

마이크로 히터에서의 기포성장과 온도변화에 관한 실험적 연구

고승현·김호영*†·김신규*·장영수*·이운표*·김용찬**

An Experimental Study on Bubble Growth and Temperature Change on Microheater

Seung-Hyun Ko, Ho-Young Kim*†, Shin Kyu Kim*, Young Soo Chang*,
Yoon Pyo Lee*, Yongchan Kim**

Key Words: Microheater(마이크로히터), Temperature drop(온도 감소), Frequency(기포생성주기),
Contact diameter(접촉지름)

Abstract

Bubble growth on microheater has been experimentally investigated in this study. The experiment was performed using platinum microheaters having dimensions of 300 μm or 50 μm in length, 20 μm or 5 μm in width, and $0.2 \pm 0.01 \mu\text{m}$ in thickness. A high speed video camera was used to observe bubble growth at 2,000 frames per second. Microheater temperature was measured at the rate of 300 Hz with a data acquisition system. Bubble nucleation frequency increased with working fluid temperature. Although the slope of temperature drop was similar in all cases, the magnitude of temperature drop was different. The temperature profiles and the high speed camera images were combined to explain temperature drop.

기호설명

Q_h : 마이크로 히터에 공급되는 열량(mW)

R_h : 마이크로 히터 저항(ohm)

I_h : 마이크로 히터에 공급되는 전류(mA)

T_h : 마이크로 히터 평균 표면 온도($^{\circ}\text{C}$)

T_{∞} : 작동유체의 온도($^{\circ}\text{C}$)

D_c : 접촉지름(μm)

1. 서 론

반도체 칩 가공 기술의 발전으로 작은 크기의

센서 및 구조물을 제작하는 MEMS 기술도 발전하기 시작하였다. 이러한 MEMS 기술은 버블젯 프린터와 자동차에서의 가속도계의 상업적인 성공으로 이어졌다. 비등현상을 이용하여 구동시키는 버블젯 프린터로 인하여 마이크로 선형 히터에서의 연구가 활발히 이루어졌다. Lin 등은 폴리실리콘 마이크로 선형 히터에서 마이크로 크기의 기포 형성과 매크로 크기의 기포 형성에 대하여 비교, 보고하였다.⁽¹⁾ Kwak 등은 정전압과 펄스전압을 히터에 보내서 마이크로 선형히터에서의 온도 측정과 기포 형성 온도에 대해서 보고하였다.⁽²⁾ Lin 등은 기포에 의해 작동되는 펌프를 이용하여 마이크로 채널내의 가스를 필터링하는 실험을 하였다.⁽³⁾ Lin 등은 마이크로 크기의 기포 성장시 히터 표면에서의 온도변화에 대해서 연구, 보고하였다.⁽⁴⁾ 위의 연구에서처럼 마이크로 크기의 상변화는 미소 채널 내에서의 유동제어 및 마

