

< 논문 >

마이크로다공성 코팅된 인접 복수 발열체에 대한 PF5060의 냉각 특성

김태균* · 김윤호* · 이규정†
(2006년 1월 11일 접수, 2006년 5월 11일 심사완료)

Characteristics of Cooling for the Adjacent Double Micro-Porous Coated Surfaces in PF5060

Tae-Gyun Kim, Yoon-ho Kim and Kyu-Jung Lee

Key Words: Micro-Porous Coating(마이크로다공성 코팅), Cooling(냉각), Heater Orientation(히터기울기), Bulk Subcooling(과냉도), Bubble Sweeping(버블 스위핑)

Abstract

The present research is an experimental study on characteristics of cooling behavior for the adjacent copper blocks with surface roughness or micro-porous coated surface. The experiments were carried out at saturation state or within subcooled states of PF5060. The effects of heater orientation and the intervals between heating surfaces or substrates were investigated under various heat flux conditions. The boiling performance of copper block with micro-porous coated surface was better than that of copper block with surface roughness. It is understood that the bubble sweeping enhances boiling performance for the heaters with inclinations of $\theta=45^\circ$ and $\theta=90^\circ$, where as the bubble flattening decreases boiling performance for the heaters with inclinations of $\theta=135^\circ$ and $\theta=180^\circ$. 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. It is also found that boiling performance decreases in the case of adjacent double heaters with only 0.2cm substrate interval.

기호설명

그리스문자

θ : 수평으로부터의 표면 기울기[°]

- H : 기판간의 거리[cm]
- h : 열전달계수 $q''/(T_{wall} - T_{sat})[W/cm^2 \cdot K]$
- L : 발열부간의 거리[cm]
- q'' : 단위면적당 열유속[W/cm^2]
- T_{bulk} : 유전성 액체의 외부온도[K]
- ΔT_{sat} : 과열도($T_{wall}-T_{sat}$)[K]
- ΔT_{sub} : 과냉도($T_{sat}-T_{bulk}$)[K]
- T_{wall} : 발열체의 벽면온도[K]

1. 서론

최근 전자 통신장비들은 부피 및 비용을 줄이면서 시스템 성능의 극대화를 추구하고 있다. 이로 인한 전자장비의 고속 및 고밀도화는 열유속과 발열량을 증가시켜 많은 신뢰성 및 내구성 문제들을 야기시키고 있다. 특히, 다칩모듈(MCM : multichip module)인 경우에는 전체적인 장비의 크기와 무게를 줄이면서 실장 내의 칩들을 효과적으로 배열하여 통신장비의 신뢰성과 처리속도를 향상시키고 있어 실장밀도의 증가에 따른 통신부

† 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과
E-mail : kjlee@korea.ac.kr
TEL : (02)3290-3359 FAX : (02)928-9768

* 회원, 고려대학교 대학원 기계공학과

품의 발열량 및 열유속은 급격히 증가하고 있는 추세이다.

통신기지국에서 사용되는 HPAU인 경우 발열량이 unit 당 300W, 소자 당 80W, 열유속은 $15\sim 23\text{W}/\text{cm}^2$ 이며 CPU에서는 100W의 발열량과 $6.25\text{W}/\text{cm}^2$ 의 열유속이 발생된다. 또한 단일칩에서 제거해야 할 열유속은 $100\text{W}/\text{cm}^2$, 다칩모듈에서는 $25\text{W}/\text{cm}^2$, 그리고 PCB에서는 $10\text{W}/\text{cm}^2$ 정도로 나타나고 있다. 실장기술의 발전과 더불어 기존의 장비에 비해 좁은 공간에서 발생된 고열유속의 열을 효과적으로 외부로 방열시킬 수 있는 기술의 개발이 요구되어지고 있다.

PCS, WLL, CDMA 등 무선 통신기지국에서는 기지국 전체를 냉방하는 일체형 냉방기나 열교환기 방식을 사용하고 있으며 대부분의 경우 각 통신 unit에서 발생하는 고열유속의 발열량을 공냉형 강제대류 냉각 방식을 적용하여 방열시키고 있다. 이와 같은 기존 통신장비 냉각시스템은 냉방기의 압축기 구동에 따르는 전력소모가 많고 국부적 고열유속제거 및 강제대류 공기냉각에 따른 압력강하 및 소음발생등이 문제점으로 제기되고 있다. 따라서 통신장비 unit을 개별적으로 액체냉각하여 장비의 성능, 신뢰성 및 수명을 향상시킬 필요가 있다.

액체 냉각방식은 공기냉각에 비하여 열전도율 및 Pr수가 커서 대류열전달에서 유리하고, 밀도 및 비열이 크므로 열용량 측면에서도 장점을 가지고 있다. 특히 유전성 액체(dielectric fluid)를 이용한 직접 액체냉각 방식은 최근 세계적인 관심의 대상이 되고 있다.

최근, 직접 액체냉각 방식의 비등 열전달을 증가시키기 위해 발열부 표면에 홈이나 공동을 생성하여 발열부 표면의 열을 외부로 효과적으로 방출시키기 위한 연구들이 수행되고 있다.⁽¹¹⁾

Ferjancic and Golobic⁽¹⁾은 사포를 이용하여 stainless steel 302와 steel 101의 표면에 다양한 거칠기($0.02\sim 1.5\ \mu\text{m}$)를 가지는 발열부를 제작하여 표면조도에 따른 임계열유속(CHF : critical heat flux)의 영향을 연구하였다. 표면 거칠기가 증가할수록 발열부의 표면에 더 많은 공동이 생성되어 임계열유속이 증가하였다.

