

# 마이크로다공성 코팅된 발열체에서의 풀비등 직접냉각 성능에 관한 실험적 연구

†.           \*.           \*\*.           \*\*\*

## An Experimental Study on Direct Cooling Performance using Pool Boiling from Micro-Porous Coated Surface

Tae-Gyun Kim, Kyu-Jung Lee, Yong-Chan Kim and Chan-Sung Park

**Key Words:** Micro-Porous Coating(마이크로다공성 코팅), Boiling(비등), Heater Orientation(히터 기울기), Bulk Subcooling(과냉도)

### Abstract

An experimental study of pool boiling behavior on micro-porous enhanced square heater surfaces immersed in PF5060 is performed. The effects of heater orientation, Subcooling and substrate distance on the pool boiling heat transfer performance for the double heaters were investigated under increasing heat-flux conditions. The boiling performance of micro-porous coated surface was better than that of plain surface. The double heaters with upper substrate of 0.2cm substrate interval have lower boiling performances compared with the results for the double heaters with that of 0.5cm and 1.0cm substrate interval and without the substrate. In comparison to upper heater and below heater with orientation, the upper heater has lower superheat temperature than the below heater due to the bubble sweeping.

$q''$  : 단위면적당 열유속 [ $W/cm^2$ ]

$h$  : 열전달계수 [ $W/cm^2 \cdot K$ ]

그리스 문자

$\theta$  : 수평으로부터의 표면 기울기 [ $x^\circ$ ]

하첨자

$^\circ$  : 각도

1.

최근 전자통신장비의 열유속 및 발열량의 증대로 인해 전자장비의 신뢰성 및 내구성에 많은 문제점들이 들어나고 있다. 특히, 다칩모듈(MCM)인 경우 전체적인 장비의 크기와 무게를 줄이면서 실장 내에서 칩들을 효과적으로 연결하여 통신장비의 신뢰성과 처리속도를 향상시키고 있으나 실장밀도의 증가에 따라 통신부품의 발열량 및 열유속이 급격히 증가되었다. 따라서 좁은 공간에서 발생된 고열유속의 열을 효과적으로 외부로 방열시킬 수 있는 기술의 개발이 요구되어지고 있다. 이 문제를 해결하기 위한 방법의 하나로, 액체 냉각기술에 대해 많은 연구가 진행되고 있으며, 특히 유전성 액체(dielectric fluid)를 이용한 직접액체냉각 방식은 최근 세계적인 관심의 대상이 되고 있다.

† 고려대학교 기계공학과 대학원

E-mail : ktgtgeun@korea.ac.kr

TEL : (02)3290-3756 FAX : (02)928-9768

\* 고려대학교 기계공학과

\*\* 고려대학교 기계공학과

\*\*\* 국립과학수사연구소

직접 액체냉각방식의 비등 열전달을 증가시키기 위해 발열부 표면에 여러 가지 방법들을 사용하여 발열부 표면의 열을 효과적으로 외부로 방출시키기 위한 연구들이 수행되었다. Kang<sup>(1)</sup>은 사포를 이용하여 구리 표면에 다양한 거칠기를 가지는 발열부를 제작하여 표면조도에 따른 과열도의 영향을 연구하였고 Guglielmine and Misle et al.<sup>(2)</sup>은 구리 표면에 핀을 제작하여 핀 길이와 핀 폭에 따른 열전달 계수와 열전달 성능을 평가하였다. 또한 Kim et al.<sup>(3)</sup>은 구리표면에 마이크로 핀을 제작하여 핀의 길이, 크기, 깊이, 폭에 따른 비등성능을 연구하였다. 최근에는 발열부 표면에 금속 분말을 코팅하여 비등 열전달을 증가시키는 방법에 대한 연구가 진행되고 있는데 Chang and You<sup>(4)</sup>는 다양한 금속분말을 이용하여 금속 분말의 종류에 따른 비등성능을 연구하였고, Rainey and You<sup>(5)</sup>는 구리표면에 다이아몬드 분말을 코팅하여 발열부 크기와 발열부 기울기에 따른 영향을 연구하였다. 히터 사이즈가 작을수록 열전달 성능이 좋았고,  $\theta=45^\circ$  와  $\theta=90^\circ$  일 때 열전달 성능이 우수하였음을 증명하였다.