† 한국과학기술연구원 열·유동제어연구센터
E-mail : hoyoung@kist.re.kr

TEL : (02)958-5673 FAX : (02)958-6709
고려대학교 기계공학과 대학원

* 한국과학기술연구원 열·유동제어연구센터

** 고려대학교 기계공학과

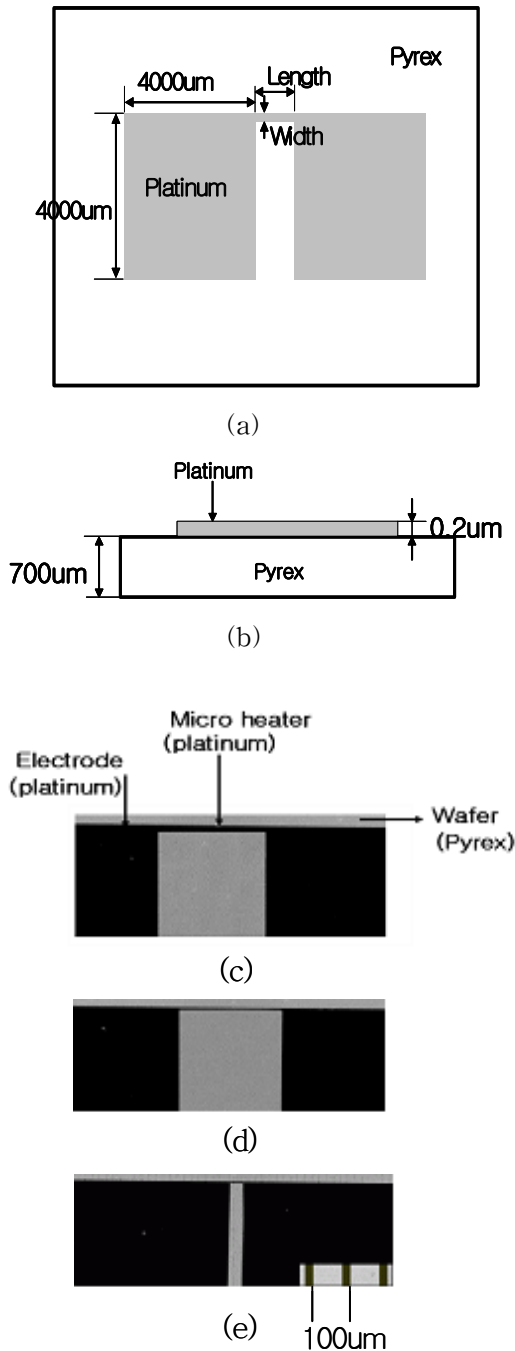


Fig. 1 Platinum micro heater : (a) Top view ; (b) Side view ; (c) Micrograph top view of the platinum micro heater, length \times width = $300 \times 20 \mu\text{m}^2$; (d) length \times width = $300 \times 5 \mu\text{m}^2$; (e) length \times width = $50 \times 5 \mu\text{m}^2$

이크로 크기의 동력원을 작동 시키는데 중요한 메커니즘이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 두께 0.7 mm인 유리(Pyrex)웨이퍼에 $50 \times 5 \times 0.2 \mu\text{m}^3$, $300 \times 5 \times 0.2 \mu\text{m}^3$, $300 \times 20 \times 0.2 \mu\text{m}^3$ 의 마이크

로 히터를 MEMS 공정인 광학 석판 과정 (Photolithography)과 금속 증착 과정(E-beam Evaporation)를 이용, 제작하였다. 작동유체로는 절연 액체인 FC-72을 사용 하였다. 실험용 테프론 용기내에 골드 필름 히터를 이용하여 작동유체의 온도를 조절 하였다. DC power supply를 이용하여 정전류를 히터에 보냈고 마이크로 기포의 생성과 성장을 고속 카메라를 이용하여 초당 2000 frames 이미지를 획득 하여 가시화 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 마이크로 히터

Fig. 1은 MEMS 공정에 의하여 만들어진 0.7mm 두께를 가지는 유리웨이퍼 위의 백금 마이크로 히터를 보여주고 있다. 각각 히터의 크기는 길이 \times 너비가 $300 \times 20 \mu\text{m}^2$, $300 \times 5 \mu\text{m}^2$, $50 \times 5 \mu\text{m}^2$ 이며 두께는 모두 $0.2 \pm 0.01 \mu\text{m}$ 이다. 전극 패드의 크기는 $4000 \times 4000 \mu\text{m}^2$ 으로 제작하였다. 본 실험을 위하여 $100 \times 100 \times 50 \text{mm}^3$ 크기의 실험용 테프론 용기를 Fig. 2 와 같이 제작하였고 유동 가시화를 위해 투명 아크릴을 이용하여 전면에 부착하였다. 작동유체는 절연성 액체인 FC-72를 이용 하였으며 테프론 용기내에 골드 필름 히터를 부착 하여 작동유체의 온도를 일정하게 유지하였다. FC-72의 대기압에서 비등온도는 56°C 이다. 백금의 저항-온도 관계식은 아래 식 (2.1)와 같이 주어진다.⁽²⁾ 백금의 열-저항 계수(ξ)는 박막(thin film) 증착 조건에 따라 달라진다. 열-저항 계수는 본 연구에 앞서 실험 대상에 대하여 오븐 에서 실험 샘플과 계측기를 이용하여 보정실험을 한 결과 $0.0033(\text{K}^{-1})$ 결과를 얻을 수 있었다. 전극으로서 마이크로 포지셔너에 구리 프로브를 고정시켜 히터의 패드와 밀착시켰다. 마이크로 히터 R_h 는 Fig. 3과 같은 Wheatstone 브리지 회로에 연결하여 정전류를 공급하였다.