Guglielmine et al.⁽²⁾은 구리 표면에 핀을 제작하여 핀 길이와 핀 폭에 따른 열전달 계수와 열전

달 성능을 평가하였고 Kim et al.⁽³⁾은 구리표면에 마이크로 핀을 제작하여 핀의 길이, 크기, 깊이, 폭에 따른 비등성능을 연구하였다. Shu-Rong et al.⁽⁴⁾은 FC-72를 이용하여 응축용 핀과의 거리에 따른 영향을 실험하였다. 응축수의 온도가 감소함에 따라 열전달 계수와 임계열유속은 증가하였고 표면과 응축용 핀 사이의 간격이 좁아짐에 따라 임계열유속이 감소함을 보였다.

최근에는 발열부 표면에 금속분말을 코팅하여 비등 열전달을 증가시키는 방법에 대한 연구가 진행되고 있다. Chang and You⁽⁵⁾는 다양한 금속분말을 이용하여 금속 분말의 종류에 따른 비등성능을 연구하였다. 실험결과 금속분말 코팅된 표면이 매끈한 구리표면보다 ONB 근처의 초기 과열도를 $80\sim 90\%$ 감소시켰고 약 30%의 열전달 계수를 상승시켰다. Rainey and You⁽⁶⁾는 구리표면에 다이아몬드 분말을 코팅하여 발열부 크기와 발열부 기울기에 따른 영향을 연구하였다. 히터 사이즈가 작고 $\theta=45^\circ$ 와 $\theta=90^\circ$ 일 때가 열전달 성능이 우수하였고 기울기가 $\theta=90^\circ$ 보다 클수록 임계열유속 상태에 쉽게 도달하여 열전달 성능이 저하됨을 증명하였다.^(9,10)

다칩 모듈의 비등성능에 관한 연구에서 Misale and Bergles⁽⁷⁾는 발열부 표면에 모래분사(sand blasting)를 통해 표면 거칠기를 형성한 후 발열부 판과 판사이의 폭에 따른 비등 열전달 현상에 대해서 연구 하였다. 발열부 판과 판사이의 폭이 감소함으로써 자연대류에서는 열전달 계수가 감소하였으나 핵비등 영역에서는 비등 성능이 증가함을 보였다.

본 연구에서는 발열부 표면의 열을 외부로 효과적으로 방출시키기 위해, 발열부 표면에 금속분말(diamond)을 코팅한 단일발열부와 복수발열부를 제작하여 열전달 성능을 평가하였다. 특히, 과냉도($\Delta T_{\text{sub}} = 0\text{K}, 5\text{K}, 10\text{K}, 15\text{K}$), 기울기($\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$), 발열부와 발열부 간의 거리(0.2cm, 0.5cm), 기판과 기판 간의 거리(0.2cm, 0.5cm, 1.0cm) 등을 변화시켜가면서 과열도($\Delta T_{\text{sat}} = T_{\text{wall}} - T_{\text{sat}}$)에 따른 풀비등열전달 효과와 영향들을 비교, 분석하였다. 또한 샌드페이퍼를 이용하여 평표면(plain)에 거칠기를 형성한 후 표면조도에 따른 비등성능을 평가하여 평표면의 실험결과와 함께 비등 열전달에 미치는 효과와 영향들을 살펴보았다. 본 연구에서는 전자통신장비의

액체 냉각기술에 대한 열유동 특성을 파악하고 고열유속 통신장비의 냉각시스템 설계에 필요한 기초 자료를 확보하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 PF5060의 냉각 특성 실험을 위한 실험 장치를 나타낸 것이다. 실험수조는 비교적 열에 잘 견디고 단단한 P/C(polycarbonate)로 제작하였고 실험수조의 크기는 35cm×31cm×33cm의 크기로 제작하였다.

실험유체의 온도는 수중용 카트리지 히터(2kW)와 항온조의 냉각수를 이용하여 조절하였고 실험수조 상단에 배출구와 응축기를 설치하여 불응축 가스를 배출하고 증발된 PF-5060을 응축하였다. 실험수조의 외부는 단열재를 사용하여 실험유체의 온도가 일정하게 유지되도록 하였고 실험유체의 온도는 Test Section 주위에 4개의 T-type 열전대를 사용하여 측정된 온도의 평균값을 사용하였다. 실험수조의 압력은 압력계지를 상부에 설치하여 측정하였다.

Fig. 2(a)와 2(b)는 발열부의 크기가 4cm²인 단일 발열부와 복수 발열부를 나타낸 개략도이다. Teflon substrate(80mm×80mm×10mm) 위에 Ni-Cr 선(직경 0.45mm)을 설치하고 열전도성이 좋은 Omega bond 200을 사용하여 구리 블록과 접착시켰다. 또한 Teflon substrate에 열이 전달되지 않도록

구리블록 이외의 주위 공간에 에폭시(3M1838-L B/A)를 도포하였다. 구리블록 표면의 온도를 측정하기 위해 4mm 두께의 발열부에 2개의 홈을 직경 1mm, 깊이 10mm로 측면에 가공하여 K-type 열전대를 삽입하였다. Fig. 2(c)는 복수 발열부에서 발열부 간의 거리와 기판간의 거리를 나타낸 개략도이다. 발열부 간의 거리 0.2cm, 0.5cm를 각각 제작하였고, 발열부 표면에서부터 상부 기판까지의 거리는 볼트로 조정하였다.

발열부는 #80의 거칠기를 가지는 샌드페이퍼를 사용하여 표면조도를 형성하였고 코팅의 경우에는 균일한 분말입자를 가지고 있는 다이아몬드를 사용하였다.

샌드페이퍼를 사용한 경우 균일한 압력으로 발열부의 상하좌우방향으로 거칠기를 형성하였고 약 400번 정도 반복하였다. 조도는 광위상간섭(phase-shifting interferometry)과 백색광주사간섭(white-light scanning interferometry)이 측정원리인 ACCURA를 사용하였고 평균조도는 1.546μm로 측정되었다.

