

마이크로 히터에서의 기포 생성에 관한 실험적 연구

고승현*·김신규*·김호영[†]·장영수*·이윤표*

An Experimental Study on Bubbles Growth on Microheater

Seung-Hyun Ko, Shin Kyu Kim, Ho-Young Kim, Young Soo Jang, Yoon Pyo Lee

Key Words: Microheater(마이크로 히터), Bubble growth(기포 생성), Bubble growth period(기포 생성주기), Contact diameter(접촉 지름)

Abstract

Bubble growth on microheater has been experimentally investigated in this study. The experiment was performed using platinum micro heaters having dimensions of $100 \times 10 \times 0.2 \mu\text{m}^3$ with constant heat flux. A high speed video camera was used to observe bubble growth at 250 frames per second. Microheater temperature was measured at the rate of 300 Hz with a data acquisition system. When heater temperature was 139°C a bubble was nucleated in the liquid FC-72. The temperature profiles and the high speed camera images were combined to explain heat transfer and bubble growth on microheater.

기호설명

- Q : 회로전체에 공급되는 열량(mW)
 Q_h : 마이크로 히터에 공급되는 열량(mW)
 R_h : 마이크로 히터 저항(ohm)
 I : 회로전체에 공급되는 전류(mA)
 I_h : 마이크로 히터에 공급되는 전류(mA)
 T_h : 마이크로 히터 표면 온도($^\circ\text{C}$)
 T_∞ : 작동유체의 온도($^\circ\text{C}$)
 D : 기포 지름(μm)
 D_c : 접촉지름(μm)

1. 서 론

오늘날 마이크로 회로공정의 발달로 마이크로

가공 기술은 매우 작은 센서 및 구조물 등의 초소형 장치들을 생산할 수 있게 되었다. 버블젯 프린터의 상업적 성공으로 마이크로 히터에서의 기포 생성에 대하여 많은 연구가 이루어졌다. Lin 등은 폴리실리콘 마이크로 선형 히터에서 마이크로 크기의 기포 형성과 매크로 크기의 기포 형성에 대하여 비교, 보고하였다.⁽¹⁾ Kwak 등은 전압 펄스를 히터에 보내서 급격히 가열되는 마이크로 선형히터에서의 온도 측정과 기포 형성 온도에 대해서 보고하였다⁽²⁾. 최근에는 마이크로 기포를 소형장치에서 펌프등과 같은 동력원으로 사용하고, 마이크로 채널 내에서 유동 제어에도 사용한다. Koji 등은 마이크로 기포를 이용한 진동 장치에 대하여 연구하였다⁽³⁾. Lin 등은 기포에 의해 작동되는 펌프를 이용하여 마이크로 채널내의 가스를 필터링하는 실험을 하였다.⁽⁴⁾ 위의 연구 예에서 보듯이 마이크로 히터에서의 기포 생성의 원리는 센서, 액추에이터와 같은 마이크로 동력원과 미소채널 내에서의 유동제어 작동 원리의 중요한 메커니즘이라고 할 수 있다.

[†] 한국과학기술연구원 열유동제어센터

E-mail : hoyoung@kist.re.kr

TEL : (02)958-5673 FAX : (02)958-5689

* 한국과학기술연구원 열유동제어센터

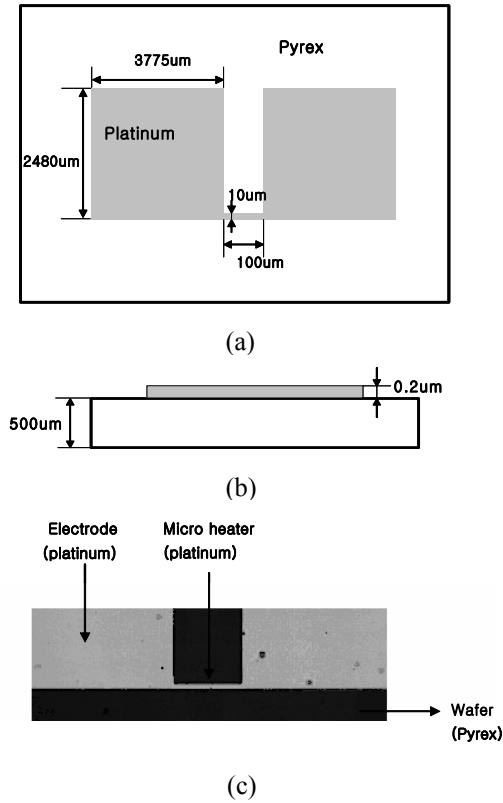


Fig. 1 Platinum micro heater : (a) Top view ; (b) Side view ; (c) Micrograph of the platinum micro heater