$$R_h = R_0 [1 + \xi (T_h - T_\infty)] \quad (2.1)$$

2.2 실험계측장치

본 연구에서는 기존의 연구에서 사용한 Wheatstone 브리지 회로를 이용하여 마이크로 히

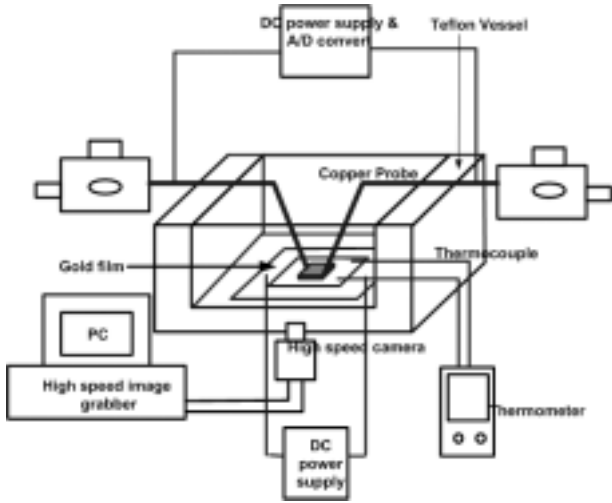


Fig. 2 Experimental setup of the micro bubble generator using micro heater

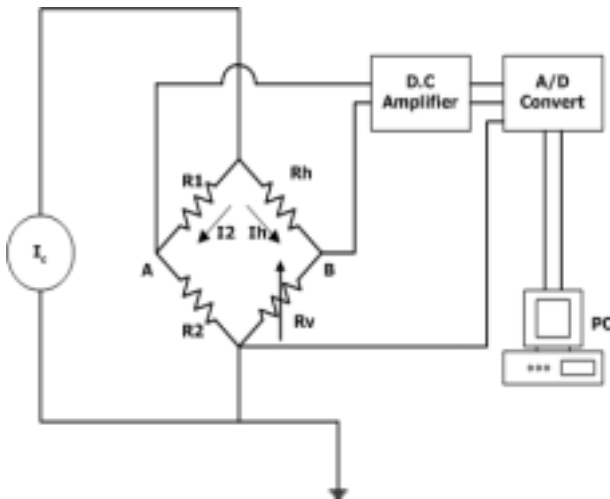


Fig. 3 Schematic of Wheatstone bridge circuit

터의 온도를 측정하였다.^{(2),(5)} 마이크로 히터의 저항은 Fig. 3에서 R_h 로 표시되어 있다. 히터에 전류를 공급하면, 히터의 온도가 올라감에 따라 저항이 증가하고 Wheatstone 브리지 회로에 전압차 $V_A - V_B$ 가 발생하게 된다. Wheatstone 브리지 회로의 양단간의 전압차를 증폭기와 A/D convert를 통해 나온 증폭 신호로서 300 Hz sampling time으로 측정하였다. 이 양단간의 전압차와 히터의 저항은 식 (2.2)와 같이 된다.

$$R_h = \frac{R_1 R_v I + (R_1 + R_2 + R_v) \times (V_A - V_B)}{R_v I - (V_A - V_B)} \quad (2.2)$$