코팅은 O'Connor and You⁽⁸⁾의 'dripping' 방법을 이용하여 DOM[diamond particle, omegabond 101, methyl-ethyl-ketone(M.E.K)]으로 하였다. 다이아몬

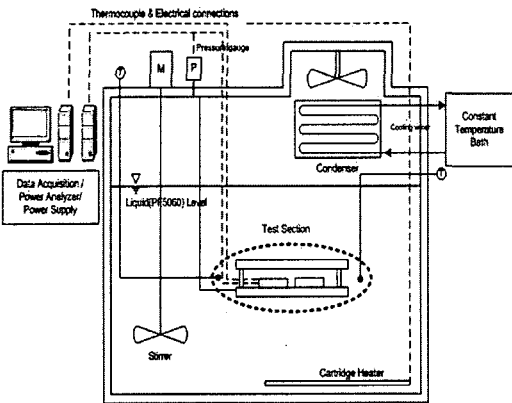
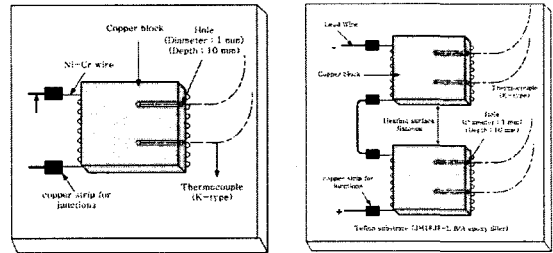
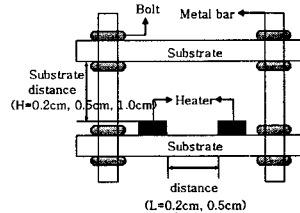


Fig. 1 Schematic diagram of experiment setup

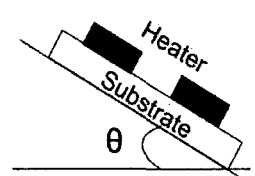


(a) Single heater assembly

(b) Double heater assembly



(c) Substrate and heating surface distance



(d) Schematic of heater surface orientation(θ)

Fig. 2 Schematic view of test section

Table 1 Specifications of test section

Teflon substrate	80mm×80mm×10mm (W×L×H)
Copper block	20mm×20mm×4mm
Ni-Cr wire	φ=0.45mm
Surface roughness (sand-papered surface)	1.546μm
Heater Orientation	θ=0°, 45°, 90°, 135°, 180°
Substrate distance	No upper substrate, H=2mm, 5mm, 10mm
Heater 1 & Heater 2 distance	L= 2mm, 5mm
Particle size	6±2μm
Coating thickness	45±5μm

Table 2 Properties of PF5060

Boiling Point @1 atm	56 [°C]
Density@25[°C]	0.00168 [g/mm ³]
Surface tension@25[°C]	1.2 [dyne/mm]
Vapor pressure@-10 [°C]	58 [Torr]
Specific heat	1.05 [kJ/kg·K]
Thermal conductivity	0.057 [W/m·K]
Latent heat (vapor)	29670 [J/mole]
Liquid dynamic viscosity @ 25 [°C]	0.67×10 ⁻³ [Pa·s]
Liquid kinematic viscosity @ 25 [°C]	0.4×10 ⁻⁶ [m ² /s]

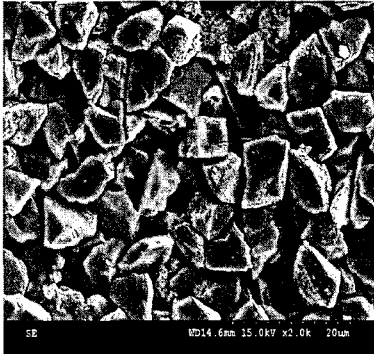


Fig. 3 SEM image of Micro-Porous coated surface(Particle size: 6±2 μm)

드 입자의 크기로는 6±2μm를 사용하였으며, 다이아몬드 입자(1.5g), Omegabond101(0.1ml), M.E.K (10ml)로 혼합하여 발열부 표면에 코팅하였다. 발열부를 코팅한 후 oven에서 423K로 약 한 시간 정도 가열하여 M.E.K를 완전히 증발시켰다. 코팅 두께는 마이크로미터를 사용하여 측정하였고 SEM을 이용하여 입자크기 및 두께를 확인하였다. 코팅 두께는 45±5μm로 측정되었다. 시험부인 구리블록과 표면조도 및 다이아몬드 입자의 주요 제원을 Table 1에 제시하였다.

Fig. 3은 DOM 방법으로 코팅된 마이크로다공성 코팅 단면의 SEM 이미지이다.

2.2 작동유체

본 연구에서는 절연성과 화학적으로 안정성이

있는 PF5060을 작동유체로 선정하였다.

PF5060은 FC72와 동일한 상태치를 가지고 있는 유전성 액체이고 인체에 무해한 환경 친화적 냉매이다. PF5060의 1기압하의 비등점은 56°C이며 Table 2에 PF5060의 물성치를 나타내었다.

2.3 계측장치

유체의 온도는 T형 열전대를 사용하여 측정하였고 발열부 온도는 K형 열전대를 사용하여 측정하였다. T형과 K형 열전대의 정확도는 ±0.2°C이고 모든 실험은 정상상태(steady state)에서 수행하였다. 정상상태는 각각의 열전대의 온도변화가 0.2K 이하일 때를 기준으로 하였다.

자료 수집을 위한 모든 데이터는 Yokogawa사의 DAS(data aquisition system)을 사용하였고 PC와 연결된 데이터를 모니터링(monitring)하면서 작동유체의 온도와 발열부의 온도 및 압력을 저장하였다.

발열량은 파워 미터(power meter)를 이용하였으며 DC전원 공급기에서 공급되는 전압과 전류를 발열부에 공급하고 실시간으로 데이터(전압, 전류, 발열량)를 저장하였다.

2.4 실험방법

카트리지 히터를 이용하여 작동 유체의 온도가 포화온도가 되도록 가열한다. 작동 유체가 포화 온도가 되면 불응축 가스를 제거하기 위해 교반기를 이용해 2시간 동안 가열시킨다. 불응축 가스를 제거한 후 정상상태가 되도록 2시간 동안 유지시킨다.

