〈 논문 〉

마이크로휜 표면과 발열체 기울기에 따른 PF5060의 비등 열전달에 관한 실험적 연구

김윤호* · 김 충* · 이규정† · 김용찬**

(2005년 8월 8일 접수, 2005년 11월 30일 심사완료)

An Experimental Study on Boiling Heat Transfer of PF5060 on the Shape and Orientation of Micro-Fin Surfaces

Yoon-Ho Kim, Choong Kim, Kyu-Jung Lee and Youngchan Kim

Key Words: Boiling Heat Transfer(비등열전달), Micro-Fin(마이크로휜), Heater Surface Orientation (발열체 기울기), Subcooling(과냉도)

Abstract

Experiments to measure the pool boiling heat transfer on the micro-fin surfaces were performed with PF5060. The effects of various orientation and subcooling of heat surface on pool boiling performance were investigated under various heat-flux conditions for plain and micro-fin surfaces. The comparison between the results of this study and those of previous work shows a similar trend at the same conditions. From the results, it is proved that nucleate boiling performance is strongly dependent on the orientation, the micro-fin structure and the subcooling of heat surface. The heat flux on the surface with orientation angles of 45° and 90° was larger than that on horizontal surface($\theta = 0°$) at same wall superheat because of the effect of bubble sweeping. The nucleate boiling performance of micro-fin surfaces is enhanced by decreasing the fin size(W×L) and the pitch, respectively. The subcooling makes nucleate boiling performance lower for both micro-fin and plain surfaces.

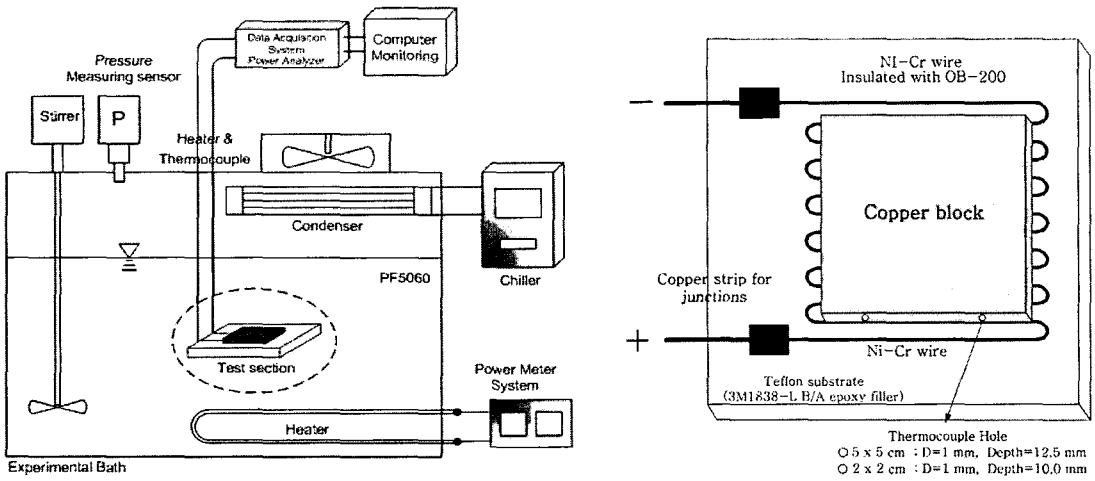
기호설명

q'' : 단위면적당 열유속 [W/cm^2]
ΔT_{sat} : 벽면 과열도(T_{wall}-T_{sat}) [°C]
ΔT_{sub} : 과냉도(T_{sat}-T_{bulk}) [°C]
T_{wall} : 발열체의 벽면온도 [°C]
T_{sat} : 유전성 액체의 포화온도 [°C]
T_{bulk} : 유전성 액체의 외부온도 [°C]
h : 열전달계수, q"/(T_{wall}-T_{sat}) [W/cm^{2}K]
θ : 수평으로부터의 표면 기울기 [°]
I : 전류(Ampere) [A]
V : 전압(Volts) [V]