본 연구에서는 마이크로다공성 표면코팅을 이용한 풀비등 직접냉각 방식에 대하여 단일 발열부가 아닌 복수 발열부에 대해서 과냉도, 기울기, 기관간의 거리등을 변화시키면서 비등 열전달에 미치는 효과와 영향들을 살펴보고자 한다. 사용 유체는 FC-72와 동일물질인 PF-5060을 선정하였다.

2.

2.1

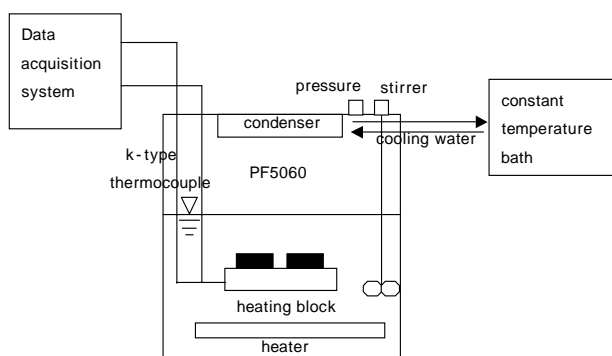


Fig. 1 Schematic of test apparatus

Fig. 1은 풀비등 직접 액체냉각 성능특성 실험을 위한 실험 장치를 나타낸 것이다. 실험수조는 비교적 열에 잘 견디고 단단한 P/C(polycarbonate)로 제작하였고 실험수조의 크기는 35cm×31cm×33cm의 크기로 제작하였다. 수중용 카트리지 히터 (2 kW급)와 항온조의 냉각수를 이용하여 실험유체의 온도를 조절하였고 실험수조의 상단에 배출구와 응축기를 설치하여 불응축 가스를 배출하고 증발된 PF-5060이 응축되도록 하였다. 또한 실험수조의 외부에 단열재를 사용하여 실험유체의 온도가 일정하게 유지되도록 하였다. 실험유체의 온도는 4개의 T-type 열전대를 사용하여 측정된 온도의 평균값을 사용하였고, 실험수조의 압력은 압력게이지를 상부에 설치하여 측정하였다.

Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)는 실험대상인 double 발열부와 기관과 기관간의 거리를 보여주는 그림이다. Teflon substrate (8cm×8cm×1cm) 위에 Ni-Cr wire(직경 0.45mm)를 설치하고 열전도성이 좋은 Omega bond 200을 사용하여 구리 블록과 접촉시