열유속은 DC 전원 공급기에 의해 단계적으로 전압을 올려가며 조정하였고 이때의 구리 온도를 측정하여 2개의 K-type 열전대의 온도차가 0.2K가 되면 발열부의 온도가 균일하다고 판단하고 실험을 수행하여 결과를 저장하였다.

본 실험에서 온도에 대한 불확실도는 $\pm 0.5K$ 로 평가되었고 열유속은 $15W/cm^2$ 에서 6%보다 낮은 불확실도를 나타냈다. 기울기에 대한 불확실도는 $\pm 1\%$ 로 평가되었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 수평코팅표면의 핵비등 곡선

Rainey and You⁽⁶⁾은 구리블록의 표면적이 $4cm^2$ 이고 다이아몬드 입자 크기가 $8\sim 12\mu m$, 코팅 두께가 약 $50\mu m$ 인 단일 발열부를 사용하여 열유속 증가에 따른 비등성능 실험을 하였다. 본 실험에서는 다이아몬드 입자 크기가 $4\sim 8\mu m$, 코팅 두께가 $45\pm 5\mu m$ 인 단일 발열부를 사용하여 실험을 실시하였고 다이아몬드 코팅을 하지 않은 평표면에 대해서도 실험을 하여 비교결과를 Fig. 4에 나타내었다.

본 실험결과 코팅표면의 경우 저열유속 부근에서 기존 연구와 약간의 비등성능 차이가 보였으며 이는 다이아몬드 입자 크기에 의한 영향으로 판단된다. 평표면일 경우에는 제작과정 중 표면 거칠기가 기존의 연구와 차이가 있기 때문이라 판단되고 본 연구에서의 평표면의 평균 조도는 $0.452\mu m$ 로 측정되었다. 하지만 평표면보다 마이크로다공성 코팅된 표면이 월등한 비등성능을 가

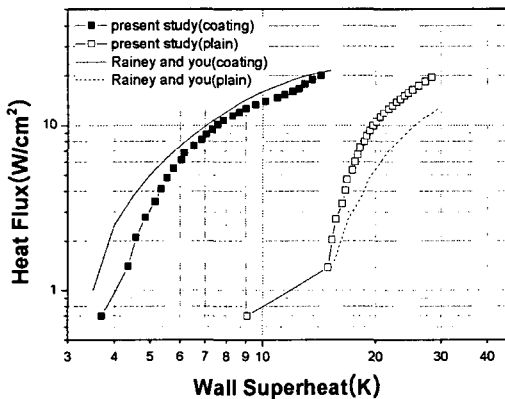


Fig. 4 Comparison between present study and previous study (Single heater, $\theta=0^\circ$)

지고 있음을 알 수 있다.

상기와 같은 실험적 검증을 통하여 본 연구에서는 단일 및 복수 발열부에 대해서 과냉도와 기울기 그리고 발열부와 기관의 설치거리에 따른 영향을 비교 및 분석하였다.

3.2 수평상태에서의 과냉도 영향

Fig. 5는 단일 발열부에 대해서 액체의 온도를 과냉상태($\Delta T_{sub} = 0K, 5K, 10K, 15K$)로 유지한 후 수평($\theta=0^\circ$)상태에서 열유속과 과열도에 따른 영향을 나타낸 그래프이다.

전반적으로 과냉도가 증가할수록 과열도가 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이는 과냉 상태에서는 과냉도가 증가할수록 가열면에 국부적으로 생성된 기포가 과냉액체에 의한 냉각으로 기포 정장이 제한되거나 응축, 소멸 되어 액체로의 열전달률이 작아지기 때문이다. 고과냉상태에서는 비등 열전달 현상이 지연되고 자연대류에 의한 영향이 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다.

3.3 기울기(orientation)변화에 따른 영향

기울기에 따른 비등성능을 비교하기 위해서 단일 발열부에 대해 과냉도 0K에서 수평상태($\theta=0^\circ$)를 기준으로 발열부를 시계방향으로 $\theta=45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ 로 변화시켜가면서 열유속에 따른 과열도와 열전달계수를 비교하였다.

Fig. 6의 경우 코팅표면이 평표면보다 전체적으로 비등성능이 우수하였고 코팅표면의 열전달계수가 평표면보다 2배 이상 증가하였다.

평표면과 코팅표면 모두 $\theta=45^\circ$ 와 $\theta=90^\circ$ 가 $\theta=0^\circ$

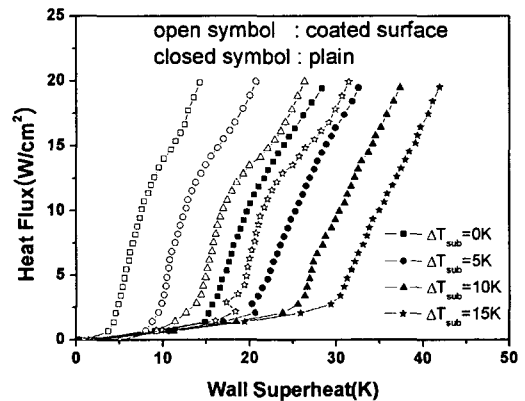
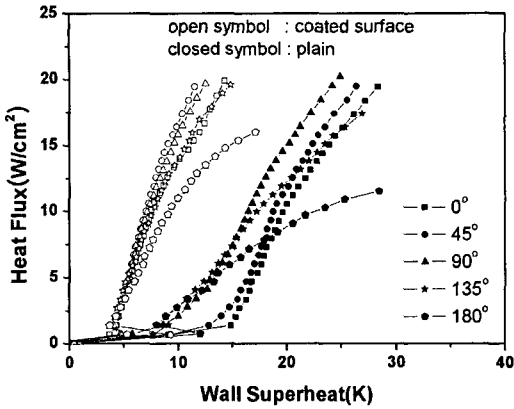
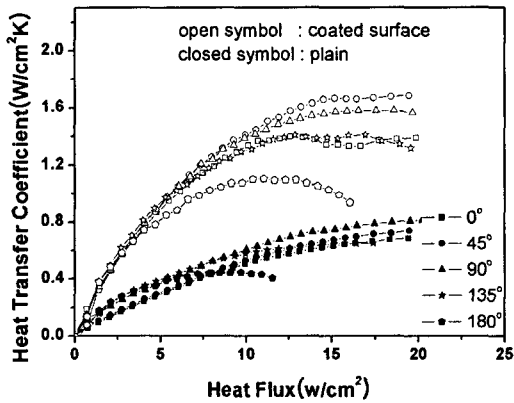