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

1. 서 론

최근 전자통신 장비들은 고속 및 고밀도화 실장(Electronic packaging)을 통하여 시스템의 부피 및 비용을 줄이면서 시스템 성능의 극대화를 추구하고 있다. 특히 다칩모듈(Multi-chip module)은 전체적인 장비의 크기와 무게를 줄이면서 실장 내에서 칩들을 연결하여 통신장비의 신뢰성과 처리속도를 향상시키고 있다. 실장밀도의 증가에



(a) Experimental apparatus (b) Test section

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

따라 통신부품의 발열량 및 열유속은 점차 증가하고 있는 추세이다. 따라서 좁은 공간에서 발생된 고열유속의 열을 효과적으로 외부로 방열시킬 수 있는 기술의 개발이 요구된다. 기존의 고속 통신시스템은 고발열이 존재하는 부품 위에 공랭식의 히트싱크(Heat sink)를 부착하여 운전온도를 낮추고 있다. 최근 부품의 발열량 및 발열밀도의 증가로 인하여 공랭식 냉각방법은 고열유속 통신장비의 적용에 있어 한계에 직면했으며, 강제대류 공기냉각은 압력강하 및 소음발생의 문제점 등을 야기하고 있다. 반면, 액체 냉각방식은 공기냉각에 비하여 열전도도 및 Pr 수가 커서 대류열전달에서 유리하고, 밀도 및 비열이 크므로 열용량 측면에서도 장점을 가지고 있다. 액체 냉각방식 중 하나인 직접 액체냉각방식은 작동유체로 절연성과 화학적으로 안정된 FC(Fluorocarbon)계열의 냉각제를 사용하여 작동유체가 직접 칩을 접촉하면서 열을 흡수하는 방법이다. 따라서 발열부 표면의 열을 외부로 효과적으로 방열시키기 위해 비등 열전달 증가에 관한 연구들이 최근 들어 다양하게 진행되고 있다.

Corty and Foust[1]는 표면에 균일한 크기의 공동(Cavity)을 얻기 위해 사포를 사용하여 표면조도에 따라 과열도의 영향을 실험하였다. Guglielmine et al.[2]은 FC-72를 사용하여 구리 표면에 휜을 만들어 휜 길이와 폭을 변화시켜 압력에 따른 열전달계수와 열전달 성능을 평가하였다. 최근에는 표면에 금속분말을 코팅하여 핵생성 지점의 수를 증가시켜 비등열전달을 증가시키는 방법이 많은 관심을 받고 있다. Rainey and You[3]는 유전성 액체인 FC-72를 사용하고 다이아몬드 분말을 구리표면에 코팅하였을 때 히터사이즈(Heater size : 5 cm(W)×5cm(L), 2cm×2cm, 1cm×1cm)와 히터 기울기(Heater orientation, θ = 0°, 45°, 90°, 135°, 160°, 180°)에 따른 열전달성능 영향을 연구하였다. 열전달 성능은 히터사이즈가 작을수록 향상되고, 히터 기울기는 45° 와 90° 정도에서 열전달 성능이 우수하다고 평가되었고, 히터 기울기가 135° 이상에서는 임계열유속(CHF : Critical Heat Flux)이 낮아 열전달 성능이 좋지 않다는 결과를 제시하였다. Misale and Bergles[4]는 FC-72와 Galden HT-55를 사용하여 모래분사(sand blasted)를 통해 표면을 가공한 발열부의 판과 판사이의 폭(33mm, 2mm, 0.5mm)에 따른 비등 열전달현상에 대해서 연구하였다.

본 연구에서는 발열부 표면의 열을 외부로 효과적으로 방출시키기 위해 발열부 표면인 구리표면에 식각을 통한 마이크로휜을 제작하여 열전달 성능을 평가하였다. 마이크로휜은 높이가 50 μm로 일정하고 폭과 넓이가 100 μm~300 μm, 피치(Pitch)가 300 μm~700 μm인 4가지 종류의 마이크로 휜 표면을 식각하였다. 작동유체로는 유전성 액체인 PF5060을 이용하여 매끈한 구리표면과 마이크로 휜 표면의 벽면과열도와 열유속의