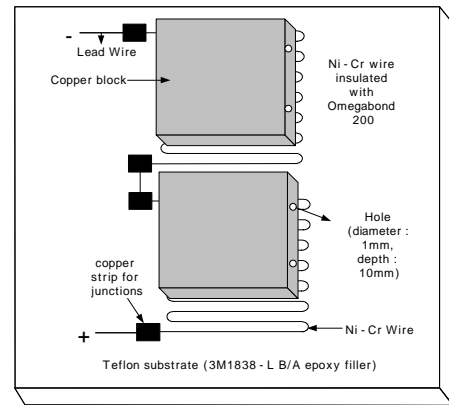


Fig. 2(a) Test heater geometry

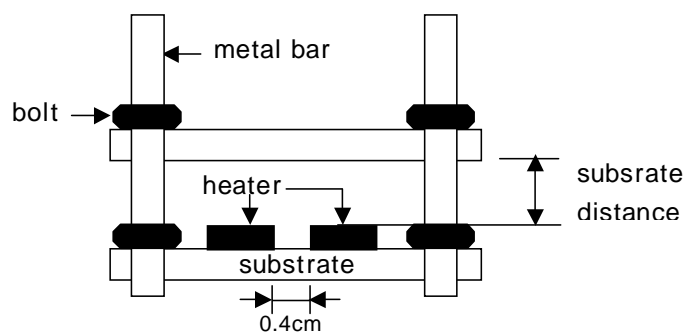


Fig. 2(b) Schematic of substrate distance

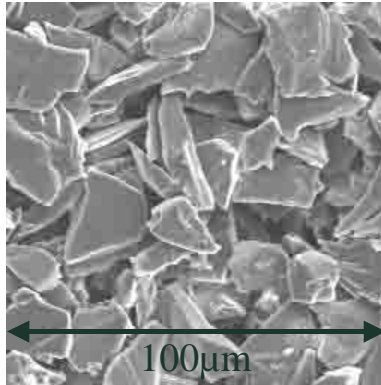


Fig. 3 SEM image of micro porous coated surface

켰다. 또한 Teflon substrate에 열이 전달되지 않도록 구리블록 이외의 주위 공간에 에폭시(3M1838-L B/A)를 도포하였다. 구리블록 표면의 온도를 측정하기 위해 각각의 발열부에 대해서 2개의 홈을 직경 1mm, 깊이 10mm로 가공하여 측면에 판 후 K-type 열전대를 삽입하였다. 그리고 발열부는 균일한 분말입자를 가지고 있는 다이아몬드를 사용하여 plain 표면에 코팅하였다. 코팅은 O'Connor and You<sup>(6)</sup>의 'dripping' 방법을 이용하여 DOM[(Diamond particle, Omegabond 101, Methyl-Ethyl-Ketone(M.E.K)]으로 하였다. 다이아몬드 입자의 크기로는  $25 \pm 5 \mu\text{m}$  를 사용하였으며, 다이아몬드 입자 (1.5g), Omegabond 101 (0.1ml), M.E.K (10ml)로 혼합하여 plain 표면에 코팅하였다. 발열부를 코팅한 후 oven에서 423K 로 약 한 시간 정도 구워서 M.E.K 를 완전히 증발시켰다. 코팅 두께는 마이크로미터를 사용하여 측정하였고 SEM을 이용하여 입자크기 및 두께를 확인하였다. Fig. 3은 DOM 방법으로 코팅된 마이크로다공성 코팅 단면의 SEM 이미지이다.

제작된 발열부는 DC Power Supply를 이용하여 전압을 증가시켜가며 발열량을 조절하였고, 모든 실험은 정상상태(steady state)에서 수행하였으며, 정상상태는 각각의 열전대의 온도변화가 0.2 K 이하일 때를 기준으로 하였다. 발열부에 공급한 발열량은 Power Meter로 측정하였고 모든 온도, 압력 및 전력에 대한 데이터는 Data Acquisition System을 이용하여 저장하였다.

## 2.2

시험 액체의 온도가 포화온도가 되도록 카트리지 히터로 가열한다. 액체가 포화 온도로 되면 응축기에서 응축이 원활히 이루어지게 하기 위해서 약 2시간 동안 끓여서 불응축 가스를 제거하고 정상상태가 되도록 약 2시간 동안 유지시킨다. 열유속은 DC Power Supply에 의해 전압을 올려가며 조정하고 구리의 온도를 측정하여 K-type 열전대의 온도변화가 0.2K 이하가 되면 구리블록의 온도가 균일하다고 판단하고 데이터를 저장한다.

## 3.

본 실험에서는 발열부 간 거리가 0.4cm 인 double 발열부를 제작하여 기울기와 과냉도 그리고 기관간의 거리를 변화시켜가면서 그에 따른 영향들을 실험하였다.

### 3.1 plain

Fig. 4는 수평상태에서  $4\text{cm}^2$  면적을 가진 마이크로다공성 코팅 표면과 plain 표면에 대해서 Rainey and You<sup>(5)</sup>의 실험결과 값과 비교하여 과열도에 따른 열유속을 나타낸 그래프이다. Rainey and You<sup>(5)</sup>의 실험data와 본 실험의 data가 조금

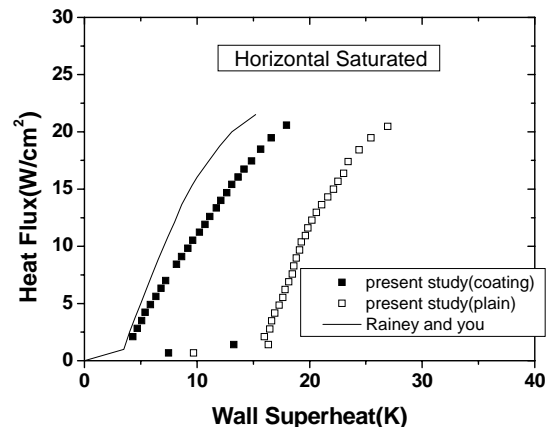


Fig. 4 Pool boiling data( $\theta=0^\circ$ ,  $4\text{cm}^2$  surface)