본 연구에서는 두께 0.7 mm인 유리(Pyrex)웨이퍼에 $100 \times 10 \times 0.2 \mu\text{m}^3$ 의 마이크로 히터를 MEMS 공정인 금속 증착 과정(Evaporation)과 건식식각(RIE), 광학 식판 과정(Photolithography)을 이용, 제작하였다. 절연 유체인 FC-72 을 작동유체로 하였고 DC power supply를 이용하여 정전류를 히터에 보냈다. 마이크로 기포의 생성과 성장을 고속 카메라를 이용하여 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. 히터의 크기는 길이 100 μm , 나비 10 μm , 두께 0.2 μm 이며 전극 패드의 크기는 $3775 \times 2480 \mu\text{m}^2$ 으로 제작하였다. 본 실험

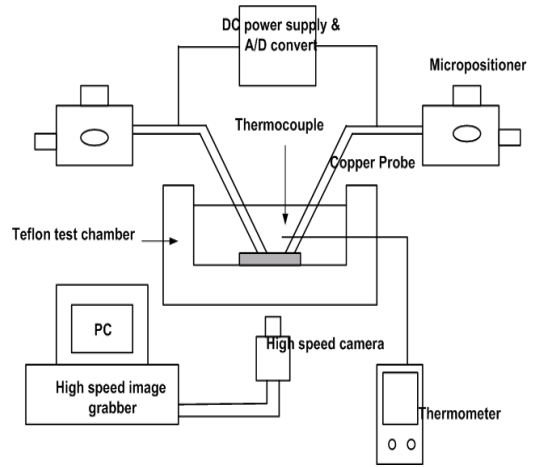


Fig. 2 Experimental setup of the micro bubble generator using micro heater

Table 1 Calibration of temperature resistivity coefficient (K^{-1})

Case	$\frac{dR}{dT}$ (ohm/k)	R_0 (ohm)	ξ (K^{-1})
1	0.0403	12.35	0.00326
2	0.0407	12.55	0.00324
3	0.0449	13.55	0.00331

을 위하여 $40 \times 40 \times 10\text{mm}^3$ 크기의 실험용 테프론 용기를 Fig. 2 와 같이 제작하였고 유동 가시화를 위해 투명 아크릴을 이용하여 전면에 부착하였다. 작동유체는 절연성 액체인 FC-72를 이용하였으며 이의 대기압에서 비등온도는 56°C 이다. 백금의 저항-온도 관계식은 아래 식 (2.1)와 같이 관계를 가지고 있다.⁽²⁾

$$R_h = R_0 [1 + \xi(T - 273.15)] \quad (2.1)$$

백금의 열-저항 계수(ξ), $0.0039(\text{K}^{-1})$ 는 박막(thin film) 증착 조건에 따라 달라진다. 본 연구에 앞서 실험 대상에 대하여 오븐 에서 실험 샘플과 계측기를 이용하여 열-저항 계수 보정실험을 한 결과 Table 1과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 마이크로 포지셔너에 구리 프로브를 고정시켜 히터의 패드와 밀착시켰다. 마이크로 히터 R_h 는 Fig. 3과 같은 Wheatstone 브리지 회로에 연결하여 정전류를 매 10-15초 동안 공급하였다.