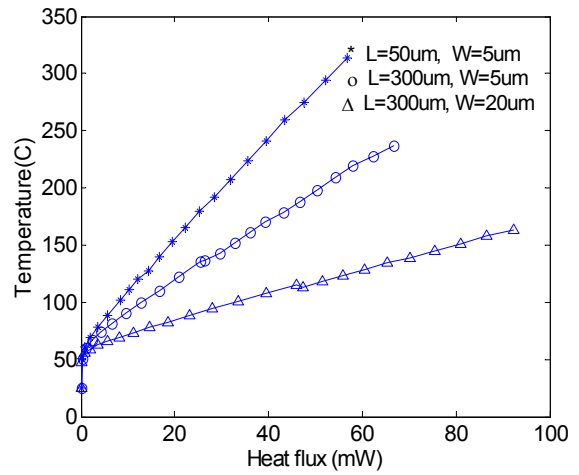


Fig. 4 Temperature of micro-heater versus heat flux

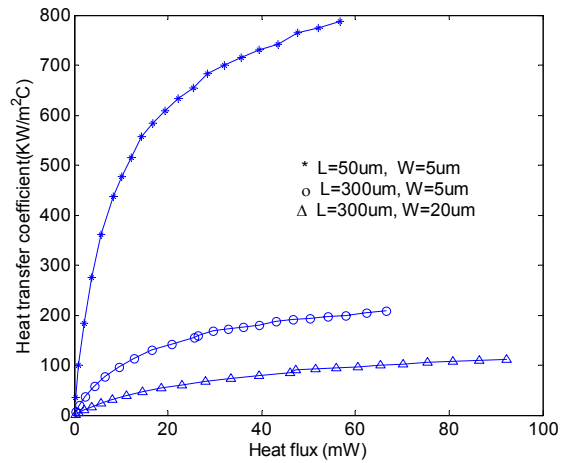
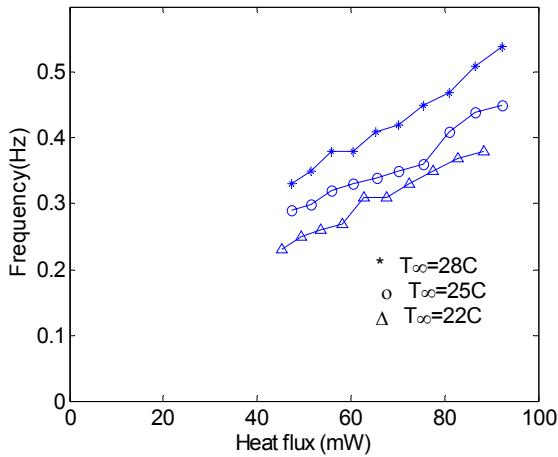


Fig. 5 Heat flux of micro heater versus heat transfer coefficient

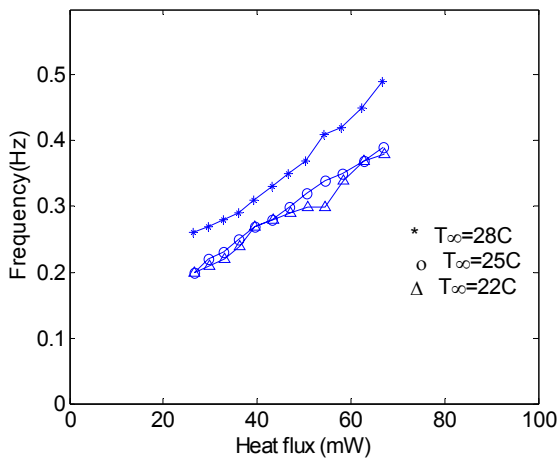
3. 실험결과 및 고찰

3.1 마이크로 히터에서의 비등현상

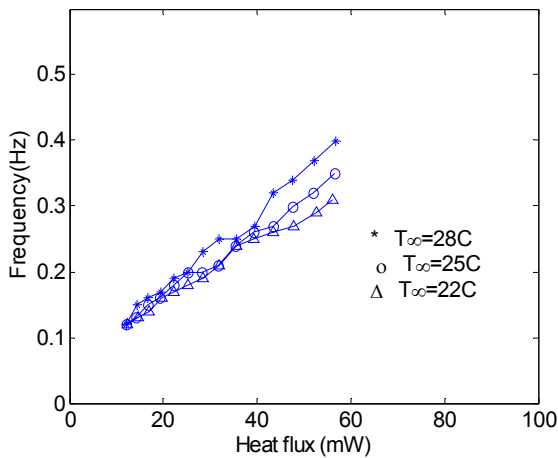
히터 형상에 따라 Fig. 4와 같이 히터에 공급되어진 열량이 증가하면서 히터의 표면온도가 증가한다. 히터 표면에서 기포 형성이 처음으로 일어나는 온도는 Fig. 6에서와 같이 히터 형상에 따라 각각 $L \times W = 300 \times 20 \mu m^2$ 일때 $111^\circ C$, $L \times W = 300 \times 5 \mu m^2$ 일때 $136^\circ C$, $L \times W = 50 \times 5 \mu m^2$ 일때 $110^\circ C$ 로 히터의 길이가 짧아지거나 너비가 커지면 기포가 처



