surface와 마이크로 핀이 부착된 두 개의 표면을 준비 하여 과냉도에 따라 열전달 특성이 어떻게 달라지는 지 고찰하였다. 마이크로 핀 하부의 표면에 두 개의 열전대를 놓았고 표면이 부착되어 있는 P/C에 한 개의 열전대 그리고 깊이에 따라 온도를 체크하는 세 개의 열전대, 그리고 마이크로 핀 상부의 표면에 온도를 체크하는 한 개의 열전대로 총 7개의 열전대를 사용하였다. 깊이에 대한 온도를 측정하는 것은 수조 내의 온도가 균일한지 알아보기 위한 것이고, P/C평판의 온도를 체크하기 위한 것은 DC 전원 공급기에서 전류를 공급하였을 때 마이크로 핀 표면에서 열이 발생하였을 때 그것이 P/C평판에 까지 영향을 미치는 지를 알아보기 위해 열전대를 부착하였다. 수조안의 온도를 동일 온도로 맞추기 위해 수조 안의 프로펠러로 강제유동을 일으켰다.

IV. 결과 및 고찰

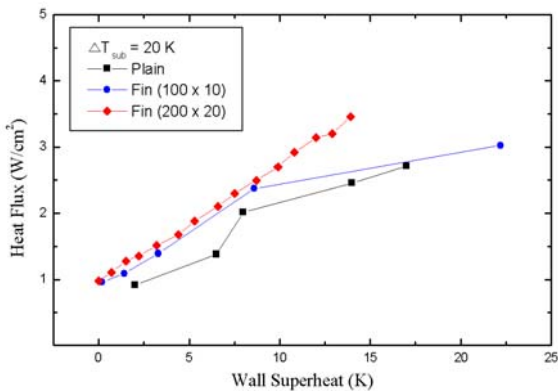
Rainey and You(Rainey, 2001)가 실험한 결과 값과 동일 조건 하에서 비교하여 신뢰성을 확보하고자 하였다. 수평상태에서 표면 면적이 $4cm^2$ 인 매끈한 발열체를 이용하여 작동유체가 포화온도와 5K차이가 있을 때 과열도에 따른 열유속을 [그림 8]에 나타내었다.



[그림 8] 본 연구와 Rainey & You의 실험결과와의 비교

Rainey and You가 수행한 실험 결과와 비교한 결과, Rainey and You의 실험은 포화온도에서 실험한 자료이고 이번 실험결과는 과냉도 5K 일 때의 실험결과로써 약간의 차이가 있으나 그림에 나타난 바와 같이 비슷한 기울기를 가지는 것을 알 수 있었다. 전체적인 경향으로는 Rainey and You의 실험결과 값이 과냉각도 5K 일 때로 가정을 하고 계산하였을 때 20% 이내의 오차로 유사한 경향을 잘 보이고 있어 본 실험의 신뢰성을 검증할 수 있었다.

[그림 9-11]은 과냉도 5, 10 그리고 20K에 대하여 과열도와 열유속에 대한 결과를 나타낸 것이다. 과냉도 5K에서 과열도에 따른 열유속은 매끈한 표면보다 마이크로 핀이 있는 표면에서 열유속 값이 더 크다는 것을 알 수 있다. 또한 핀의 사이즈가 더 큰 것이 열유속도 더 크다는 것을 알 수 있다. 과냉각도 10K, 20K에서도 동일한 현상을 확인 할 수 있다 그리고 동일한 벽면 과열도에서 과냉도가 클수록 열유속이 증가한다는 것 또한 확인 할 수 있다.



[그림 11] 벽면 온도에 따른 열유속의 변화

V. 결론

본 연구에서는 발열체 표면에서 발생하는 열을 외부로 효과적으로 방출시키기 위해 발열부 표면

인 실리콘 웨이퍼(Si wafer) 상에 MEMS의 기술을 응용하여 식각을 통한 마이크로 핀을 제작하여 그의 열전달 성능을 평가하였다

1. 매끈한 표면에 대하여 본 연구에서 얻어진 실험 결과는 Rainey and You가 실험으로부터 얻은 결과가 20% 이내에서 잘 일치하였다.
2. 동일 과냉도에서 과열도에 따른 열유속은 매끈한 표면보다 마이크로 핀이 있는 표면에서 열유속 값이 30~70% 더 크다는 것을 알 수 있었으며, 저 과냉도에서 더 큰 차이를 나타내었다.
3. 또한 동일한 벽면 과열도에서 과냉도가 클수록 열유속이 증가한다는 것을 확인 할 수 있었으며, 20K의 과냉도가 5와 10K의 과냉도보다 50~80% 증가하였다.

참고 문헌

- 윤준보, 조일주, 최윤석(2004). 알기쉽고 재미있는 MEMS이야기, KAIST PRESS.
- Mohamed Gad-el-Hak(2006). "MEMS Design and Fabrication" Taylor & Francis.
- Nadim Maluf(2000). "An Introduction to Microelectromechanical System Engineering" Artech House, Inc.
- 최재성, 반도체 소자 공정기술(2006). 청문각.
- Honda, H., Takamatsu, H., Wei, J.J.(2002). "Effect of the size of micro-pin-fin on boiling heat transfer from silicon chips immersed in FC-72", in: Proceedings of 12th International Heat Transfer Conference, Grenoble, France, Vol. 4, 75~80.
- Honda, H., Takamatsu, H., Wei, J.J.(2002). "Boiling of FC-72 on Silicon Chips with Micro-Pin-Fins and Submicron-Scale Roughness", Trans. ASME J. Heat Transfer, Vol. 124, 383~390.
- 황호정(1999). 반도체 공정기술, 생능출판사.
- Rainey, K. N., and You, S. M.(2001). "Effects of Heater Size and Orientation on Pool Boiling Heat Transfer from Microporous Coated Surfaces" Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 44, 2589~2599.