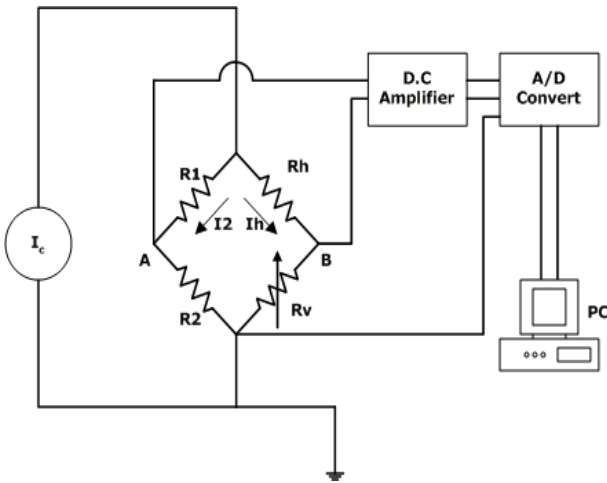


Fig. 3 Schematic of Wheatstone bridge circuit

2.2 실험계측장치

본 연구에서는 기존의 연구에서 사용한 Wheatstone 브리지 회로를 이용하여 마이크로 히터의 온도를 측정하였다.^{(2),(6)} 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 전압차는 증폭기와 A/D convert를 통해 나온 증폭 신호를 300 Hz sampling time으로 측정하였다. 이 양단간의 전압차와 히터의 저항은 식 (2.2)와 같이 된다.

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

기포 성장 가시화를 위해 초고속 카메라를 이용하여 초당 250 frames 이미지를 녹화하였다. 용기내의 유체의 온도는 열전대를 일정한 위치에 고정 시켜놓고 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 마이크로 히터에서 비등현상

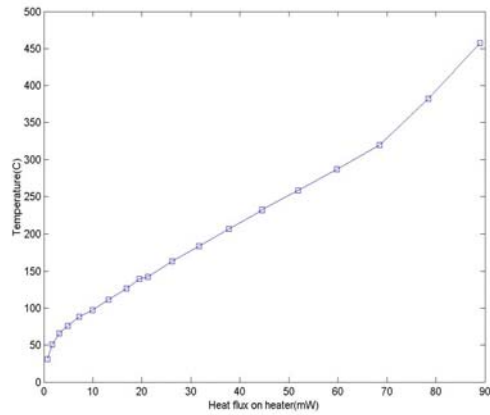


Fig. 4 Temperature of micro-heater versus heat flux

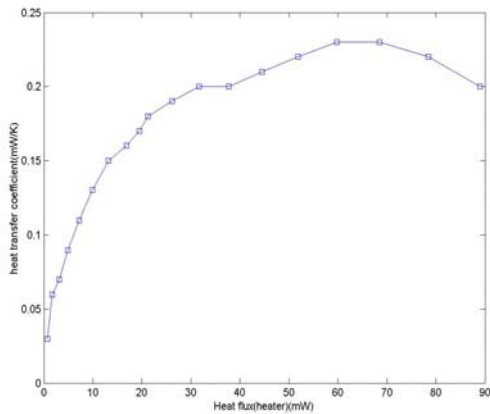


Fig. 5 Heat flux of micro heater versus heat transfer coefficient

Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이 히터공급 열량이 증가하면 히터의 온도가 올라가게 된다. 기포 형성이 처음 일어나는 시기는 Wheatstone 브리지 내에 전류 48 mA를 흘려주었을 때 마이크로 히터 내에 공급되는 전류에 양은 19.48 mA이다. 이때 히터의 표면 온도는 139°C인 것으로 나왔다. 히터내의 공급되는 열량이 증가할수록 히터 표면의 온도가 선형적으로 올라간다.

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

식 (3.1) 에서의 T_∞ 는 용기내의 작동유체의 온도로 16.5°C, T_h 는 히터표면의 온도이다. Fig. 5에서 히터에 공급되는 열량이 증가하면서 열전달 계수 h_h 가 선형적으로 증가하다가 공급 열량이