Fig. 5 Effect of bulk subcooling for coated surface



(a) Heat flux



(b) Heat transfer coefficient

Fig. 6 Effect of heater orientation for coated surface

보다 비등성능이 우수한 것을 볼 수 있다. 이는 발열부 하부쪽에서 생성된 기포가 발열부 상부 쪽의 기포를 쓸어가는 기포 스위핑(bubble sweeping) 현상 때문에 발열부로부터의 기포이탈이 용이하게 되어 발열부 표면의 열을 효과적으로 제거할 수 있기 때문이다.

이와는 반대로 $\theta=135^\circ$ 와 $\theta=180^\circ$ 에서는 평표면과 코팅표면 모두 열유속이 증가할수록 발열부 표면으로부터 생성, 성장된 기포가 수직이탈하지 못하고 발열부 표면에 정체되는(flattening)현상이 발생된다. 이는 기포가 발열부 표면 주위에 증기막을 형성하여 발열부 주위로의 열전달을 방해하기 때문에 발열부의 온도가 급상승하게 된다. $\theta=135^\circ$ 인 경우 발열부에서 생성된 기포는 바

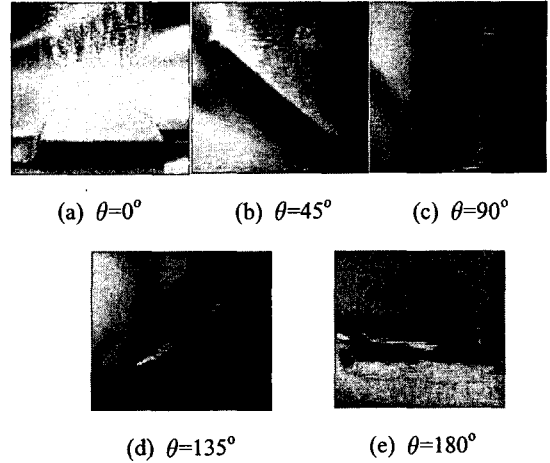


Fig. 7 Effect of heater orientation for coated surface at $q'' = 20\text{W/cm}^2$ (a), (b), (c), (d), 14W/cm^2 (e)

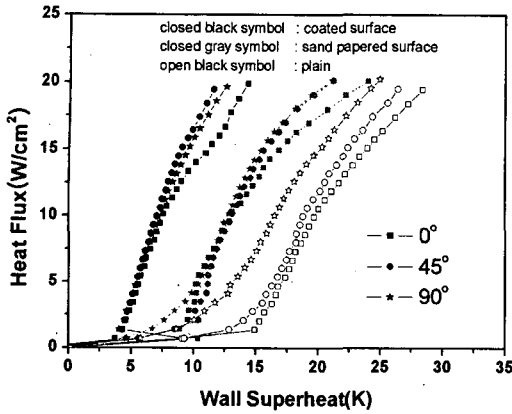
로 수직상승하지 못하지만 기울기의 영향으로 기포가 발열부로부터 제거될 수 있어 주위와의 열전달이 비교적 수월하지만 $\theta=180^\circ$ 인 경우에는 기포가 발열부로부터 제거되지 못하고 정체되면서 $\theta=135^\circ$ 인 경우보다 비등성능이 현저히 저하된다.

$\theta=45^\circ$ 와 $\theta=90^\circ$ 모두 부력(buoyancy)의 영향으로 기포 스위핑 작용을 받고 있다. 하지만 코팅표면의 경우 고열유속으로 갈수록 기포의 핵생성지점수와 이탈빈도가 증가하게 되고 발열부 하부 쪽에서 생성된 기포가 상부 쪽에 영향을 미치게 된다. $\theta=90^\circ$ 는 발열부 하부 쪽에서 생성된 많은 수의 기포가 상부 쪽으로 이동하면서 발열부 상부 표면에 증기막을 형성하여 발열부 주위로의 액체 접근을 방해하게 되지만 $\theta=45^\circ$ 에서는 발열부 하부 쪽의 기포가 상부 쪽에 증기막을 형성하지 않은 채 기포 스위핑 작용과 함께 상승한다.

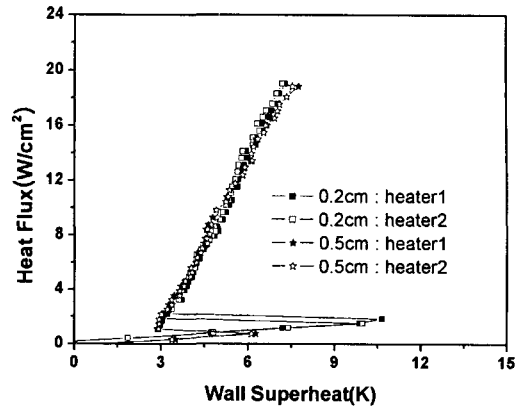
평표면일 경우에는 $\theta=90^\circ$ 에서 비등성능이 우수한 것을 볼 수 있다. 이는 평표면에서는 기포가 생성될 수 있는 공동(cavity)의 수가 코팅표면보다 상대적으로 적고 기포밀도 또한 현저히 떨어져 발열부 상부 쪽에 코팅표면 만큼의 증기막이 형성되지 못하고 $\theta=90^\circ$ 에서 보다 원활한 기포 스위핑이 작용했기 때문이라 판단된다.