차이가 있는 것을 그래프에서 볼 수 있는데 이는 본 실험에서는 비록 동일 조건 하에서 실험을 하였으나 Rainey and You<sup>(5)</sup>는 분말 입자의 크기를 8~12 μm로 사용하였고 ≈ 50 μm의 코팅 두께를 가지는 발열부로 실험을 하였다. 그러나 본 실험에서의 분말입자는 20~30 μm로 사용되었고 코팅 두께역시 100±20 μm로 측정되었다. 따라서 다이아몬드 분말입자의 크기가 비등성능에 영향을 미친 것으로 생각된다. 그래프에서 보면 Rainey and You<sup>(5)</sup>의 결과와 같이 코팅표면이 plain보다 월등한 비등 성능을 가지고 있는 것을 볼 수 있다. 본 실험에서는 단일 발열부에 대한 data를 기초로 하여 double 발열부에 대해 과냉도, 기울기, 기관간의 거리에 대한 실험을 수행하였다.

3.2

Fig. 5는 수평상태에서 액체의 온도를 각각 56°C, 51°C, 46°C, 41°C( $\Delta T_{sub} = 0, 5, 10, 15K$ )로 유지하여 그에 따른 열유속과 과열도의 관계를 나타낸 그래프이다. 전체적으로 과냉도가 증가할수록 과열도가 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 과냉 액체에 의한 냉각으로 인해 발열부 표면에 생성된 기포가 성장하지 못하고 응축되어 액체로의 열전달률이 작아지기 때문이다.

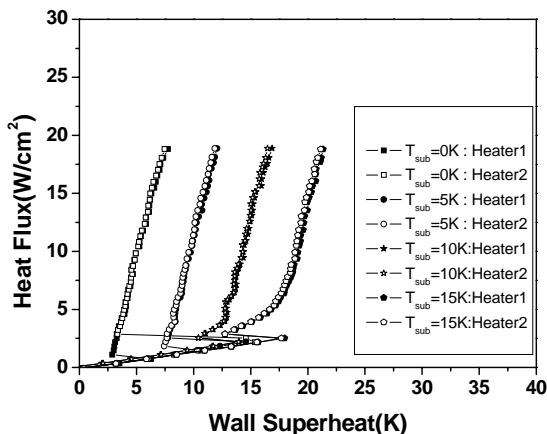


Fig. 5 Effects of bulk subcooling on heating surface distance 0.4cm( $\theta=0^\circ$ )

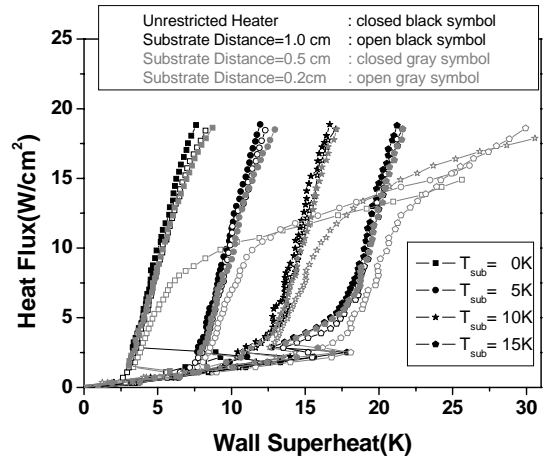


Fig. 6 Effects of bulk of subcooling on substrate distance 0.2cm, 0.5cm and 1.0cm

