

<응용논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.6.655

실리콘 표면 위에 소수성 점을 이용한 비등 열전달 증진에 관한 실험적 연구

조항진* · 김형모** · 안호선* · 강순호* · 김준원** · 신정섭*** · 김무환**†

* 포항공과대학교 기계공학부 이상유동연구실, ** 포항공과대학교 기계공학부 멤스 나노 기술 연구실, ***LG 전자 AC 연구소

Experimental Study of Pool Boiling for Enhancing the Boiling Heat Transfer by Hydrophobic Dots on Silicon Surface

Hang Jin Jo*, Hyungmo Kim**, Ho Seon Ahn*, Soonho Kang*, Joonwon Kim**, Jeong-Seob Shin*** and Moo Hwan Kim**†

* Dept. of Mechanical Engineering, POSTECH, Two Phase Flow Laboratory
** Dept. of Mechanical Engineering, POSTECH, MEMs & Nano Technology Laboratory
*** LG electronics, AC R&D Laboratory

(Received August 5, 2009 ; Revised March 26, 2010 ; Accepted March 29, 2010)

Key Words : Boiling Heat Transfer(비등열전달), Surface Modification(표면개질), Critical Heat Flux(임계열유속)

초록: 표면 젖음성은 비등 상황에서 주요 인자인 임계열유속과 비등열전달 모두에 영향을 미치는 중요한 표면인자이다. 지금까지 표면 젖음성을 이용한 비등 조건 개선에 대한 연구는 한가지 물질의 표면 구조를 개질하는데 국한되었다. 본 논문에서는 최적화된 비등 조건을 이룰 수 있는 표면 젖음성을 찾기 위한 연구의 일환으로 소수성 물질과 친수성 물질의 혼합을 시도하였다. 가열 표면은 표면 접촉각이 60° 인 친수성 표면 위에 표면 접촉각 120° 의 소수성 물질 점이 생기도록 개질되었다. 개질된 소수성 점은 마이크로 단위와 밀리 단위로 그 크기를 변화시켜 가며 풀 비등 성능을 평가하였다.

Abstract: Wettability is important to enhance not only CHF but also nucleate boiling heat transfer, as shown by the results of different kinds of boiling experiments. In this regard, an excellent boiling performance (a high CHF and heat transfer performance) could be achieved in the case of pool boiling by some favorable surface modifications that can satisfy the optimized wettability condition. To determine the optimized boiling condition, we design special heaters to examine how two materials, which have different wettabilities (e.g., hydrophilic and hydrophobic materials), affect the boiling phenomena. The special heaters have hydrophobic dots on a hydrophilic surface. The contact angle of the hydrophobic surface is 120° to water at the room temperature. The contact angle of the hydrophilic surface is 60° at same conditions. Experiments involving micro hydrophobic dots and two types of milli hydrophobic dots are performed, and the results are compared with a reference surface.

- 기호설명 -

q'' : 열 유속 (kW/m²)
 V_{heater} : 히터 양단의 전압(V)
 $I_{circuit}$: 히터-전력공급기를 연결한 회로 전류(A)
 A_{heater} : 히터 가열 면적(m²)
 $V_{reference}$: 기준저항 양단의 전압(V)

$R_{reference}$: 기준저항의 저항값(Ω)
 R_{heater} : 히터의 저항(Ω)
 V_{heater} : 히터 양단의 전압(V)
 I_{heater} : 히터에 흐르는 전류(A)(=I_{circuit})
 ΔT_{surf} : 히터의 온도와 상압 포화상태의 물 온도간의 차이(°C)
 T_{wall} : 벽면 온도(°C)
 Θ : 접촉각 (°)
 μl : 마이크로리터 (micro-liter)

† Corresponding Author, kpark@hoseo.edu

1. 서 론

비등현상을 이용한 열 전달 방식을 사용하는 많은 시스템에서 비등열전달과 임계열유속으로 대변되는 비등 운전 상황의 개선은 지난 수십년 동안 연구 되어 온 중요한 인자이다. 그 중 임계열유속은 시스템의 안전성과 효율성에 직접적으로 연관되어 있는 인자이다. 임계열유속에 이르면 열전달 효율이 급감하고 표면 온도는 급격하게 상승하여 시스템에 문제를 야기한다. 또 하나의 중요 인자인 비등열전달은 같은 운전 조건에서 낼 수 있는 효율성을 직접적으로 표현하는 인자이다. 그러기에 현재까지도 많은 연구자들이 비등열전달 및 임계열유속을 향상 시키고 지연시키기 위하여 다양한 물리화학적, 기계적 방식으로 접근을 하고 있다.

다양한 노력의 결과 풀 비등 상황은 표면 조건에 중대한 영향을 받는다는 실험 결과들이 보고되고 있다. 위의 주장을 뒷받침하는 연구 중의 하나의 예가 나노유체를 이용한 연구이다. 최근 활발한 연구가 진행되어온 나노유체를 작동유체로 활용하는 풀비등 실험은 놀라운 임계열유속 상승의 결과를 보고하였다. You 등은 산화알루미늄 나노입자를 이용하여 열전달의 변화는 없지만 임계열유속이 200%증진되는 것을 확인하였다.⁽¹⁾ Bang 역시 산화알루미늄 나노입자를 사용하였으며 비등열전달은 감소하나 임계열유속은 증진되는 것을 보였다.⁽²⁾ 또한 Kim and Kim 은 나노유체를 비등유체로 사용하면 비등현상에 의한 나노입자의 가열표면으로의 증착이 임계열유속을 증진한다는 것을 실험적으로 보였다.⁽³⁾ 이런 임계열유속 상승의 이유에 대한 연구가 진행된 바 나노유체 속의 나노입자들이 가열 표면의 조건을 변화시키기에 따라 임계열유속이 상승된다는 것이 증명되었으며 그 정확한 원리를 밝히기 위한 연구들이 진행되었다. Kim 등은 나노입자의 증착이 표면 접촉각 변화시킨다는 점을 측정을 통하여 증명 후 이 현상이 임계열유속을 증진한다고 주장하였다.⁽⁴⁾ Kim 등은 가열표면에 나노입자를 비등상황을 통하여 강제로 증착시킨 표면과 순수물의 비등 실험, 깨끗한 표면과 나노유체를 사용한 비등 실험 결과를 비교하며 나노입자 증착 표면이 임계열유속 증진의 이유임을 보였으며, 그 원리로는 접촉각 변화와 표면 거칠기 변화에 더하여 나노입자가 만든 구조에 의한 모세관력에 의한 물 수급 효과가 더해진다는 것을 wire heating method 를 통하여 보였다.^(5,6) 최근에 연구된 나노유체 실험뿐만 아니라 임계열유속