Fig. 7은 열유속이 20W/cm^2 (a-d), 14W/cm^2 (e)일 경우(과냉도 0K) 기울기 변화에 따른 코팅표면을 나타낸 사진이다.

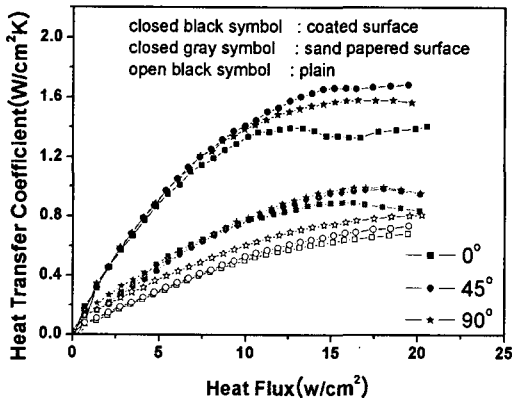
Fig. 8은 과냉도 0K에서 코팅, 샌드페이퍼, 평



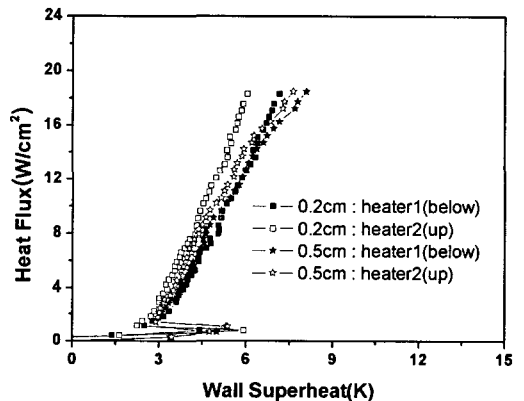
(a) Heat flux



(a) $\theta=0^\circ$



(b) Heat transfer coefficient



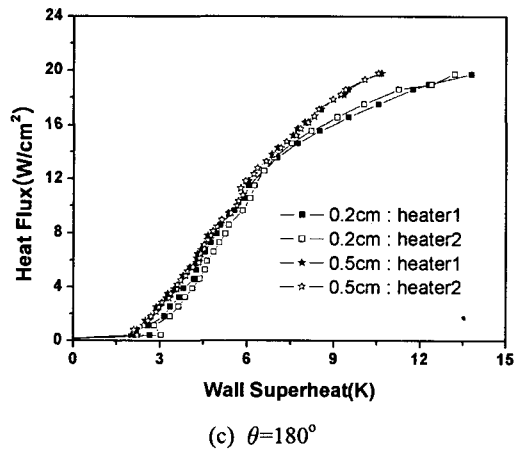
(b) $\theta=90^\circ$

Fig. 8 Effect of heater orientation for coated surface and sandpapered surface

표면에 대해 $\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 에 관한 비등성능 그래프이다. 비등성능은 코팅, 샌드페이퍼, 평표면의 순으로 우수하게 나타났다.

샌드페이퍼로 평표면에 조도를 형성한 발열부는 비록 발열부의 표면적을 넓혀 주위로의 열전달이 증가하였으나 균일한 입자를 가지는 코팅표면보다는 핵을 생성할 수 있는 공동의 수가 상대적으로 적고 핵비등 또한 활발하지 못해 주위로의 열전달을 촉진시키지 못했다. 하지만 평표면보다는 우수한 비등성능을 보였다.

샌드페이퍼표면의 경우에도 고열유속으로 갈수록 $\theta=45^\circ$ 와 $\theta=90^\circ$ 가 $\theta=0^\circ$ 보다는 비등성능이 우수하였다. 코팅표면의 경우 $\theta=45^\circ$ 가 $\theta=90^\circ$ 보다 비등성능이 우수한 반면 샌드페이퍼표면의 경우에는



(c) $\theta=180^\circ$

Fig. 9 Effect of heating surface distance at $\theta=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$

$\theta=45^\circ$ 와 $\theta=90^\circ$ 가 유사한 비등성능을 보였다. 이는 앞부분에서 언급했듯이 발열부 상부 쪽의 기포밀도가 코팅표면보다는 상대적으로 적고 평표면보다는 많아 증기막의 형성에 서로 차이를 보이고 있기 때문이다.

3.4 발열부와 발열부 간의 영향

발열부와 발열부 간의 거리에 따른 영향을 알아보기 위해서 과냉도 0K에서 발열부거리(L)가 0.2cm, 0.5cm인 코팅된 복수 발열부를 제작하여 기울기 변화에 따른 비등성능을 비교 분석하였다.

Fig. 9(a)의 $\theta=0^\circ$ 에서는 두 경우의 비등성능이 유사하였다. 이는 수평 상태에서는 기포가 수직 상승하여 이탈하기 때문에 발열부 간의 간섭영향이 없음을 알 수 있다.

Fig. 9(b)에서 $\theta=90^\circ$ 는 $\theta=0^\circ$ 와는 다른 경향을 보였다. 고열유속으로 갈수록 L=0.2cm가 L=0.5cm보다 비등성능이 우수하였고 상부 발열부[heater 2 (up)]와 하부 발열부[heater 1(below)]의 과열도 차이가 L=0.2cm에서 더욱 크게 나타났다. L=0.5cm에서는 하부 발열부로부터 생성된 기포들이 상부 발열부로 이동하면서 기포들 간의 결합과 성장으로 인해 L=0.2cm보다 상대적으로 많은 증기막이 형성되었다. 또한 발열부 간의 거리에 의한 원활치 못한 기포 스위핑은 전체적으로 L=0.2cm보다 낮은 비등성능을 초래하였다.