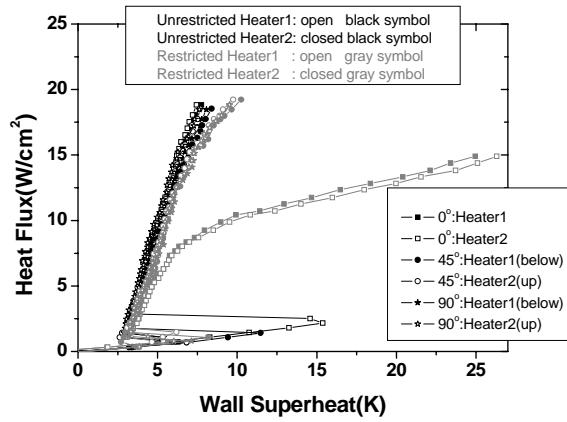
Fig. 6은 기관과 기관간의 거리에 대한 영향을 나타낸 그래프이다. 기관간의 거리는 0.2cm, 0.5cm, 1.0cm로 설정을 하였다. 기관거리가 0.5cm, 1.0cm 일 때는 열유속이 18.4 W/cm² 일 경우 과냉도 0K에서 상부 기관이 없는 것 과 비교해 보면 각각 0.8K , 1.1K 의 온도차를 보였고, 기관거리 0.2cm 일 때는 열유속이 14.9 W/cm² 에서 상부 기관이 없는 경우와 비교할 경우 19.4K 의 온도 차이를 보였다. 이는 기관거리 0.2cm 에서는 상부 기관으로 인해 발열부 표면에서 기포들이 제대로 이탈하지 못하고 기포 밀도의 증가와 함께 기포들이 정체되면서 증기막을 생성, 증기막의 단열효과에 의한 온도의 급상승으로 인하여 발열부 표면으로 액체의 접근이 어렵기 때문이다.

기관간의 거리가 0.5cm 와 1.0cm 에서는 비록 기관에 막혀 기포들이 수직 상승하지는 못하지만 어느 정도 발열부 표면으로 액체의 접근이 수월하여 발열부에서 발생된 열을 주위로 잘 전달할 수 있기 때문이다.

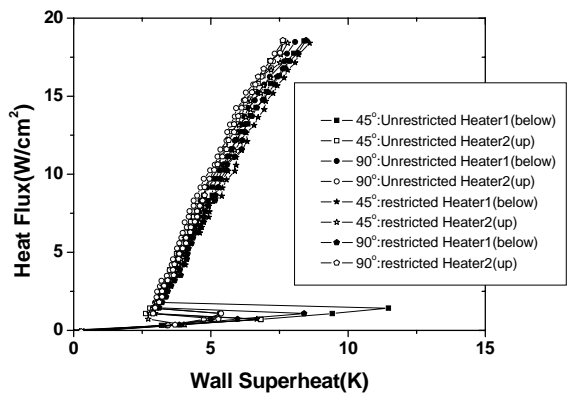
3.3

기울기에 따른 영향을 알아보기 위해서 double 발열부를 수평을 기준으로 시계방향으로  $\theta=0^\circ$ ,  $\theta=45^\circ$ ,  $\theta=90^\circ$ 로 변화시켜가면서 실험을 하였다.