현상이 가열 표면조건 변화에 민감한 영향을 받는다는 것은 다양한 표면개질 기법을 통하여 입증되어왔다. Berenson 은 표면 물질과 거칠기, 청결도에 따른 비등성능 변화를 연구하였다.⁽⁷⁾ 또한 Messina and Park 의 경우 pit array 표면과 sanded 표면을 이용하여 표면의 변화가 임계열유속과 비등열전달 증진에 영향을 미치는 것을 실험적으로 확인하였다.⁽⁸⁾ Anderson and Mudawar 는 수직 구리관과 냉매 FC72 를 이용하여 가열표면의 거칠기와 인조공동이 비등현상에 미치는 효과에 대하여 연구를 진행하였다.⁽⁹⁾ Fong 등은 glass peening roughened 표면이 임계열유속 70%증진하는 것을 확인하였고 그 원인으로 표면의 접촉각과 거칠기의 변화를 지목하였다.⁽¹⁰⁾ 또한 Ferjancic and Golobic 은 표면 거칠기의 효과를 확인하기 위하여 사포와 화학적 에칭 반응을 이용하여 변화시킨 가열 표면이 임계열유속에 영향을 미치는 것을 보여주었다.⁽¹¹⁾ Liter and Kaviany 는 다공성물질을 표면에 코팅하는 기법을 활용하여 가열표면의 특성을 바꾸어 그 효과를 연구하였다. 그 결과 다공성물질의 비등 유도현상이 비등열전달을 증진시키며 수력학적 불안정성을 증진시켜 임계열유속도 증진시킨다는 주장을 하였다.⁽¹²⁾ Kim 등은 microporous coated 백금 wire heater 를 이용하여 microporous coating 에 의하여 변한 가열 표면의 특성에 의하여 발생하는 기포의 크기, 주기, 속도 등을 측정하여 비등현상에 미치는 효과에 대한 연구를 진행하였다.⁽¹³⁾ Rainey 등은 microporous 에 의한 비등현상 변화가 30-150kPa 범위에서 subcooling 0-50K 범위에서 어떤 영향을 미치는지에 대하여 실험을 진행하였다.⁽¹⁴⁾ 이와 같이 표면 거칠기를 변화시키는 방법, 마이크로 구조를 이용한 개질 기법, 다공성 물질을 코팅하는 기법 등을 통하여 가열 표면의 특성을 변화시킨 후 이에 따른 비등현상과의 관계에 대한 연구가 진행되어왔다.

위의 다양한 표면 개질 방법 중에서 표면 젖음성을 변화시키는 방법은 가장 강력한 효과로 지목되어왔다. 표면 산화 기법을 통하여 가열표면의 접촉각을 낮출수록 높은 임계열유속이 발생하는 것은 지난 여러 연구자에 의하여 보고되었다. Hahne and Diesselhorst 는 표면 산화 기법을 통하여 표면 접촉각을 낮추었고 이에 따른 임계열유속 증진을 보고하였다.⁽¹⁵⁾ Chowdhury and winterton 은 quenching 실험을 통하여 표면에너지 변화에 의한 표면 접촉각의 변화가 임계열유속 증진에 큰 영향을 미친다는 것을 확인하였다.⁽¹⁶⁾ Liaw and Dhir 은

산화기법과 코팅기법을 통하여 접촉각이 낮아질수록 임계열유속의 증진을 확인하였다.⁽¹⁷⁾ 이렇듯 표면 젖음성이 중요한 고려인자로 떠올라 Sefiane 등⁽¹⁸⁾과 Kandlikar⁽¹⁹⁾가 제안하는 새로운 임계열유속 예상 모델에 표면 접촉각을 주요 인자로써 설정하여 제안하고 있다.

이러한 표면 젖음성 변화는 임계열유속 뿐만 아니라 비등열전달에도 큰 영향력을 행사한다. 비등열전달에 직접적인 영향을 미치는 활성화 핵비등밀도가 표면 젖음성에 의해 영향을 받기 때문이다.⁽²⁰⁾

이렇듯 지금까지 연구된 관점에서 살펴볼 때 비등 현상의 효율성과 안전성에 직접적 영향을 미치는 임계열유속과 비등열전달을 표면개질 기법의 효과적인 이용을 통하여 두 가지 인자 모두 향상시킬 수 있는 것으로 생각된다. 이런 최적화된 비등현상을 유도할 수 있는 표면 설계를 위해서는 표면 젖음 성에 대한 새로운 시도와 이에 대한 기초연구가 선행되어야 한다. Takata 등의 경우 가열 표면 위에 새로운 표면 젖음성 조건을 제시하며 비등 현상의 개선을 시도 하였다.⁽²¹⁾ 기존의 연구들은 하나의 물질 조건에서의 실험이 주를 이루었으나 Takata 등은 상반된 표면 물질을 체크 무늬로 배치하며 그 효과에 대한 연구를 진행하였다. 하지만 초소수성물질과 구리 표면을 체크무늬로 배치하여 두 물질의 표면젖음성에서 상반되는 장점을 모두 살리려 했던 Takata 등의 실험은 두 가지 한계점을 가지고 있다. 먼저 초소수성물질과 구리표면 사이에 10 μ m의 높이 차가 있다. 마이크로 구조는 핵비등에 영향을 미친다는 연구는 기존 많은 연구가 증명하였다. 그렇기에 상반되는 표면젖음성을 살리기 위해 실행된 실험에 마이크로 구조의 효과를 배제하지 못한 실험이 되었다. 두 번째 한계점은 초소수성 물질의 크기가 모두 밀리 단위였다는 점이다. 핵비등에 영향을 주는 공동의 크기 단위가 마이크로 단위인 점을 고려한다면 이러한 밀리 단위의 접근은 한계가 있는 것으로 판단된다. 본 연구의 목적은 상반되는 표면젖음성을 가진 물질의 특성을 이용한 비등조건 개선에 있다. 기초적 연구를 위하여 마이크로 구조의 효과를 배제하며 핵비등에 영향을 미치는 마이크로 단위까지 연구 범위를 정하고 있다.