Fig. 9(c)의 $\theta=180^\circ$ 는 $\theta=90^\circ$ 와는 반대로 고열유속으로 갈수록 L=0.5cm가 L=0.2cm보다 비등성능

이 우수하였다. L=0.5cm, 0.2cm 모두 발열부 주위로 증기막이 형성되었지만 L=0.2cm에서는 각각의 발열부로부터 생성, 정체된 증기막이 서로 겹쳐져서 성장하게 되어 L=0.5cm일 때보다 발열부 주위의 기포분포밀도가 상대적으로 증가하여 낮은 비등성능을 나타내었다.

3.5 기판과 기판 간의 영향

기판과 기판 간의 거리에 따른 영향을 알아보기 위해서 과냉도 0K에서 발열부 간의 거리가 0.2cm인 코팅된 복수 발열부를 사용하여 기판거리(H)를 0.2cm, 0.5cm, 1.0cm로 변화시켜가면서 각 변수에 관한 비등성능을 비교 분석하였다.

Fig. 10은 기판을 수평($\theta=0^\circ$)상태로 유지하고 기판이 없는 경우(unrestricted heater)와 기판거리 H=0.2cm, 0.5cm, 1.0cm인 발열부에 대한 비등성능 그래프이다.

H=0.5cm, 1.0cm인 경우 기판이 없는 경우와 유사한 경향을 보여주었다. 이는 H=0.5cm, 1.0cm에서는 기판이 발열부의 표면에 직접적인 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 하지만 H=0.2cm인 경우 H=0.5cm, 1.0cm와는 다른 경향을 보이고 있다. 기판으로 인해 수직이탈하지 못한 기포들은 발열부 표면에 확산, 정체되면서 증기막을 형성하며 발열부의 액체접근을 차단하고 발열부의 온도를 급상승시킨다. 이는 저열유속에서도 임계열유속(CHF)상태에 쉽게 도달할 수 있음을 보여주고 있다.

Fig. 11은 기판거리 H=0.2cm일 때 $\theta=0^\circ$ 와

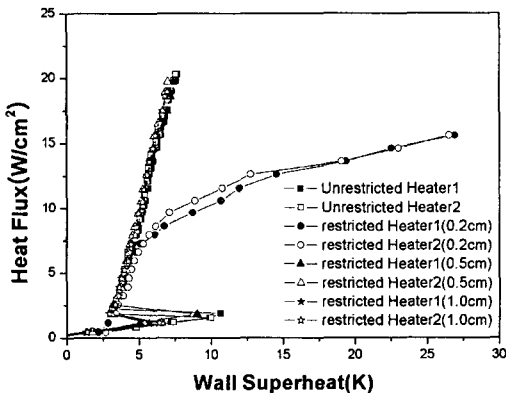


Fig. 10 Effect of substrate distance at $\theta=0^\circ$ (H=0.2cm, 0.5cm, 1.0cm)

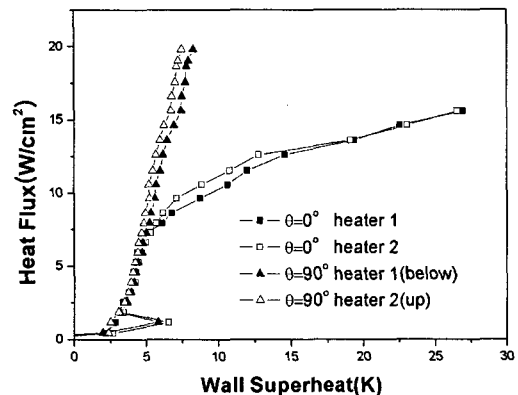
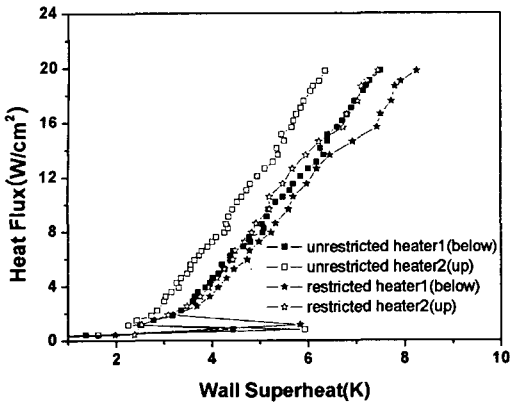
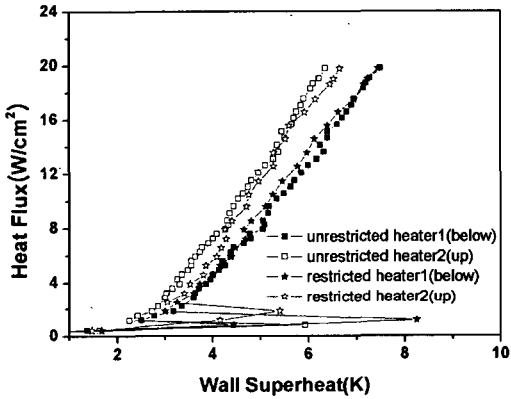


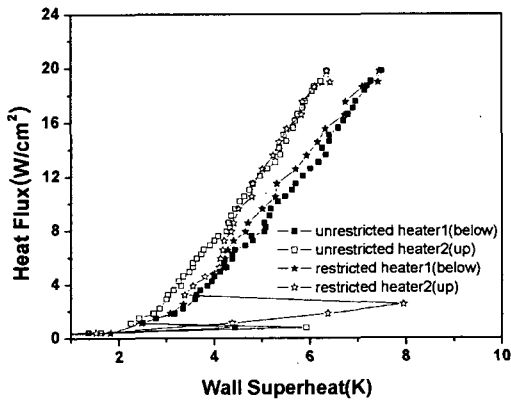
Fig. 11 Effect of substrate orientation for H=0.2cm ($\theta=0^\circ, \theta=90^\circ$)



(a) 0.2cm



(b) 0.5cm



(c) 1.0cm

Fig. 12 Effect of substrate distance at $\theta=90^\circ$
(H=0.2cm, 0.5cm, 1.0cm)

$\theta=90^\circ$ 의 비등성능을 비교한 그래프이다.