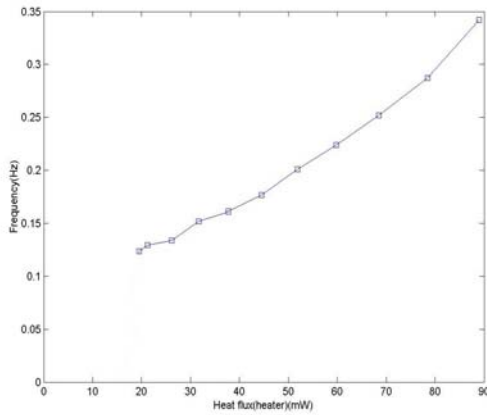


Fig. 6 Bubble generation frequency versus heat flux

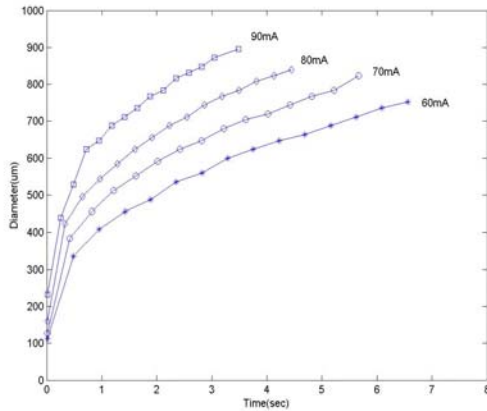


Fig. 7 Bubble size at different inputs current

70mW 후에는 내려가는 것을 볼 수 있다. Fig. 6에서는 히터에 공급 되는 열량이 증가 할수록 기포 생성 주기도 더욱 짧아지는 현상을 알 수 있다. 기포 생성 주기가 짧아지면 비등현상에 의해 주위 유체와의 열전달이 향상된다. Fig. 7에서는 전류 양의 증가하면 기포가 떨어져 나가는 주기는 짧아지고 기포가 히터에서 떨어질 때의 크기는 커지는 것을 알 수 있다. 그러나 히터에 공급 되는 열량이 70 mW 이후에는 기포 성장으로 기포가 유체와 히터 사이에 열 저항으로 작용하게 되어 히터와 유체사이의 열전달을 방해하고 이로 인해 비등현상이 빨라지더라도 열전달계수가 낮아진다.

3.2 기포 성장

Table 2 Constant value C for Eq. (3.3) for different input currents

Input current(I)	C
60 mA	220
70 mA	245
80 mA	274
90 mA	290

비등시 일어나는 열기포 성장에 관한 기존 많은 연구가 있었다.^{(3),(6),(7)} 기포 성장 초기에는 관성에 의해 기포 성장이 조절된다(Inertia controlled growth). 이 기포 성장 기간에는 Fig. 7에서 같이 기포의 크기는 시간에 따라 급격히 변화한다. Fig. 7에서는 초기 약 0.5 초내에서 관성에 의해 기포가 급격히 커지는 것을 확인 할 수 있었다.

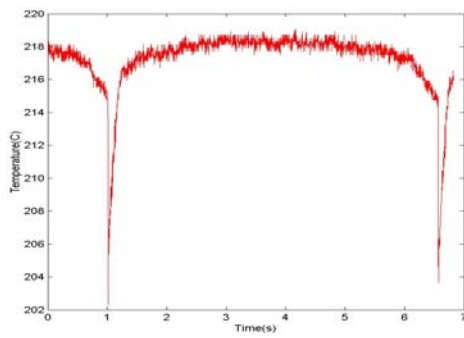
가열면 에서의 대부분의 기포 성장은 열전달에 제한받는 구간(heat transfer controlled growth)으로 식 (3.3)과 같이 기포의 크기는 시간의 제곱근에 비례한다.

$$D=Ct^{1/2} \quad (3.3)$$

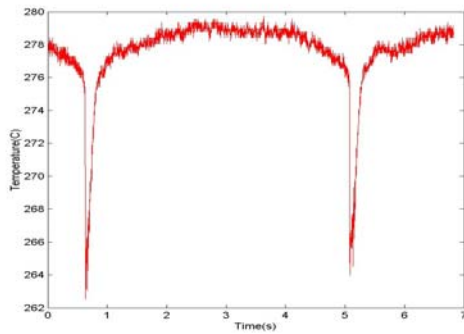
Table 2에서 전류의 양의 증가하면서 식 (3.3)에서의 C값 크기가 증가하는 것을 볼 수 있다. Forster and Zubber⁽⁶⁾는 가열면 에서의 기포 성장은 시간의 제곱근에 비례하고 상수 C에 값은 Ja, Pr 수의 함수로서 표현하였다. 여기서 Jakob 수는 식 (3.4)과 같이 표현된다.