2. 풀비등 실험

2.1 실험장치

본 실험은 상압 풀비등 상황 하에서 순수물을 작

동유체로 사용하며 전력공급기를 통하여 전기를 직접 히터에 전달해주는 joule 가열 방식을 이용한다. 실험 풀은 8 각형으로 이루어져 있으며 12mm 두께의 알루미늄 커버로 이루어져 있다. 모든 방향에서 기포유동 관찰을 위하여 모든 면에 가시화 창이 설치되어 있다. 전체 풀의 높이는 165mm이며 8 각의 한변 길이는 87mm이다. 풀의 두께에는 물을 상압 포화상태를 만들기 위하여 이멀전 예열 히터와 풀에 담긴 물의 온도를 PID 제어를 위하여 K-type의 열전대, 그리고 상압을 유지해주며 증발된 물을 식혀주기 위한 reflux 응축기가 장착되어 있다. 전체 구성도는 Fig. 1을 통하여 확인할 수 있다.

팔각 풀 한가운데는 알루미늄 원통을 삽입할 수 있는 구멍이 있으며 이를 통하여 알루미늄 원통과 시편, 시편지지대의 삽입이 가능하다. 알루미늄 원통과 시편지지대는 고정을 위하여 나사로 연결되어 있다. 알루미늄 원통 높이는 45mm이며 지름은 80mm이다. 단열 및 지지 역할을 하는 시편 지지대의 재료는 PEEK(polyetheretherket-one, 열전도도: 0.25w/(K·m))이며 높이는 10mm 지름은 80mm이다. 알루미늄원통과 시편 지지대 사이 물의 누설을 막기 위하여 바이톤 오링(viton O-ring)이 사용되었다. 시편과 시편지지대간의 고정은 투명실리콘 고무(Permatex, Clear RTV Silicone)로 틈새를 채우고 2-tone epoxy(Duralco™, 4461-IP)를 이용하여 마감하였다. 이는 시편의 고정뿐만 아니라 가열 표면이 아닌 시편지지대와 시편간의 경계선 상에서의 비등현상을 막기 위함이기도 하다.

실험시편에 전기 공급은 전력공급기(HP Agilent 6575A DC power supply: 120V/18A)로부터 가열 표면 뒤에 초소형미세가공을 통하여 만든 Ti 히터에 선을 연결하여 직접 공급한다. 열유속에 대한 계산은 아래의 식을 통한다.

$$q'' = \frac{V_{heater} I_{circuit}}{A_{heater}} \quad (1)$$

V_{heater} 는 가열을 하는 히터의 양단에 걸리는 전압으로 Ti 히터에 연결된 선을 통하여 전압 값이 바로 측정된다. A_{heater} 는 10mm X 15mm로 150mm²이다. $I_{circuit}$ 의 경우 아래 식을 통하여 안다.

$$I_{circuit} = \frac{V_{reference}}{R_{reference}} \quad (2)$$

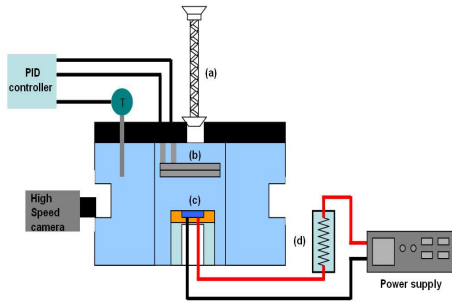


Fig. 1 Schematic diagram of pool boiling apparatus (a)reflux condenser (b)immersion heater (c)heating sample part and (d)constant temperature vessel and reference resistance

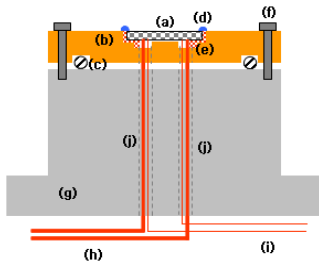


Fig. 2 Detail of the test sample and jig component: (a)test sample, (b)PEEK cover, (c)O-ring, (d)2-tone epoxy, (e)RTV Silicon, (f)bolts, (g)anodized aluminum base, (h)power supplying wires, (i)voltage measuring wires, (j)wire passage hole

$V_{reference}$ 는 일정한 저항으로 유지되도록 항온으로 유지되는 비커 속에 담긴 냉매 R-113 에 의해 항온으로 유지되는 기준저항 양단에 걸리는 전압이다. $R_{reference}$ 는 기준저항의 저항 값으로 본 실험에서는 1.022Ω 이다. 이러한 계산 과정을 통하여 실험에서의 열유속을 계산할 수 있다.

비등 곡선을 그리기 위하여 표면 온도의 측정이 필요하다. 이 과정은 저항과 온도간의 보정표 (calibration chart)를 이용하였다. 먼저 대류챔버 (convection chamber)의 온도를 100°C 에서 140°C 까지 바꾸어 가며 그 동안의 저항 값을 측정하여 놓는다. 그 후 온도와 저항간의 관계식을 도출한다. 이때 관계는 아래 식과 같이 1 차 선형 방정식으로 표현된다.

$$R_{heater} = aT_{heater} + b \quad (3)$$

즉 보정표를 이용하여 위 방정식의 a 값과 b 값을 각 실험 시편에 대하여 한다. 이렇게 결정한 a 값과 b 값 그리고 실험 중 측정된 히터의 저항을 통하여 가열 표면의 온도를 알 수 있다. 히터의 저

항은 아래 식을 통한다.

$$R_{heater} = \frac{V_{heater}}{I_{heater}} \quad (4)$$

이로써 가열 표면의 온도 및 열유속에 대한 정보를 얻게 된다.