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 Bubble generation frequency versus heat flux (a) $L \times W = 300 \times 20 \mu\text{m}^2$; (b) $L \times W = 300 \times 5 \mu\text{m}^2$; (c) $L \times W = 50 \times 5 \mu\text{m}^2$

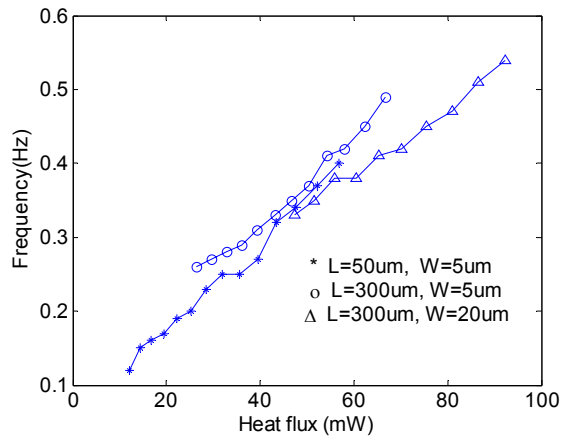


Fig. 7 Bubble generation frequency versus heat flux at $T_\infty = 28^\circ\text{C}$

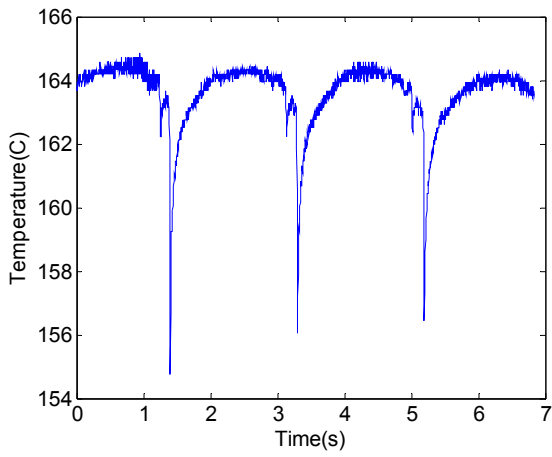
음 생성되는 히터 평균 표면 온도가 낮아지는 것을 알 수 있다.^{(2),(6)}

$$Q_h = h_h A(T_h - T_\infty) \quad (3.1)$$

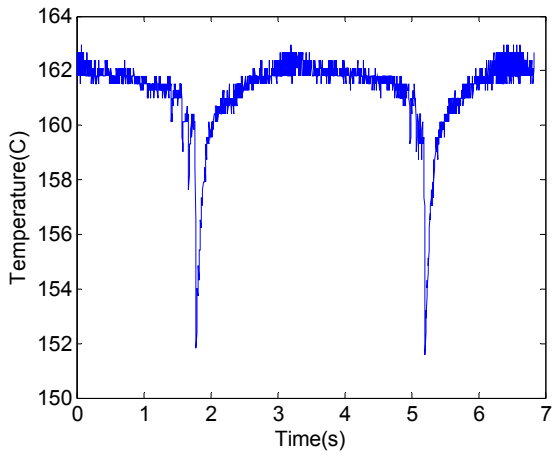
히터에서 주위유체로의 열전달량을 보여주는 식 (3.1) 에서의 T_∞ 는 용기내의 작동유체의 온도로 28°C , T_h 는 히터표면 평균 온도이다. Fig. 5에서 히터에 공급되는 열량이 증가하면서 열전달 계수 h_h 가 증가한다. Fig. 6에서는 각각의 히터에 공급 되는 열량이 증가 할수록 기포 생성 주기도 더욱 짧아지는 것을 알 수 있다. 작동 유체의 온도가 증가함에 따라서도 기포 생성주기가 빨라진다. fig. 7에서는 히터 면적이 작을수록 적은 열량에서도 기포 생성이 일어나고 기포 생성 주기가 길어지는 것을 알 수 있다. 그러나 공급되는 열량이 일정할 때 히터 형상에 관계없이 기포 생성주기는 일정 하다.