관계를 고찰하고 발열체의 기울기가 θ = 0°, 45°, 90° 일 때와 과냉도가 0°C, 5°C, 10°C, 15°C에서의 비등 열전달에 미치는 효과와 영향들을 살펴보고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 풀비등 직접 액체냉각 성능특성 실험을 위하여 실험수조를 구성하였다. 실험수조는 유동현상 관찰이 용이하도록 단열성이 좋고 투명성이 뛰어난 P/C(polycarbonate)로 제작하였다. Fig. 1의 (a)에서 실험수조의 크기는 35cm×31cm×33cm(W×L×H)의 크기로 제작하였고, 작동유체의 온도를 하단에 설치된 수중용 카트리지 히터(2kW급)와 항온조의 냉각수를 이용해 일정하게 조절할 수 있도록 구성하였다. 실험수조 상단에는 증발된 불응축 가스를 배출하고 증발된 작동유체를 응축시키기 위해 배출구와 응축기를 설치하였다. 실험수조의 외부는 단열재를 사용하여 단열함으로써 외부와의 열출입을 최소로 하였다. 작동유체의 온도는 4개의 T-type 열전대를 사용하여 측정된 온도의 평균값을 사용하였고, 실험수조의 압력은 압력게이지를 상부에 설치하여 측정하였다. Fig. 1의 (b)는 실험대상인 발열부를 나타낸 것이다. Teflon substrate (8cm×8cm×1cm) 위에 홈을 판 후 Ni-Cr wire(직경 0.45mm)를 설치하고 그 위에 Omega bond 200을 사용하여 구리블록을 접착한다. Teflon substrate에 열이 전달되지 않도록 구리블록 및 Ni-Cr wire 이외의 주위 공간에 에폭시(3M1838-L B/A)를 도포하였다. Omega bond 200은 다른 접착제에 비해 열전도성이 우수해 Ni-Cr wire에서 발열된 열을 구리로 원활하게 전달시키는 역할을 한다. 구리블록의 온도를 측정하기 위해 2개의 홀을 측면 가공하여 K-type 열전대를 삽입하였다. 열전대 삽입구은 5cm×5cm 구리블럭의 경우 직경 1mm, 깊이 12.5mm로 가공하였으며 2cm×2cm 경우는 직경 1mm, 깊이 10mm로 가공하였다.

마이크로휜 제작을 위하여 매끈한 구리블록에 필름 마스크를 제작하고 식각을 통하여 Fig. 2와 같은 마이크로휜 표면을 제작하였다. 마이크로휜 표면은 높이가 50 μm로 일정하게 하고, 폭(W)과 길이(L), 마이크로휜 중심 간의 길이인 피치를 변화시켜 총 4가지 경우를 제작하였다. 본 연구의 마이크로휜의 폭, 길이, 피치에 대한 주요 사양은 Table 1에 요약되어 있다. 작동유체는 유전성 액체로 화학적으로 안정하고 전기절연성이 있으며 인체에 무해한 환경친화적 냉매인 PF5060을 사용하였다. PF5060에 관련된 물성치는 Table 2에 나타내었다.

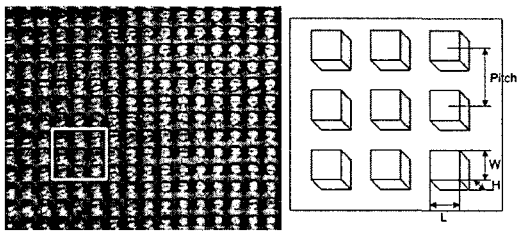


Fig. 2 Photograph and configuration of Micro-fin surface

Table 1 Sizes of Micro-Fin

	Width(W)	Length(L)	Height(H)	Pitch
Case 1	100 μm	100 μm	50 μm	300 μm
Case 2	200 μm	200 μm		500 μm
Case 3	250 μm	250 μm		600 μm
Case 4	300 μm	300 μm		700 μm

Table 2 Properties of PF5060

Classification	Value
Boiling point (1 atm)	1.68 °C
Density (25 °C)	12 g/cm^3
Surface tension (25 °C)	12 dyne/cm
Vapor pressure (-10°C)	58 Torr
Specific heat	1.05 kJ/kg·K
Thermal conductivity	0.057 W/m·K
Latent heat (Vapor)	29.67 kJ/mole
Liquid Kinematic viscosity	0.4×10^{-6} m^2/s

2.2 실험방법

실험대상인 발열부는 DC 전원 공급기를 이용하여 전압을 변화시켜 발열량을 조절하면서 실험을 수행하였다. 모든 실험은 카트리지 히터에 의해 작동유체의 온도가 포화온도 이상이 되도록 가열하여 증발된 불응축 가스를 완전 제거한 후 정상상태(Steady state)가 되도록 한 후 실험을 수행하였으며, 정상상태는 각각의 열전대의 온도변화가 0.2 K 이하일 때를 기준으로 하였다.