2.2 불확실성 해석

표면 온도 및 열유속이 측정의 불확실성 해석은 Coleman and Steel(1999)⁽²²⁾의 기법에 기반을 두고 있다. 다음의 과정에 의해 수행되었다. 열유속은 식 (5)와 식 (6)을 종합하면 다음과 같은 식이 나온다.

$$q'' = \frac{V_{heater} \cdot V_{reference}}{R_{reference} \cdot A_{heater}} \quad (5)$$

즉 열유속은 다음 인자들의 함수로 표현된다.

$$q'' = q''(V_{heater}, V_{reference}, R_{reference}, A_{heater}) \quad (6)$$

가열 면적은 상수이므로 열유속의 불확실성은 나머지 세가지 인자에 의해 결정된다. 이를 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$U_{q''}^2 = \left(\frac{\partial q''}{\partial V_{heater}} \right)^2 U_{V_{heater}}^2 + \left(\frac{\partial q''}{\partial V_{reference}} \right)^2 U_{V_{reference}}^2 + \left(\frac{\partial q''}{\partial R_{reference}} \right)^2 U_{R_{reference}}^2 \quad (7)$$

$U_{q''}$, $U_{V_{heater}}$, $U_{V_{reference}}$, $U_{R_{reference}}$ 는 각기 V_{heater} , $V_{reference}$, and $R_{reference}$ 의 불확실성이다. 이제 일반형으로 표현하여 보면 아래와 같다.

$$\frac{U_{q''}^2}{q''^2} = \left(\frac{V_{heater}}{q''} \frac{\partial q''}{\partial V_{heater}} \right)^2 \frac{U_{V_{heater}}^2}{V_{heater}^2} + \left(\frac{V_{reference}}{q''} \frac{\partial q''}{\partial V_{reference}} \right)^2 \frac{U_{V_{reference}}^2}{V_{reference}^2} + \left(\frac{R_{reference}}{q''} \frac{\partial q''}{\partial R_{reference}} \right)^2 \frac{U_{R_{reference}}^2}{R_{reference}^2} \quad (8)$$

이번 경우 불확실성 배율인자가 모두 1 이므로 아래와 같이 간단히 표현 가능하다.

$$\frac{U_{q''}^2}{q''^2} = \frac{U_{V_{heater}}^2}{V_{heater}^2} + \frac{U_{V_{reference}}^2}{V_{reference}^2} + \frac{U_{R_{reference}}^2}{R_{reference}^2} \quad (9)$$

위의 방법을 통하여 표면 온도에 대한 불확실성 해석이 가능하다. 표면 온도와 물의 포화온도에 대해 식을 표현 하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \Delta T_{surface} &= \frac{1}{a}(R_{heater} - R_{sat}) \\ &= \frac{1}{a} \left(\frac{V_{heater} \cdot R_{reference}}{V_{reference}} - R_{sat} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

R_{sat} 은 포화온도일 때의 히터 저항값을 뜻하며 여기서는 상수가 된다. 온도에 대해 표현된 식 (10)을 앞에서 한 기법과 같이 불확실성에 대한 일반형식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{U_{T_{surface}}^2}{T_{surface}^2} = \frac{U_{V_{heater}}^2}{V_{heater}^2} + \frac{U_{V_{reference}}^2}{V_{reference}^2} + \frac{U_{R_{reference}}^2}{R_{reference}^2} \quad (11)$$

본 실험에서 활용된 비등 열전도율은 전체 열전달률을 기준으로 하였으며 newton's cooling law 에 따라 다음과 같이 정의된다.

$$h = \frac{q''}{T_{surface} - T_{sat}} \quad (12)$$

h 는 전체 열전달률을 의미하여 q'' 는 열유속, $T_{surface}$ 는 가열표면 온도, T_{sat} 는 작동유체의 포화온도를 의미한다. 이에 대한 불확실성 해석을 진행하기 위하여 전체 열전달의 종속 변수를 식으로 표시하면 아래와 같다. T_{sat} 는 변화가 거의 없기 때문에 상수로 가정한다.

$$\begin{aligned} h &= f(q'', \Delta T_{superheat}) \\ &= f(V_{heater}, V_{ref}, R_{ref}, V_{heater}, V_{ref}, R_{ref}) \end{aligned} \quad (13)$$

그러므로 전체 열전달의 불확실성에 대한 일

Table 1 Table of uncertainty analysis

q'' (kw/m ²)	100	300	500	700	900
$U_{q''}$ (kw/m ²)	1.00	3.00	5.00	7.00	9.00
$T_{surface}$ (°C)	100	110	120	130	140
$U_{T_{surface}}$ (°C)	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40
h (kw/m ² °C)	10	20	30	40	50
U_h (kw/m ² °C)	0.141	0.283	0.424	0.566	0.707

반형식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{U_h^2}{h^2} &= \frac{U_{V_{heater}}^2}{V_{heater}^2} + \frac{U_{V_{ref}}^2}{V_{ref}^2} + \frac{U_{R_{ref}}^2}{R_{ref}^2} \\ &+ \frac{U_{V_{heater}}^2}{V_{heater}^2} + \frac{U_{V_{ref}}^2}{V_{ref}^2} + \frac{U_{R_{ref}}^2}{R_{ref}^2} \end{aligned} \quad (14)$$

열전달은 위의 과정과 식을 통하여 계산된 불확실성은 기준저항의 오차에 상당히 민감하였으며 Table 1 에는 각 열유속 별, 온도 별, 열전달률 별 오차를 나타낸 표이다.

2.3 실험 시편

총 실험 시편은 4 가지 종류이다. 그 구성과 명칭은 아래와 같으며 그 정보는 Table 2 에 있다.