$$Ja = \frac{\rho_l C_l [T_h - T_{sat} (P_\infty)]}{\rho_l h_{fg}} \quad (3.4)$$

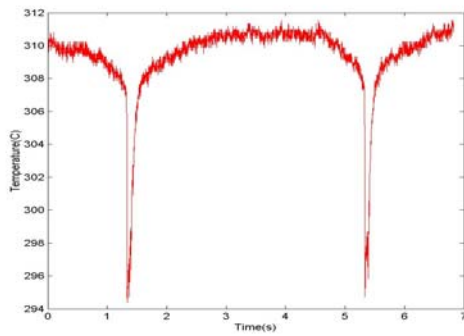
Fig. 4에서 전류의 양이 증가하면 히터 표면의 온도도 증가한다. 히터의 표면 온도 증가로 Jakob 수가 커지고, 시간에 따라서 기포가 더 빨리 자란다는 것을 보여준다. Fig. 8은 증폭기와 A/D convert을 이용 300 Hz 의 빠르기로 마이크로히터 표면의 온도를 측정 한 결과이다. 실험은 용기내의 열전대를 설치하여 온도 측정을 하고 작동유체의 온도를 16.3-16.8℃ 사이에서 유지하면서 실험이 행하여졌다. 히터로 공급되는 전류에 따라 히터 표면온도를 측정하였다. Fig. 8에서 보면 마이크로히터에서 일정 주기로 온도가 떨어졌다가 다시 올라가는 현상을 볼 수 있다. 이러한 현상



(a) Input current = 44.5mA



(b) Input current = 59.8mA

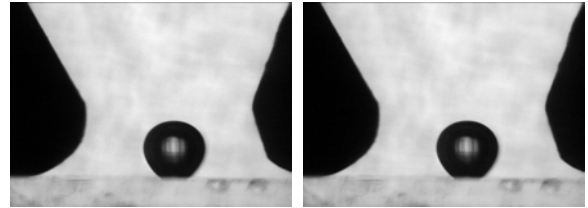


(c) Input current = 68.5mA

Fig. 8 Micro heater temperature variation during bubble generation

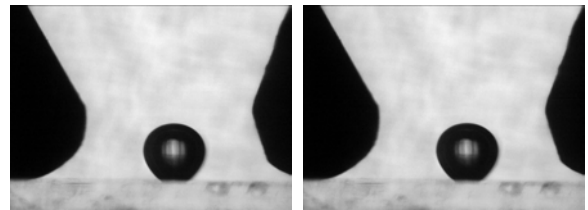
은 기포가 떨어져 나가는 순간을 전후로 하여 히터표면과 기포의 접촉 부위가 급속도로 작아지면서 용기 안에 주위 액체와의 열전달에 의해 급격히 온도가 떨어지기 때문이다. 그 후 기포가 생성되면서 기포생성에 의해 열손실이 없이 다시 급속히 가열되는 현상이 반복된다.

Fig. 9는 초고속 카메라를 이용하여 Wheatstone 브리지내에 전류가 70 mA 일때 기포가 생성 전



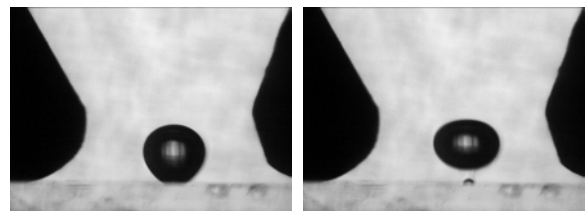
(a) $t = -0.04s$

(b) $t = -0.032s$



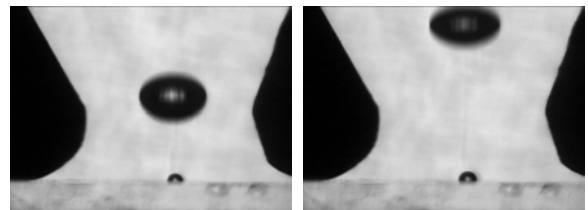
(c) $t = -0.024s$

(d) $t = -0.016s$



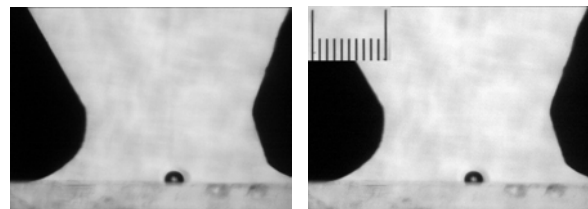
(e) $t = -0.008s$

(f) $t = 0s$



(g) $t = 0.008s$

(h) $t = 0.016s$



(i) $t = 0.024s$

(j) $t = 0.032s$

Fig. 9 Bubble growth images on the micro at 44.5mA

후를 초당 250 frames 이미지를 획득하여 나타낸 그림이다. Fig. 10은 히터와 기포가 접촉 되는 지름을 기포 생성 주기에 따라 나타낸 것이다.