3.2 마이크로 히터 표면온도 변화

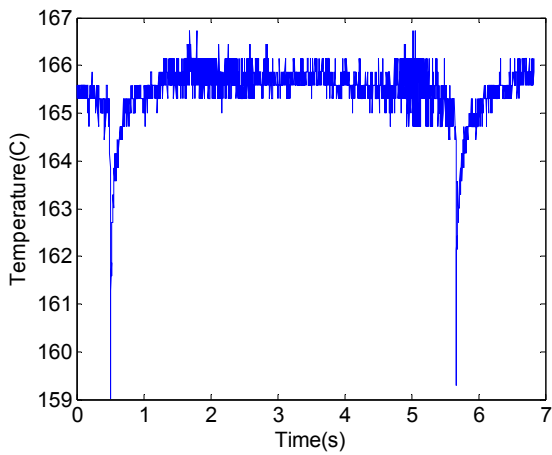
A/D convert와 증폭기를 이용 하여 300 Hz 의 빠르기로 마이크로히터 표면의 온도를 측정하였다. 용기내에 열전대를 설치하여 온도 측정을 하고 작동유체의 온도는 골드 필름 히터를 이용하여 28°C 로 유지하면서 실험이 행하여졌다. Fig. 8에서 보면 마이크로히터에서 일정 주기로 온도가 떨어졌다가 다시 올라가는 현상을 볼 수 있다. 이러한 현상은 기포가 떨어져 나가는 순간을 전후로 하여 히터표면과 기포의 접촉 부위가



(a)

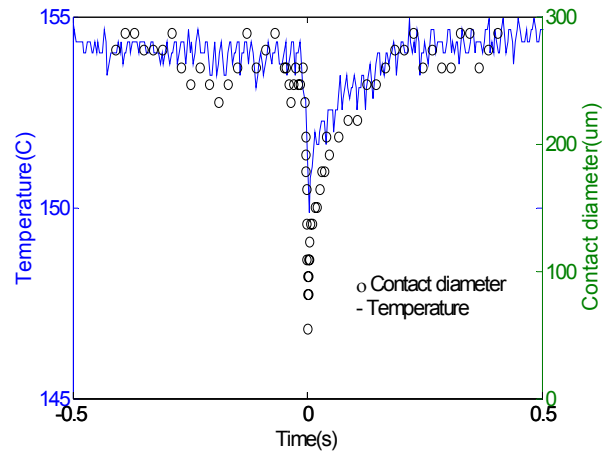


(b)

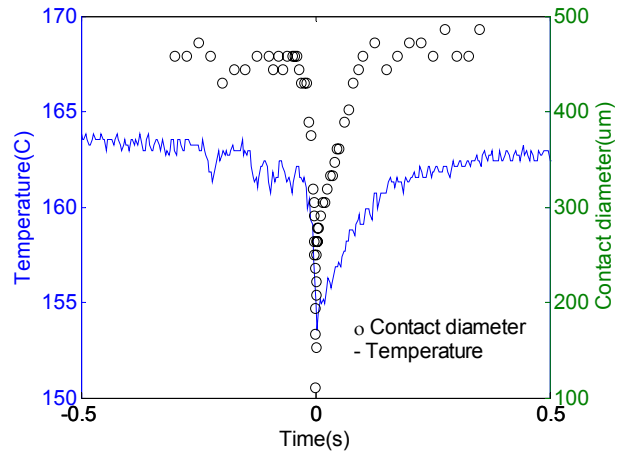


(c)

Fig. 8 Micro heater temperature variation during bubble generation (a) $L \times W = 300 \times 20 \mu\text{m}^2$; (b) $L \times W = 300 \times 5 \mu\text{m}^2$; (c) $L \times W = 50 \times 5 \mu\text{m}^2$



(a)



(b)

Fig. 9 Temperature of micro-heater versus contact diameter ; (a) $L \times W = 50 \times 5 \mu\text{m}^2$; (b) $L \times W = 300 \times 5 \mu\text{m}^2$

급속히 작아지면서 용기 안에 작동 유체와 히터와의 열 교환에 의해 히터 표면 온도가 급격히 떨어지기 때문이다. 그 후 기포가 생성되면서 기포생성에 의해 열손실이 없이 다시 급속히 가열되는 현상이 반복된다. 기포가 떨어지면서 온도가 떨어지는 기울기는 히터 형상과 관계없이 비슷한 값을 갖는다. 그러나 히터 표면 온도가 증가할 때는 Fig. 8 (c)의 기울기가 (a),(b)에 비해서 가파른 것을 알 수 있다. 히터 형상에 따라 온도 감소 정도는 (a), (b)는 9~10°C, (c)는 6°C 인 것을 알 수 있다.