1. 기준이 되는 실리콘표면 시편(reference)
2. 마이크로 단위의 테프론 점이 찍혀 있으며 테프론 면적비가 0.9%인 시편(9_Micro)
3. 밀리 단위의 테프론 점이 찍혀 있으며 테프론 면적비가 0.8%인 시편(1_Milli)
4. 밀리 단위의 테프론 점이 찍혀 있으며 테프론 면적비가 5.4%인 시편(9_Milli)

모든 시편들은 먼저 뒷면은 실리콘표면이며 이의 뒷면에는 입력된 전기적 에너지에 의해 발열되는 Ti 가 히터의 역할로 존재하는 구조이다. 모든 과정은 초소형기계가공 공정을 통하여 이루어진다. 히터의 제작공정에 대한 언급은 참조논문에서 자세히 수록되어 있기에 생략하겠다.⁽²³⁾

순수한 실리콘 표면의 접촉각은 상온에서 58°도이다. 이 순수 실리콘 표면에 아래에 설명된 공정을 통하여 테프론으로 소수성 점을 만들게 된다. AF1600(Du Pont Polymers, Inc)은 FC40(3M Inc)이라는 용매에 녹도록 만들어진 특수 테프론이다. 그

Table 2 The Information of test samples

Type	9_Micro	1_Milli	9_Milli
Ra	12.04nm		
Average Diameter	445um	1.25mm	1.07mm
Area Ratio	0.9% =[1.4/150]	0.8% =[1.23/150]	5.4% =[8.09/150]
Number of dot	9	1	1
Pitch	>2mm	none	>1mm

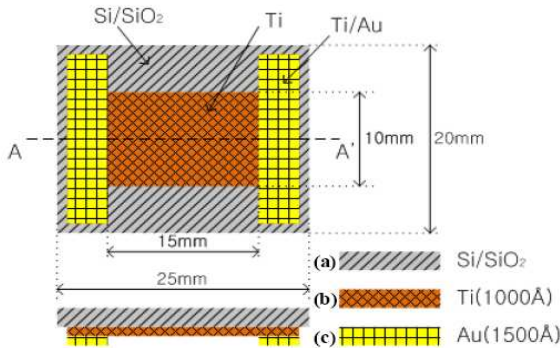


Fig. 3 The diagram of embedded heater : (a) Si substrate and native oxide layer, (b)Ti-embedded heating pad, (c)Au soldering space

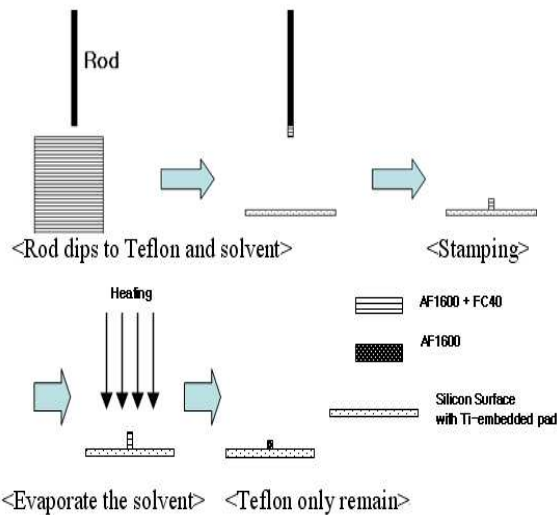


Fig. 4 The process makes the hydrophobic dot on silicon surface

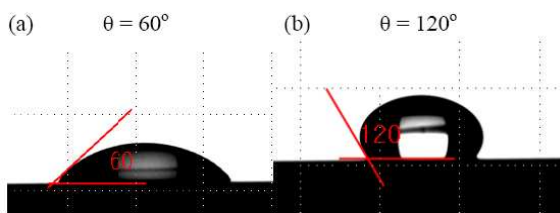


Fig. 5 Static Contact angle on (a)bare silicon (b)Teflon surface

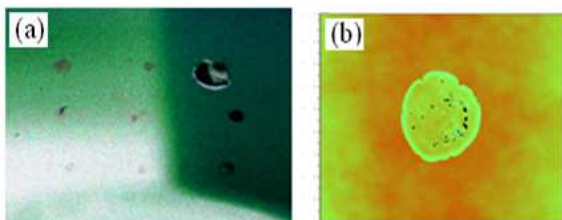


Fig. 6 The micro dots (a)picture with distilled water and (b) by 3D-profiler

리므로 AF1600 을 FC40 에 녹이면 액체상태의 테프론 용액이 완성된다. 이렇게 완성된 용액에 세라믹 원기둥을 담근다(Dipping method). 세라믹 기둥에 테프론이 묻어 나오게 되는데 이를 도장을 찍듯이 순수 실리콘 표면 위에 소수성 점을 찍는다(Stamping method). 그 후 FC40 의 끓는 점이 155°C 로 AF1600 보다 낮기 때문에 160 °C 까지 표면을 가열하면 FC40 은 증발하고 AF1600 만 표면에 남게 된다. 위 공정을 거쳐 바뀐 표면의 접촉각은 120°이다.

2.4 시편 표면 특성

순수한 실리콘 표면과 테프론이 코팅한 표면의 접촉각은 순수물 3μl 를 떨어뜨려 형성된 물 방울의 접촉각을 측정한 것이다. 접촉각 측정시 각 자료의 변화 정도는 3° 내외였다. 순수 실리콘은 60°, AF1600 으로 코팅된 표면은 120° 의 접촉각을 보였다. 시편 표면에 비등 현상 및 비등 열전달에 영향을 주는 마이크로 구조가 없다는 것을 확인하기 위하여 3D-profiler 를 이용하여 테프론 점을 측정하였다. 측정결과 표면 거칠기를 나타내는 인자인 거칠기 중심선 평균값(Ra)이 12.04nm 임을 확인하였다. 이로써 마이크로 구조에 의한 영향은 배제할 수 있다.