사용한 열유속, 열전달계수는 식 (1)과 같다.

$$q'' = IV/A = h\cdot(T_{wall}-T_{sat}) = h\cdot\Delta T_{sat}$$
$$h = \frac{q''}{(T_{wall}-T_{sat})} = \frac{q''}{\Delta T_{sat}} \quad (1)$$

여기서, q"는 단위면적당 열유속(W/cm^2)이며, I는 전류(Ampere), V는 전압(Volts), 그리고 A는 발열부 표면의 전열면적을 나타낸다. 열유속 및 열전달계수는 작동유체의 포화온도와 발열부내 열전대의 평균온도를 측정하여 계산된 벽면 과열도로 평가하였다.

발열부에 공급한 발열량은 Power meter system을 사용하여 측정하였고 모든 온도, 압력 및 전력에 대한 데이터는 Data acquisition system을 이용하여 저장하였다. 열유속은 DC 전원 공급기에 의해 단계적으로 전압을 올려가며 조정하였다. 이때 측정된 구리블럭의 온도차가 약 0.2 K 정도에서 균일하다고 판단되면 데이터를 저장한 후 전압을 올려 다음 실험을 수행하였다. 실험조건으로 사용된 과냉도는 작동유체의 온도와 포화온도의 차를 말한다.

Rainey and You[3]의 실험과 동일한 조건에서 본 실험을 수행하여 결과를 비교 검토하였다. 온도측정에 대한 불확실성은 ±0.4 K이고 발열부의 기울기 불확실성은 ±1°로 평가되었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 기존 연구결과 비교

Rainey and You[3]가 실험한 결과값과 동일 조건 하에서 비교하여 신뢰성을 확보하고자 하였다. 수평상태(θ=0°)에서 구리표면 면적이 4cm^2, 25cm^{2}인 매끈한 구리블럭 발열체를 이용하여 작동유체가 포화온도일 때 과열도에 따른 열유속을 Fig. 3에 나타내었다.

Rainey and You[3]가 수행한 실험 결과와 비교한 결과, 저과열도영역인 0~20K에서는 발열부가 25cm^{2}인 경우의 열유속이 약 1% 정도 증가하였고, 4cm^{2}에서는 약 3% 정도 증가하였다. 반면, 고과열도 영역인 20K 이상에서는 4cm^{2}와 25cm^2 발열부 모두, 약 16% 정도 높게 증가하였다. 이는 본 실험에서 사용된 발열체의 경우 표면이 연삭처리가 되어 표면거칠기가 Rainey and You[3]의 매끈한 구리표면보다 거칠다고 판단되어져 고과열도 영역에서 발열부의 기포생성에 유리한 조건을 주었으리라 판단되어진다. 전체적인 경향으로는 16% 이내의 오차로 유사한 경향을 잘 보이고 있어 본 실험의 신뢰성을 검증할 수 있었다. 또한, 발열부 크기에 의한 비능 성능 영향은 크지 않기 때문에 본 실험에서는 4cm^{2}의 발열체를 대해서만 평가를 수행하였다.

3.2 수평상태에서의 비등성능 특성

Fig. 4는 발열부 면적이 4cm^{2}인 마이크로휜 표면과 매끈한 구리표면에 대하여 벽면 과열도 변화에 따른 열유속을 나타내었다. 매끈한 구리표면의 비등성능이 마이크로휜 표면보다 월등히 떨어지고 마이크로휜 표면에서는 Case 1의 비등성능이 우수하였다. 비능 성능 차이는 열유속 12.5 W/cm^{2}에서 매끈한 구리표면보다 마이크로휜 표