기판이 수평일 경우와 수직일 경우의 비등성능은 현저한 차이를 보였다. 기판이 수평일 경우에는 증기막의 단열효과에 의한 비등성능저하가 있었지만 기판이 수직일 경우에는 기울기의 영향으로 기포가 발열부 표면에 정체되지 않고 수직상승할 수 있어서 원활한 열전달을 하였다.

Fig. 12는 Fig. 10과 동일한 실험변수를 사용하여 기판을 수직($\theta=90^\circ$)상태로 유지한 후 실험한 결과 값이다. Fig. 12에서 상부발열부와 하부 발열부를 비교해보면 기판의 유무에 관계없이 상부 발열부가 비등성능이 우수하고 열유속이 증가할수록 상부와 하부의 과열도차가 점점 더 커짐을 알 수 있다. 하부 발열부로부터 발생된 기포가 기포 스위핑 작용으로 상부 발열부에 영향을 미치고 기포가 성장함에 따라 부력의 영향이 더욱 지배적이게 되어 열유속이 증가할수록 상부와 하부발열부의 온도차가 더 커짐을 알 수 있다.

Fig. 12(b), 12(c)에서 H=0.5cm, 1.0cm는 기판이 없는 경우와 유사한 경향을 보여주고 있다. $\theta=0^\circ$ 일 때와 마찬가지로 $\theta=90^\circ$ 에서도 H=0.5cm, 1.0cm에서는 기판이 발열부 표면에 직접적인 영향을 주지 않았다. 하지만 H=0.2cm인 경우[Fig. 12(a)] 기포의 이탈빈도가 증가하고 기포반경이 커짐에 따라 H=0.5cm, 1.0cm보다 기판과 기판사이의 기포밀도가 증가하게 되고 증기막이 기판주위로 확산되면서 주위액체로의 열전달이 수월하지 못했다.

4. 결론

본 연구에서는 단일 및 복수 발열부 표면에 대해서 과냉도, 설치각도, 발열부 간의 거리 및 기판 간의 거리에 따른 영향을 살펴보았으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 단일 발열부에서 과냉도가 증가함에 따라 기포가 과냉액체에 의한 냉각으로 응축 소멸되기 때문에 비등성능이 감소하였다.

(2) 코팅, 샌드페이퍼, 평표면의 성능비교 시 핵을 생성할 수 있는 공동의 수가 상대적으로 많은 코팅표면이 주위와의 열전달이 가장 좋았다.

(3) $\theta=45^\circ$ 와 $\theta=90^\circ$ 는 기포 스위핑 작용으로 $\theta=0^\circ$ 보다 비등성능이 우수한 반면 $\theta=135^\circ$ 와 $\theta=180^\circ$ 는

기포가 수직 이탈하지 못하고 발열부 표면에 정체됨으로 인해 $\theta=0^\circ$ 보다 비등성능이 저하되었다.

(4) 복수 발열부에서 $\theta=0^\circ$ 일 때 발열부 간의 간섭영향은 없었다. $\theta=90^\circ$ 일 때는 발열부 간의 거리가 더 좁은 $L=0.2\text{cm}$ 가 좋은 반면 $\theta=180^\circ$ 는 $D=0.5\text{cm}$ 일 때가 비등성능이 좋았다.

(5) $\theta=0^\circ$ 일 때 기관 간의 거리 $H=0.5\text{cm}$, 1.0cm 는 기관이 없는 경우와 유사한 비등성능을 보였다. 하지만 $H=0.2\text{cm}$ 에서는 기관의 영향으로 기포가 발열부 표면에 증기막을 형성, 발열부의 온도를 급상승시켜 비등성능이 저하되었다. $\theta=90^\circ$ 에서는 $\theta=0^\circ$ 와는 다르게 $H=0.2\text{cm}$ 에서도 큰 차이를 보이지 않았다.

후 기

본 연구는 2003~2004년도 한국과학재단[특정기초연구: R01-2002-000-00481-0(2003)]의 지원에 의해서 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Ferjancic, K. and Golobic, I., 2002, "Surface Effects on Pooling CHF," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 25, pp. 565~571.
- (2) Misle, M., Guglielmine, G. and Schenone, C., 2002, "Boiling of Saturated FC-72 on Square Pin Fin Arrays," *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 41, pp. 599~608.
- (3) Kim, C., Lee, K. J. and Kim, Y. C., 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) Shu-Rong, T., Hiroshi, T. and Hiroshi, H., 1998, "Experimental Study on the Immersion Cooling of an Upward-facing Multichip Module with an Opposing Condensing Surface," *Heat Transfer Japanese Research*, Vol. 27, No. 7, pp. 497~508.
- (5) Chang, J. Y. and You, S. M., 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.
- (6) Rainey, K. N. and You, S. M., 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.
- (7) Misale, M. and Bergles, A. E., 1997, "The Influence of Channel width on Natural Convection and Boiling Heat Transfer from Simulated Microelectronic Components," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 14, pp. 187~193.
- (8) O'Connor, J. P. and You, S. M., 1995, "A Painting Technique to Enhance Pool Boiling Heat Transfer in Saturated FC-72," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 117, pp. 387~393.
- (9) Howard, Alicia H. and Mudawar, Issam., 1999, "Orientation Effects on Pool Boiling Critical Heat Flux (CHF) and Modeling CHF for Near-vertical Surfaces," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 1665~1688.
- (10) Rainey, K. N., You, S. M. and Lee, S., 2002, "Effect of Pressure, Subcooling, and Dissolved Gas on Pool Boiling Heat Transfer from Micro-porous, Square Pin-finned Surfaces in FC-72," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 23~35.
- (11) Honda, H. and Wei, J. J., 2004, "Enhanced Boiling Heat Transfer from Electronic Components by Use of Surface Microstructures," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 28, pp. 159~169.