3. 실험 결과 및 토의

3.1 핵비등 시작점에서의 비등현상

모든 실험은 풀비등 상압 순수물을 작동유체로 실험하였으며 이멀전 예열히터로 3 시간 동안 포화상태를 유지하여 녹아있는 가스를 제거하는 과정(degassing procedure)을 거쳤다. Fig.7 과 Fig.8 은 고속카메라를 이용하여 핵 비등 시작점에서의 비등현상에 대하여 촬영한 것이다. 먼저 순수 실리콘 표면에서 기포가 생성되어 성장한다. 그 후 기포가 늘어나다가 표면에서 떨어져 나가는 현상이 관찰되었다. 이는 기존에 알려진 일반 표면에서의 기포거동현상(bubble dynamic phenomena) 연구결과와 일치한다. 하지만 테프론 소수성 표면에서의 비등 현상은 통상과는 다른 세가지 현상을 발견하였다.

먼저 기존의 vapor-trapped 이론으로는 설명이 불가능할 정도의 빠른 핵 비등 시작(Onset of Nulceate Boiling)이 발생하였다. 테프론 소수성 표면에서의 핵 비등 시작은 101~6°C 였다. 이는 순수 실리콘의 핵비등 시작이 110~5°C 였던 것에 비하면 비정상적으로 빠른 기포거동(bubble dynamic)

이다.

두 번째로 통상적 비등 현상과는 다른 기포거동은 기포가 생성되고 떠나갈 때까지 걸리는 주기 (bubble frequency)가 기준표면에 비해 길다. 실리콘 기준표면에서의 주기가 평균 16~8ms 임에 비하여 소수성 표면에서의 기포주기는 0.5~0.6s 로 20 배 이상 긴 준기를 보였다. 이러한 긴 주기는 빠른 핵 비등 시작에 따른 그 시점에서 공급되고 있는 열유속이 기준표면 핵 비등 시작에서의 열유속과 비교하였을 때 낮은 열유속이기 때문이다. 긴 주기 동안 기포가 자라는 현상을 살펴보면 기포가 자라는 과정 후 더 이상 자라지 않고 일정한 크기를 유지한 채 표면에 매달려 있다가 기포가 자라는 주기에 비하여 상대적으로 빠른 시간에 갑작스럽게 표면으로부터 기포가 떠나는 과정을 볼 수 있었다.

세 번째로 다른 점은 핵생성지점 및 발생한 기포 크기에 대한 점이다. 통상적으로 핵생성지점은 표면의 공동에 영향을 받기에 어느 곳이 될지 알기 어렵다. 하지만 소수성 점이 있는 시편의 경우 소수성 점이 핵생성지점이 된다. 그리고 생성된 기포의 크기 역시 소수성 점 크기에 직접적으로 연관되어 생성되었다. 이러한 현상에 대한 연구는 추가 연구를 통해 집중되어야 할 것으로 생각된다. 하지만 그 이전에 그 현상에 대해 추정하여본다면 소수성 물질은 상대적으로 기상과 친수성 물질은 액상과 함께 있을 때 그 화학적 안정성이 높기 때문에, 소수성 물질과 친수성 물질의 경계 혹은 소수성 물질면적에 의하여 발생하는 기포의 크기가 영향을 받은 것으로 추정된다.

3.2 소수성 점의 효과: 비등열전달

Fig. 9 는 각 실험 시편들의 비등열전달률을 표현한 곡선이다. 곡선을 살펴보면 소수성 점이 있는 시편들이 순수 실리콘 표면에 비해 비등열전달이 증가한 것을 확인할 수 있었다. 이는 단연 빠른 핵 비등 시작에 의한 효과라고 생각할 수 있다. 그 중 가장 많은 면적(가열면적의 5.4%)이 테프론에 의하여 밀리단위 점으로 덮인 9_Milli 시편이 비등열전달 면에서 가장 뛰어난 결과를 보였다.

이러한 결과는 소수성 물질이 덮는 면적이 높아 기포가 생성될 기회가 많았기 때문이기도 하며 각 점간 거리가 점의 지름에 3 배를 넘지 못하기에 각 점에서 생긴 기포들이 상호효과를 내었기 때문이라고 생각된다.⁽²⁴⁾ 그 외의 1_Milli 와 9_Micro 시편의 경우 소수성 물질이 표면을 덮는 면적비가

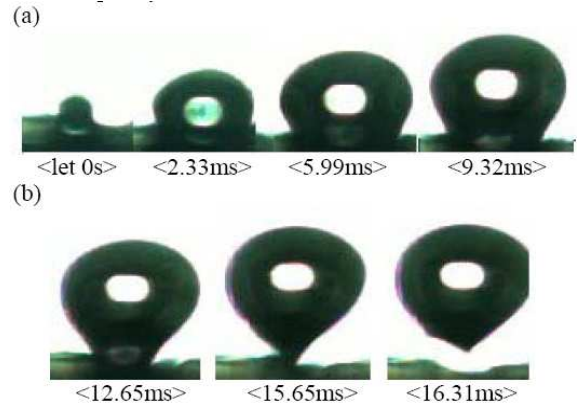


Fig. 7 (a)bubble growth and (b)elongated and departure on bare silicon surface

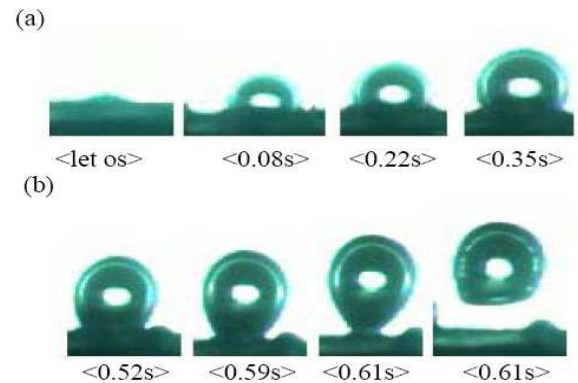


Fig. 8 (a)bubble growth and (b)saturated and sudden departure on the teflon milli dot