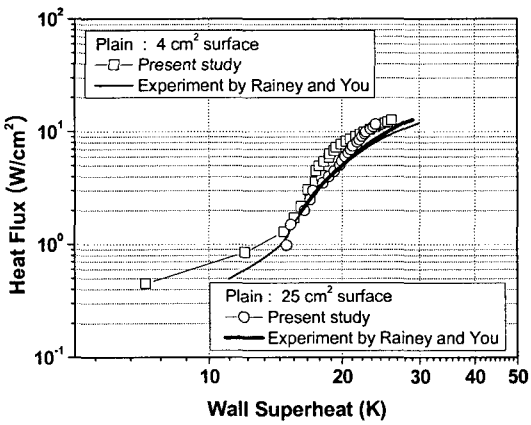


Fig. 3 Comparison between present experiment and Rainey and You's[3] (θ = 0°, Plain surface)

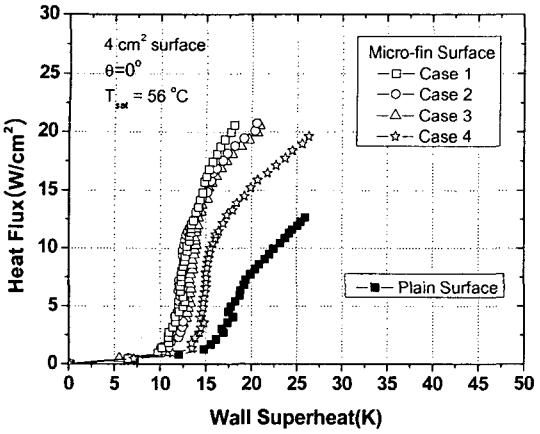


Fig. 4 Boiling curves on micro-fin and plain surfaces of 4cm^2 (θ = 0°)

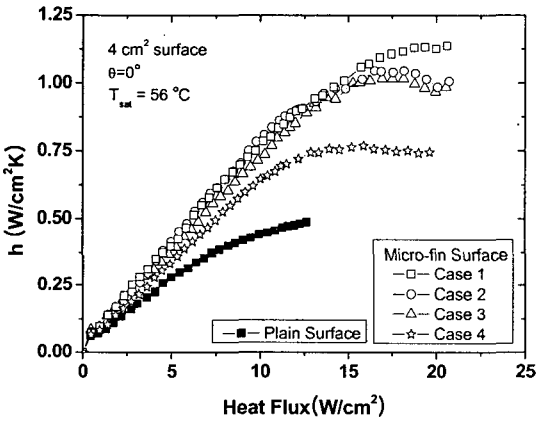


Fig. 5 Heat transfer coefficients versus heat flux for micro-fin surface and plain surface of 4 cm^2 surface (θ = 0°)

면의 Case 1이 47.3%, Case 2는 47%, Case 3은 45.3%, Case 4는 33%의 벽면 과열도 감소를 보였다. Fig. 5는 열유속에 따른 열전달계수 변화를 보여주고 있다. 비등 열전달계수는 열유속 12.5 W/cm^{2}을 기준으로 매끈한 구리표면보다 마이크로휜 Case 1 ~ Case 4에서 각각 85.6%, 82.7%, 82.7%, 52.6% 상승하였다. 마이크로휜이 매끈한 구리표면보다 벽면 과열도가 감소하고 비등 열전달 계수가 증가하는 이유는 두 가지 영향으로 판단할 수 있다. 첫째, 표면에 식각되어진 마이크로휜에 의해 발열부의 표면적이 매끈한 구리블럭의 표면적보다 훨씬 증가하여 전열면적의 증가로 인한 휜과 휜 사이의 골에서 초기 기포성장에 따른