Fig.9 (a), (b)는 각각 $L \times W = 300 \times 5 \mu\text{m}^2$, $L \times W = 50 \times 5 \mu\text{m}^2$ 의 크기를 가진 마이크로 히터에서의 온도 변

화와 초당 2000 frames 이미지를 획득 하여 기포가 히터에 접촉 되어지는 부분을 함께 나타낸 것이다. Fig. 9에서 보면 기포가 성장 후 히터 표면에서 떨어지기 전후로 기포가 히터에 접촉된 크기(D_h)는 $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 정도 이다. 히터 길이가 $50 \mu\text{m}$ 일 때의 Fig. 9 (a)는 기포가 떨어지기 전·후로 기포와 히터에 접촉된 범위가 히터의 크기보다 커서 히터와 작동유체 사이의 직접 열 교환이 이루어지지 않고 기포가 열전달을 방해함으로써 히터 표면에서의 온도변화 정도가 작다. 또한 기포 발생 후에도 온도가 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. (b)에서는 기포가 히터에서 떨어지기 전후로 하여 접촉되어지는 범위가 히터의 길이보다 작아짐으로써 히터와 작동유체사이의 열교환이 직접 일어나고, (a)에서 보다 온도 변화가 큰 것을 알 수 있다. 또한 온도 증가 정도도 (a)에 비해 완만한 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 $50 \times 5 \times 0.2 \mu\text{m}^3, 300 \times 5 \times 0.2 \mu\text{m}^3, 300 \times 20 \times 0.2 \mu\text{m}^3$ 크기의 마이크로 히터에 정전류를 주었을 때 기포 성장에 관한 실험으로 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 히터의 길이가 짧아지거나 너비가 커지면 기포가 처음 생성되는 히터 표면 온도가 낮다.

(2) 히터에 공급 되는 열량이 증가 할수록 기포 생성 주기도 짧아지고, 히터의 형상에 관계없이 일정 열량에 대해서 기포의 생성주기는 일정하다. 작동 유체의 온도가 증가함에 따라서도 기포 생성주기가 짧아진다.

(3) 마이크로 히터에서 기포의 성장 후 떨어질 때 온도 증감 현상이 일어난다. 기포가 성장 후 히터 표면에서 떨어지기 전·후로 기포가 히터에 접촉되어진 부분이 급속히 작아지면서 히터와 주위 작동 유체와의 열 교환이 일어난다. 히터의 크기가 기포의 접촉부위 보다 작은 경우에는 온도 증감 정도가 작고, 히터 표면에서의 온도 증가 기울기도 가파르다. 그러나 히터의 길이가 길어지면 온도 증감 정도는 커지고, 온도 증가 기울기도 완만해진다.

참고문헌

- (1) Lin, L. and Pisano, A. P., 1998, "Thermal bubble formation on polysilicon micro resistors." ASME Journal of Heat Transfer, 120, No. 3, pp. 735-742.
- (2) Kwak, H. and Jeon, J., 2003, "Bubble nucleation on micro line heaters under steady or finite pulse of voltage input.", International Journal of Heat and Mass Transfer
- (3) Koji, T. and Kunihito, N. 2000, "Microfluidic oscillator using vapor bubble on thin film heater." The 13th Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, pp. 419-423
- (4) Tasi, J. H. and Lin, L. 2002, "Transient thermal bubble formation on polysilicon micro - resistors.", ASME Journal of Heat Transfer, 124, pp. 375-382
- (5) Kwak, H., Jeon, J., 2001, "Measuring of temperature change and the bubble nucleation temperature on the surface of a rapidly heated micro heater," 대한기계학회 열 및 유체공학부문 추계학술대회 논문집 pp. 302-307
- (6) Oh, S., Seung, S., Kwak, H., 1999, "A model of bubble nucleation on a micro line heater". ASME Journal of Heat Transfer, 121, pp.220-225

* L=50um, W=5um

\o L=300um, W=5um

\Delta L=300um, W=20um

* $T_{\infty}=28\text{C}$

\o $T_{\infty}=25\text{C}$

\Delta $T_{\infty}=22\text{C}$