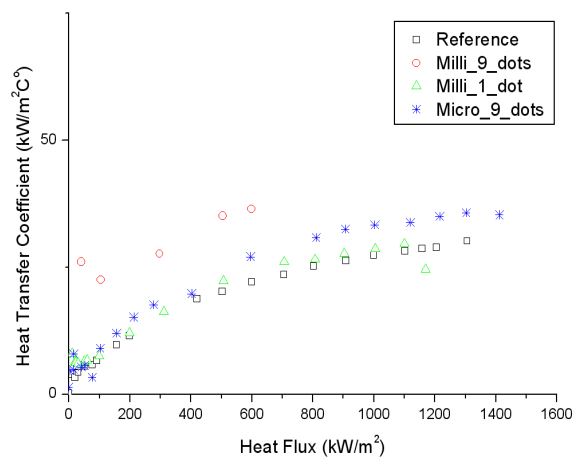


Fig. 9 Heat Transfer Coefficient

상대적으로 적어 비등열전달 증진정도가 9_Milli에 비하여 크지 않았다. 테프론이 가열표면을 덮은 면적(가열 면적의 0.8~ 0.9%)은 같지만 소수성 점의 크기가 달랐던 1_Milli 시편과 9_Micro의 비등열전달 능력을 비교하여 보면 9_Micro 시편이 더 뛰어난 효과를 보였다. 이러한 결과는 소수성

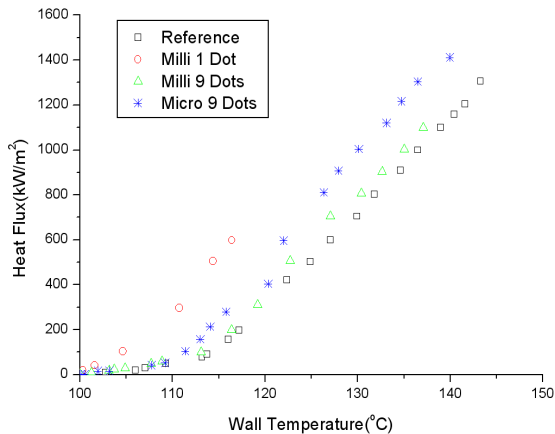


Fig. 10 Boiling Curve

물질이 기포를 생성하기에 좋은 조건 즉 위에서 언급된 3 가지 비등 현상 외에 밀리단위와 마이크로단위 사이에 어떠한 크기효과와 기포의 핵 비등 밀도의 증가가 비등열전달 증진에 영향을 미치는 사실을 추정할 수 있다.

1_Milli 시편의 경우 순수 실리콘과 비등 곡선에서 큰 차이가 보이지는 않는데 이는 핵 비등 시작은 빠르지만 9_Milli 에 비하여 소수성 물질의 면적이 적고 9_Micro 에 비해서는 핵 비등 밀도가 적어 열전달 증진이 크지 않았던 것으로 분석된다.

3.3 소수성 점의 효과: 임계열유속

기존 표면 젖음성과 임계열유속에 대한 연구를 살펴보면 낮은 접촉각을 보일수록 낮은 임계열유속이 보고되었다. 이러한 표면 젖음성에 따른 임계열유속 보고는 표면 전체의 젖음성이 똑 같은 가열 표면을 대상으로 한 실험결과이기에 본 실험과는 다른 조건이지만 그 경향은 이번 실험에서도 나타난다. Fig. 10 은 본 실험의 비등곡선이다. 9_Milli 시편의 경우 테프론이 표면을 덮는 면적이 높기 때문에 순수 실리콘 표면에 비해서는 확실히 낮은 임계열유속을 보여주고 있다. 1_Milli 시편 역시 임계열유속이 순수 실리콘 표면에 비해서는 낮은 것을 확인할 수 있다. 단 1_Milli 시편은 9_Milli 시편에 비해서는 소수성 물질의 면적이 적기 때문에 임계열유속이 낮아지는 정도는 덜하여 그 값은 9_Milli 와 기존 표면 사이에 위치한다. 이러한 결과는 표면의 소수성물질이 차지하는 면적의 비율이 임계열유속 결정에 영향을 미친다는 것을 추정하여 볼 수 있다.

이러한 기존 실험 결과들의 보고에 비추어 보았을 때 9_Micro 실험의 경우는 새로운 경향을 제시한다고 볼 수 있다. 9_Micro 소수성 면적과 기준

면적의 비율이 1_Milli 시편과 동일하다. 그러나 실험을 통하여 확인된 임계열유속 값은 1_Milli 시편의 임계열유속보다 높은 기준표면과 동일한 임계열유속을 보였다. 이는 마이크로 사이즈의 소수성 점이 임계열유속에 영향을 미치지 않았다는 결과이다. 이러한 현상은 기존 보고된 바 없기에 이에 대한 이유와 원리를 설명하기 위해서는 좀더 정확한 소수성 패턴을 만들 수 있는 발전된 기법과 여러 기초 실험의 제안과 수행이 우선되어야 한다고 판단하였다. 이에 따라 앞으로의 추가 연구를 통하여 발전된 기법 제안과 임계열유속에 대한 분석 연구를 진행할 예정이다.

4. 결론

본 연구를 통하여 소수성 물질과 친수성 물질이라는 상반되는 표면 젖음 특성을 가지는 물질을 마이크로 구조 없이 가열 표면 위에 올림으로써 상반된 표면 젖음 특성이 비등현상이 미치는 효과에 대해서 연구할 수 있었다.

이러한 연구를 통하여 지금까지 알려지지 않았던 소수성 점에서 기포 거동에 대해 알아보았다. 기포 거동은 크게 3가지로 구분할 수 있었다.

1. 빠른 핵 비등 시작
2. 느린 기포 성장 주기와 기존 기포와는 다른 성장 단계
3. 핵 생성 지점은 언제나 소수성 점이며 생성된 기포의 크기는 소수성 점의 크기에 지배

이러한 기포 거동을 바탕으로 비등상황에서의 열전달 성능과 임계열유속에 미치는 효과를 연구하였다. 그 결과 비등열전달 면에서 소수성 점은 긍정적 효과를 한다. 그 증진 정도는 소수성 물질의 면적, 생성된 기포들의 상호작용, 밀리단위와 마이크로단위 사이의 크기 효과 등에 의한 것으로 볼 수 있다.