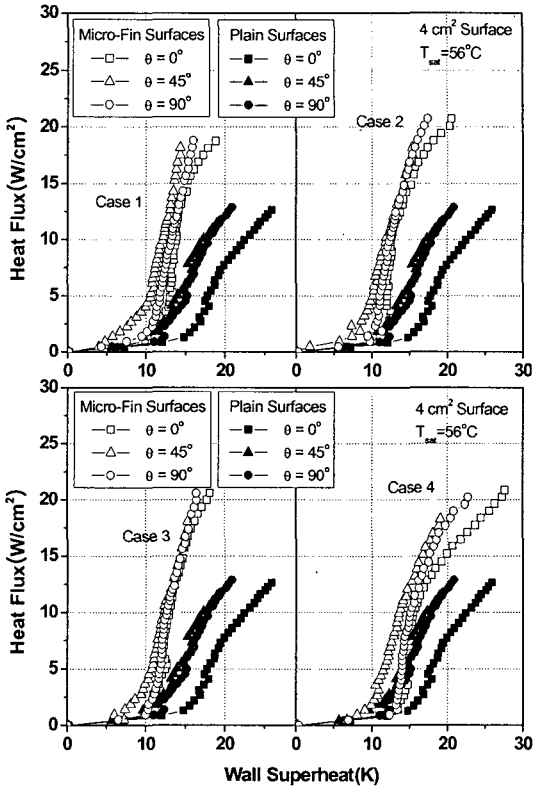


Fig. 6 Effect of surface orientation on the heat flux for plain and micro-fin surfaces of 4 cm^2

이상상태(2-phase state)의 대류열전달 증대효과와 둘째, 휜 사이의 골에서 작동유체의 증발빈도에 의한 비등열전달 증대 효과로 볼 수 있다. 마이크로휜의 Case 1의 경우는 폭과 넓이가 100 μm, 피치가 300 μm로 Case 2 ~ Case 4보다 식각되어진 휜의 크기가 작고 휜과 휜 사이의 골의 수가 많았다. 이로 인해 마이크로휜의 경우 기포의 발생밀도 및 기포 발생빈도가 증가하기 때문에 휜의 크기 및 골은 열전달 증가의 주요 메카니즘으로 판단할 수 있다.

3.3 발열체 기울기에 따른 비등성능 특성

포화온도의 작동유체 조건에서 수평상태(θ = 0°)와 기울기가 45°, 90°일 때 매끈한 구리블럭과 마이크로휜의 비등 성능특성을 Fig. 6에 나타내었고, Fig. 7에는 열유속에 따른 열전달계수를 나타내었다.

벽면 과열도에 따른 열유속은 기울기가 수평상태보다 45°, 90°에서 비등성능이 우수함을 보여주

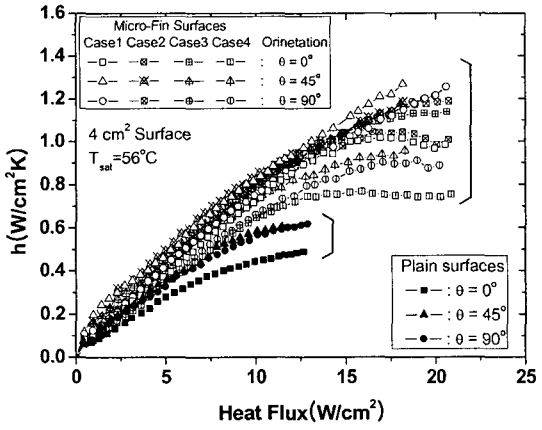


Fig. 7 Heat transfer coefficient as a function of heat flux for various levels of orientation

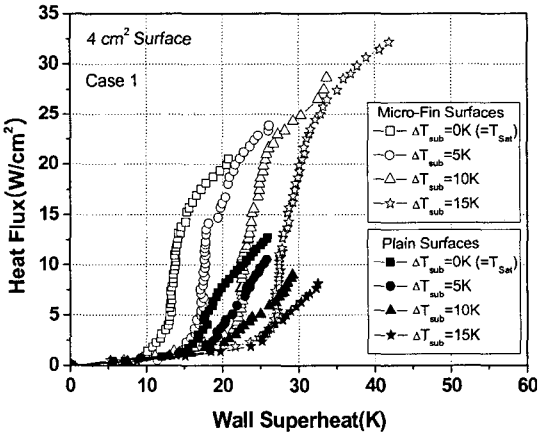


Fig. 8 Effect of subcooling on the heat flux for plain and micro-fin surfaces (Case 1)

었고 매끈한 구리표면보다 마이크로 휜 표면이 훨씬 우수한 성능을 나타내었다. 발열부 경사 시, 발열부 하부에 형성된 기포가 이탈되면서 발열부 상부에 성장하고 있는 기포를 쓸어 가는 스위핑(Sweeping) 현상이 발생하고, 이로 인해 기포의 이탈이 용이하게 되어 표면의 열을 효율적으로 제거할 수 있게 됨으로써 열유속이 증가하는 반면 벽면 과열도는 감소하게 된다. 기울기가 45°에서의 비능성능이 90°보다 우수하게 나타났거나 유사한 경향을 보이고 있다. 기울기 90°에서 45°보다 좋은 비능성능 효과를 보이지 못하는 이유는 기포의 발생빈도가 많아지면서 기포의 이탈 및 합체가 발열부 표면에서 활발히 이루어져 기