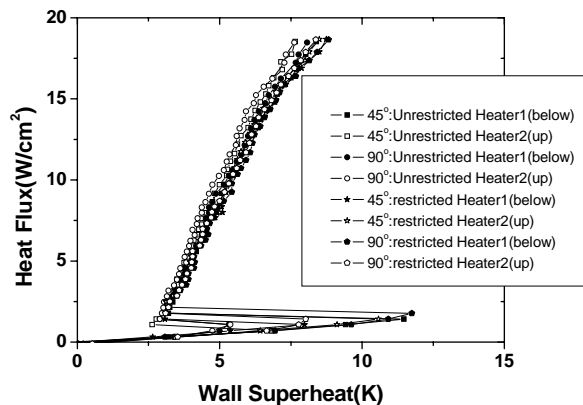
Fig.7은 과냉도를 0K로 하고 기관간의 거리를



(a) substrate distance 0.2cm



(b) substrate distance 0.5cm



(c) substrate distance 1.0cm

Fig. 7 Effects of heater orientation on substrate distance

수평일 때와 마찬가지로 설정한 후 기울기의 변화에 따른 열유속과 과열도의 관계를 나타낸 그래프이다. Rainey and You<sup>(5)</sup>의 결과와 같이  $\theta=45^\circ$ 와  $\theta=90^\circ$ 일 때가 bubble sweeping 현상으로 인해 기포의 발생 및 이탈이 용이하게 되어  $\theta=0^\circ$ 보다 비등성능이 우수하였다. 또한 상부 기관의 영향으로 인해 상부 기관이 없는 것 보다 상부 기관이 있는 경우 전체적으로 조금 높은 과열도를 가지고 있었다. 특히 Fig.7(a)에서 기관거리가 0.2cm인 경우 발열부 표면에서 기포가 이탈시 상부 기관에 의해 더 많은 방해받게 되므로 액체접근이 어려워 더 높은 과열도를 가지게 되었다.

Fig. 7(b)와 Fig. 7(c)의 그래프에서 상부 발열부와 하부 발열부를 비교해보면 그래프 모두 하부 발열부에서 생성된 기포들이 수직이탈 하면서 상부 발열부에서 생성된 기포들의 이탈을 도와 상부 발열부 표면의 열을 쉽게 제거할 수 있어 상부 발열부의 과열도가 하부 발열부보다 조금 더 낮음을 알 수 있었다.

기관 간의 거리에 따른 상부 발열부와 하부 발열부의 비등 성능을 비교해 보면  $\theta=45^\circ$ , 기관간의 거리 0.2cm, 0.5cm, 1.0cm, 열유속이  $16.2 \text{ W/cm}^2$ 일 때 하부 발열부를 상부 기관이 없는 경우와 비교해보면, 기관간의 거리 각각에 대해서 0.7K, 0.2K, 0.1K의 온도차가 있음을 알 수 있었고, 상부 발열부일 경우 1.0K, 0.3K, 0.4K,의 온도차가 있음을 알 수 있었다. 또한 상부 발열부의 비등성능 증가차가 하부 발열부의 비등성능 증가차보다 더 크음을 알 수 있는데 이는 상부 발열부는 하부 발열부로부터 bubble sweeping 작용을 받기 때문이다.

4.

본 연구에서는 double 발열부 표면에 대해서 과냉도, 기관 간의 거리 및 설치각도 등에 따른 영향을 살펴보았으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 수평상태에서 상부 기관이 없는 경우 과냉도가 커짐에 따라 과열도가 증가하였다.
- (2) 수평상태에서 상부 기관이 있는 경우 기포가 발열부 표면에 증기막을 형성, 발열부의 온도를 상승시켜 비등성능이 저하되었다. 특히 기관 간의 거리가 0.2cm 일 때 현저하게 나

타났다.

- (3)  $\theta=45^\circ$ 와  $\theta=90^\circ$ 일 때 bubble sweeping 현상으로  $\theta=0^\circ$ 보다 비등성능이 우수하였고 상부 발열부와 하부 발열부를 비교해보면 상부 발열부가 하부 발열부보다 비등성능이 좋았다.

본 연구는 2003년도 한국과학재단[특정기초연구:R01-2002-000-00481-0(2003)]의 지원에 의해서 수행되었으며 이에 감사드립니다.

- (1) Myeong-Gie Kang., 2000, Effects of surface roughness on pool boiling heat transfer, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 43, pp. 4073-4085.
- (2) Giovanni Guglielmine. Mario Misle, Corrado Schenone., 2002, Boiling of saturated FC-72 on square pin fin arrays, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 41, pp. 599-608.
- (3) C, Kim, K, J, Lee, Y, C, Kim, 2003, Effect of Micro-Fin etched heating surfaces on Nucleate Boiling in PF5060, Proceeding of the SAREK 2003 Winter Annual Conference, pp. 86-91
- (4) J, Y, Chang and S, M, You, 1997, Enhanced boiling heat transfer from micro-porous surfaces : effects of a coating composition and method, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 44, pp. 4449-4460.
- (5) K, N, Rainey., S, M, You., 2001, Effects of heater size and orientation on pool boiling heat transfer from microporous coated surfaces, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 44, pp. 2589-2599.
- (6) J, P, O'Connor, S, M, You, 1995, A painting technique to enhance pool boiling heat transfer in saturated FC-72, ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 117, pp. 387-393.