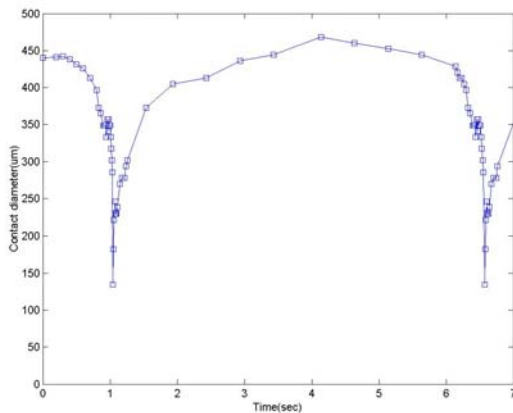


Fig. 10 Contact diameter during bubble generation

Fig. 8 (a)와 Fig. 10를 보면 기포가 히터에 접촉하는 부분이 급격히 줄어드는 주기와 온도가 떨어지는 주기가 비슷한 것을 확인 할 수 있었다. 그러나 Fig. 8에서 전류량이 증가로 열량이 증가하더라도 기포가 떨어져 나가기 전후의 온도의 증감 정도는 16°C 정도로 일정한 것을 알 수 있었다. 기포 생성 후 떨어져 나가는 사이의 히터의 표면 온도는 공급열량이 증가하더라도 영향을 받지 않고 작동유체 온도에 영향을 받는 것으로 생각된다. 이후 이 부분에 대해서는 추가 연구가 진행 중이다.

4. 결 론

본 연구는 $100 \times 10 \times 0.2 \mu\text{m}^3$ 크기의 마이크로 히터에 일정한 열량을 주었을 때 기포 성장에 관한 실험으로 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 히터에 공급하는 열량이 증가하면 기포 발생 주기는 짧아지고 기포가 히터 표면에서 떨어질 때의 크기는 커진다. 이러한 현상으로 열전달이 증가하여야 하나, 일정 열량 이후로는 기포의 크기가 커지면서 기포가 열저항이 되어 히터와 유체와의 열전달을 저하시켜 열전달 계수가 떨어지는 것을 알 수 있었다.

(2) 기포의 성장은 시간의 제곱근에 비례하고 히터의 표면 온도가 증가할수록 기포의 성장주기는 더욱 짧아지고 기포의 크기는 커진다.

(3) 마이크로 히터에서 기포의 성장 후 떨어져 나갈 때 온도 증감 현상이 일어난다. 이러한 온

도 증감 현상은 기포가 떨어져 나가기 직전 히터 표면과 접촉 부위가 급속도로 작아지면서 히터와 작동 유체와의 열교환에 의해 나타나고, 이후 기포 성장으로 다시 히터 표면 온도가 증가하는 것을 알 수 있었다. 그리고 공급되는 열량과 히터 표면의 온도 증감의 정도는 관계가 없고 작동유체에 영향을 받는 것으로 예상이 된다.

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., 2001, "Bubble nucleation on micro line heaters," ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition,
- (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) Lin, L. and Jr-Hung, T. 2002, "Active microfluidic mixer and gas bubble filter driven by thermal bubble micropump," Sensors and Actuators A97-98 pp. 665-671
- (5) Lin, L. and Tsai J. 2002, "Transient thermal bubble formation on polysilicon micro-resistors," ASME Journal of Heat Transfer, 124, pp. 375-382.
- (6) 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
- (7) Carey, V. P., 1992, Liquid-Vapor Phase-Change Phenomena., Hemisphere, Washington, DC
- (8) A. J. Robinson, R. L. Judd, 2001, "Bubble growth in a uniform and spatially distributed temperature field", International Journal of Heat and Mass Transfer, 44, pp. 2699-2710