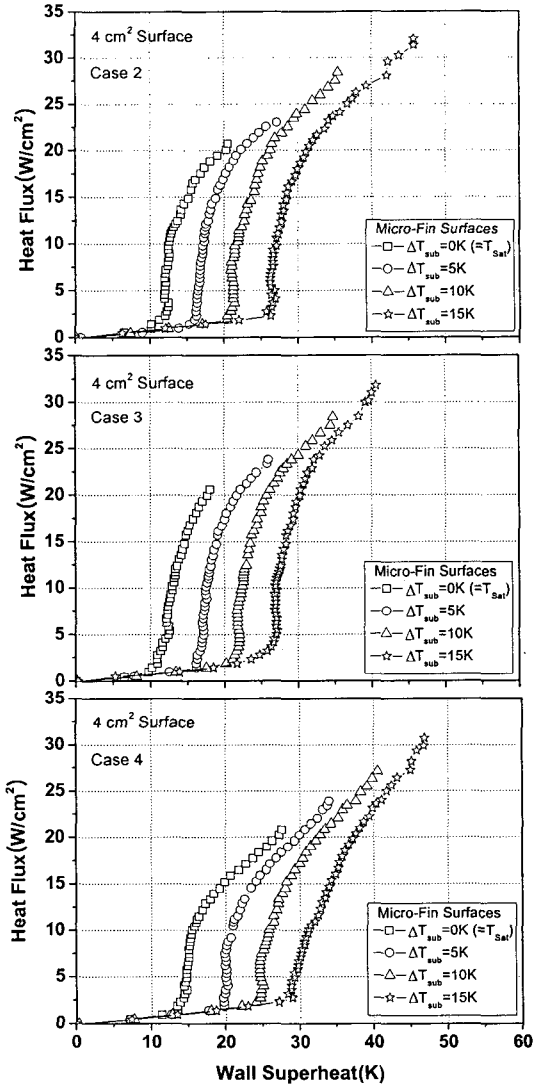


Fig. 9 Effect of subcooling on the heat flux for micro-fin surfaces (Case 2, Case 3 and Case 4)

포의 가둠(Trap), 즉 증기막을 형성하여 발열부 표면으로 주위 액체의 늦은 유입에 따라 열전달이 저하되기 때문이라 판단되어진다.[3]

3.4 과냉도에 따른 영향

Fig. 8은 작동유체의 과냉도가 0 ~ 15K (T_{bulk}= 56 ~ 41°C)일 때 벽면 과열도에 따른 열유속으로 마이크로휜 표면의 Case 1에 대하여 매끈한 구리 블럭과 비교하여 나타내었다. Fig. 9은 마이크로휜 표면의 Case 2 ~ Case 4에 대하여 과냉도에

의한 영향을 나타내었다. 전체적인 과냉도에 따른 벽면과열도 및 열유속을 비교한 결과 매끈한 구리표면보다 마이크로휜의 비등 성능이 향상되었고 마이크로휜 Case 1의 경우 Case 2, Case 3, Case 4보다 과냉도에 의한 비등 성능이 우수하게 나타났다. 또한, 매끈한 구리표면과 마이크로휜 표면은 모두 과냉도가 커짐에 따라 열유속의 기울기 증가가 크게 나타나지 않았다. 이는 과냉 조건에서 과냉도가 증가할수록 가열면에 국부적으로 생성된 기포가 과냉 액체에 의한 냉각으로 인하여 기포 성장에 방해가 되거나 응축되어 소멸되어지기 때문이다. 이로 인해 비등 열전달 현상은 지연되고 자연 대류에 의한 영향이 증가되어 액체로의 열전달률이 작아지기 때문에 벽면 과열도가 증가되어 비등곡선이 완만한 형태로 증가되어지고 있음을 알 수 있다. 과냉도가 증가할수록 표면에서 기포가 활발히 생성되지 못하므로 단상 자연 대류에 의한 열전달이 핵비등에 의한 열전달보다 크게 영향을 주는 것으로 판단되어진다.