임계열유속 면에서 소수성 점은 부정적 효과를 미쳤다. 소수성 물질의 면적이 넓으면 넓을수록 임계열유속이 낮아지는 것이 밀리단위의 소수성 점의 실험을 통하여 확인할 수 있었다. 그러나 소수성 점의 크기가 마이크로로 갈 경우 임계열유속 변화에 대한 연구는 추가 연구가 필요한 상황이다.

후 기

본 연구는 한국원자력연구소(KAERI)의 지원을 받아 이루어졌습니다

참고문헌

- (1) You, S.M. and Kim, J.H., 2003, "Effect of Nanoparticles on Critical Heat Flux of Water in Pool Boiling Heat Transfer," *Applied Physics Letters*, Vol. 83, pp. 3374~3376.
- (2) Bang, I.C. and Chang, S.H., 2005, "Boiling Heat Transfer Performance and Phenomena of Al₂O₃-Water Nano-Fluids from a Plain Surface in a Pool," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 2407~2419.
- (3) Kim, H.D. and Kim, M.H., 2007, "Experimental Study on the Role of Nanoparticle Deposition in Pool Boiling CHF Enhancement Using Nanofluids," *Trans. of the KSME(B)*, pp. 1018~1023.
- (4) Kim, S.J., Bang, I.C., Buongiorno, J. and Hu, L.W., 2006, "Effects of Nanoparticle Deposition on Surface Wettability Influencing Boiling Heat Transfer in Nanofluids," *Applied Physics Letters*, Vol. 89, 153107.
- (5) Kim, H.D., Kim, J. and Kim, M.H., 2006, "Effect of Nanoparticles on CHF Enhancement in Pool Boiling of Nano-Fluids," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 5070~5074.
- (6) Kim, H.D. and Kim, M.H., 2007, "Effect of Nanoparticle Deposition on Capillary Wicking that Influences the Critical Heat Flux in Nanofluids," *Applied physics letters*, Vol. 91, 014104.
- (7) Berenson, P.J., 1962, "Experiments on Pool-Boiling Heat Transfer," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 5, pp. 985~999.
- (8) Messina, A.D. and Jr. Park, E.L., 1981, "Effects of Precise Arrays of Pits on Nucleate Boiling," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 24, pp. 141~145.
- (9) Anderson, T.M. and Mudawar, I., 1989, "Microelectronic Cooling by Enhanced Pool Boiling of a Dielectric Fluorocarbon Liquid," *J. Heat Transfer*, Vol. 111, pp.752~759.
- (10) Fong, R.W.L., McRae, G.A., Coleman, C.E., Nitheanandan, T. and Sanderson, D.B., 2001, "Correlation Between the Critical Heat Flux and the Fractal Surface Roughness of Zirconium Alloy Tubes," *Enhanced Heat Transfer*, Vol. 8, pp. 137~146.
- (11) Ferjancic, K. and Golobic, I., 2002, "Surface Effects on Pool Boiling CHF," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 25, pp. 565~571.
- (12) Liter, S.G. and Kaviani, M., 2001, "Pool-Boiling CHF Enhancement by Modulated Porous-Layer Coating: Theory and Experiment," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 4287~4311.
- (13) Kim, J.H., Rainey, K.N., You, S.M. and Park, J.Y., 2003, "Mechanism of Nucleate Boiling Heat Transfer Enhancement from Microporous Surfaces in Saturated FC-72," *J. Heat Transfer*, Vol. 124, pp. 500~506.
- (14) Rainey, D.B., You, S.M. and Lee, S., 2003, "Effect of Pressure, Subcooling, and Dissolved Gas on Pool Boiling Heat Transfer from Microporous Surfaces in FC-72," *J. Heat Transfer*, Vol. 125, pp. 75~83.
- (15) Hahne, E. and Diesselhorst, D., 1978, "Hydrodynamic and Surface Effects on the Peak Heat Flux in Pool Boiling," *Proceedings of the 6th International Heat Transfer Conference*, Vol. 1, pp. 209~214.
- (16) Chowdhury, S.K.R. and Winterton, R.H., 1985, "Surface Effects in Pool Boiling," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 28, pp. 1881~1889.
- (17) Liaw, S.P. and Dhir, V.K., 1986, "Effect of Surface Wettability on Transition Boiling Heat Transfer from a Vertical Surface," *Proceedings of the 8th International Heat Transfer Conference*, Vol. 4, pp. 2031~2036.
- (18) Sefiane, K., Benielli, D. and Steinchen, A., 1998, "A New Mechanism for Pool Boiling Crisis, Recoil Instability and Contact Angle Influence," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 142, pp. 361~373.
- (19) Kandlikar, S.G., 2001, "A Theoretical Model to Predict Pool Boiling CHF Incorporating Effects of Contact Angle and Orientation," *J. Heat Transfer*, Vol. 123, pp. 1071~10796.
- (20) Hibiki, T. and Ishii, M., 2003, "Active Nucleation Site Density in Boiling Systems," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 2587~2601.
- (21) Takata, Y., Hidaka, S. and Kohno, M., 2006, "Enhanced Nucleate Boiling by Superhydrophobic Coating with Checkered and Spotted Patterns," *International Conference on Boiling Heat Transfer*.
- (22) Coleman, H. W. and Steele, W. G., 1999, "*Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers 2nd Edition*," John Wiley & Sons, Inc.
- (23) Kim, S., Kim, H., Kim, H.D., Ahn, H.S., Kim, M.H., Kim, J., and Park, G.C., 2008, "Experimental Investigation of Critical Heat Flux Enhancement by Micro/Nanoscale Surface Modification in Pool Boiling," *Proceedings of the 6th International ASME Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels*.
- (24) Zhang, L. and Shoji, M., 2003, "Nucleation Site Interaction in Pool Boiling Artificial Surface," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 26, pp. 513~522.