4. 결 론

본 연구에서는 유전성 액체인 PF5060을 사용하여 매끈한 구리표면과 마이크로휜 표면에 대해 발열부 기울기가 0°, 45°, 90°와 과냉도 0 ~ 15K (T_{bulk}=56 ~ 41°C)에 따 비등성능의 영향을 살펴보았다.

(1) 과냉도가 0K이고 기울기가 수평인 경우 마이크로휜의 비등 열전달은 전열면적의 증가로 인해 매끈한 구리표면보다 비등 성능이 향상되었다. 12.5 W/cm^2 열유속에서 벽면 과열도는 Case 1, 2, 3, 4가 각각 47.3%, 47%, 45.3%, 33%정도 감소하였으며 열전달 계수는 매끈한 구리표면보다 85.6%, 82.7%, 82.7%, 52.6%정도 비등열전달 계수가 상승하였다.

(2) 포화상태에서 수평상태인 0°와 발열체 기울기가 45°, 90° 일 때의 비등 성능특성을 실험한 결과 0°보다 45°, 90°일 때 비등 성능이 우수하였으며, 45°가 기포 스위핑(Bubble sweeping)이 가장 크게 작용하였다. 발열체 기울기가 90°에서는 기포의 가둠, 즉 증기막 형성으로 인해 열전달이 기울기 45°보다 크지 않았다.

(3) 작동유체의 과냉도가 0 ~ 15K (T_{bulk}=56 ~ 41°C)일 때의 벽면 과열도에 따른 열유속에 대하여 모든 마이크로휜 표면의 경우 과냉도가 증가할수록 기포성장이 활발하지 않아 비등성능이 감소하였다.

(4) 마이크로휜 결과에서 마이크로휜에 의한 전열면적의 증가와 휜과 휜 사이의 골은 기포생성에 영향을 미쳐 열전달 향상의 주요 메카니즘임을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2002년도 한국과학재단(특정기초연구:R01-2002-000-00481-0) 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Corty, C. and Foust, A. S., 1953, "Surface Variables in Nucleate Boiling," *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.*, Vol. 51, No. 17, pp. 1~12.

(2) Gugliemini, G., Misale, M. and Schenone, C., 2002, "Boiling of Saturated FC-72 on Square Pin Fin Arrays," *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 41, No. 7, pp. 599~608.

(3) 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, No. 14, pp. 2589~2599.

(4) Misale, M. and Bergles, A. E., 1997, "The Influence of Channel Width on Natural Convection and Boiling Heat Transfer from Simulated Microelectronec Components," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 14, No. 2, pp. 187~193.

(5) Chang, J. Y. and You, S. M., 1997, "Boiling Heat Transfer Phenomena from Micro-Porous and Porous Surfaces in Saturated FC-72," *International Journal of Heat Mass transfer*, Vol. 40, No. 18, pp. 4437~4447.

(6) Rainey, K. N., You, S. M. and Lee, S., 2003, "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, No. 1, pp. 23~35.

(7) Incropera, F. P., Kerby, J. S., Moffatt, D. F. and Ramadhyani, S., 1986, "Convection Heat Transfer from Discrete Heat Sources in a Rectangular Channel," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 29, No. 7, pp. 1051~1058.

(8) 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.

(9) Kandlikar, S. G., Mizo, V. R. and Cartwright, M. D., 1997, "Bubble Nucleation and Growth Characteristics in Subcooled Flow Boiling," HTD-Vol. 342, *ASME Proceedings of the 32nd National Heat Transfer Conference*, Vol. 4, pp. 11~18.

(10) Rohsenow, W. M., 1985, Handbook of Heat Transfer, McGraw Hill Publishers, New York, N.Y.

(11) Webb, R. L., 1981, "The Evolution of Enhanced Surface Geometries for Nucleate Boiling," *Heat Transfer Engineering*, Vol. 2, No. 3~4, pp. 46~69.

(12) Kurihari, H. M. and Myers, J. E., 1960, "Effects of Superheat and Roughness on the Boiling Coefficients," *AIChE J.*, Vol. 6, No. 1, pp. 83~91.