

# 인공 캐비티를 가진 히터를 이용한 가열면 경사각에 따른 포화상태 풀 핵비등 열전달 기초연구

김정배\*

\*충주대학교 에너지시스템공학과(jeongbae\_kim@cjnu.ac.kr)

## Heat Transfer Characteristics under Saturated Nucleate Pool Boiling for Various Heating Surface Angles using Heater with Artificial Cavity

Kim, Jeong-bae\*

\*Department of Energy System Engineering, Chungju National University(jeongbae\_kim@cjnu.ac.kr)

### Abstract

Nucleate pool boiling experiments with constant heat flux condition were performed using pure R11 and R113 for various surface angles under saturated pool condition. A circular heater of 1 mm diameter, with artificial cavity in the center, fabricated using MEMS technique and the high-speed controller were used to maintain the constant heat flux. Images of bubble growth were taken at 5,000 frames per second using a high-speed CCD camera. The bubble geometry was obtained from the captured bubble images. The effects of surface angles on the bubble growth behaviors were analyzed as dimensional scales for the initial and thermal growth regions. The parameters for the bubble growth behaviors were bubble radius, bubble growth rate, sliding velocity, bubble shape and advancing and receding contact angles. These phenomena require further analysis for various surface angles, but this study will provide good experimental data with constant heat flux boundary condition for such works.

Keywords : 인공캐비티(Artificial cavity), 표면각(Surface angle), 일정열유속(Constant heat flux), 단일기포 성장(Single bubble growth), 포화 핵비등(Saturated nucleate pool boiling), 원형히터(Circular heater)

### 1. 서 론

태양열을 이용하여 증기를 만들기 위한 집열기들에서 발생하는 열전달 기구는 흐름비

등의 핵비등 영역에 있다. 흐름비등에서의 많은 실험결과들이 제시되어 있고, 이러한 실험 결과로부터 얻어진 다양한 상관식들이 널리 이용되고 있기도 하다.

투고일자 : 2009년 5월 25일, 심사일자 : 2009년 5월 27일, 게재확정일자 : 2009년 6월 9일  
교신저자 : 김정배(jeongbae\_kim@cjnu.ac.kr)

그러나, 흐름비등에서의 열전달식들은 대부분이 풀 핵비등에서의 기포의 성장에 대한 성장식으로부터 구해진 열전달계수를 포함하고 있다. 따라서 풀 핵비등에서의 기포의 성장식은 매우 중요한 역할을 하고 있다.

대부분의 기존의 연구결과들은 Mikic et al<sup>(1)</sup>의 결과와 동일하게 풀 내부에서 균일하게 과열된 액체로 둘러싸인 임계반경(Critical radius)보다 더 큰 초기 반경을 가지는 기포의 성장을 검토하여, 기포 반경이 무차원 시간이 1 보다 매우 작은 영역에서는 시간에 비례하는, 그리고 매우 큰 영역에서는 시간의 1/2 승에 비례하는 결과를 제시하였다. 이러한 결과를 바탕으로 하여 비등 열전달계수를 결정하고 있다.

이와 달리, Lee et al<sup>(2)</sup>는 다른 연구들의 일정열유속 가열조건과 달리 일정 벽면온도 상태에서 냉매 R11을 이용하여 기포 성장을 실험하고, 물질의 종류와 가열조건에 상관없이 초기성장 영역에는 기포 반경이 시간의 1승에 비례하는 열적성장 영역에서는 시간의 1/5승에 비례하는 결과를 제시하였다.

Kim et al<sup>(3)</sup>은 Lee et al<sup>(4)</sup>의 부족한 초기성장 영역에서의 많은 실험결과를 이용하여 초기성장영역에서 기포반경이 시간의 1/2에서 2/3승에 비례하여 성장하는 결과를 제시하였다.

이러한 기존의 연구들은 기포생성을 위한 가열 조건에 집중하여 실험을 수행하였는데, 실제 가열조건에서 많이 활용되는 인공 캐비티를 가진 가열면의 조건에서의 기포성장에 대한 연구는 실제로 많이 부족한 상황이다.

이와 함께, 실제 열교환기구들은 다양한 가열면의 각도 조건에서 이루어지고 있기도 하다. Githinji and Sabersky<sup>(5)</sup>, Chen<sup>(6)</sup>, Jung et al<sup>(7)</sup> and Chang and You<sup>(8)</sup>등이 다양한 가열면의 조건에 대한 비등열전달 실험을 수행하였지만, 단일 기포의 성장에 대해서는 명확한 열전달 기구의 특성을 제시하지 못하였다.

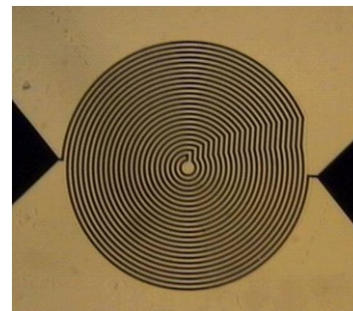
따라서, 본 연구에서는 인공 캐비티를 가진 미세크기의 히터를 이용하여 대기압 하의 포

화상태 풀 핵비등 조건에서 냉매 R11 (포화온도 23.7°C, 풀온도 24.0°C)과 R113 (포화온도 47.6°C, 풀온도 47.0°C)를 이용하여 단일기포의 성장에 대한 실험을 다양한 0°, 30°, 60°, 및 90°의 가열면 경사각에 대하여 수행하고 이의 결과를 제시하고자 한다.

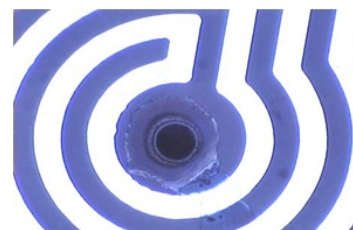
## 2. 실험장치 및 불확실성해석

### 2.1 실험장치

가열벽면을 일정 열유속으로 유지하면서 열전달량을 측정하기 위하여 중앙에 인공적인 캐비티를 가진 원형의 미세히터를 이용하였는데, 미세히터는 양면을 투명하게 가공한 유리 웨이퍼 위에 VLSI 기술을 이용하여 제작되었다. 먼저 열증착 방법을 이용하여 Ti/Pt층(히터)을 만들고, 파워라인으로 사용될 Ti/Au층을 도포하였다. 그림 1과 같은 형태의 미세히터는 가열면의 조도가 유리 웨이퍼 바닥으로부터 가열선의 높이로 거의 0.4μm이고, 가열 라인의 폭은 10μm이고 가열라인 사이의 거리도 또한10μm로 제작되었다.



(a) 원형 미세 히터



(b) 인공 캐비티 구조

그림 1. 원형 히터와 캐비티의 구조

티타늄 표면의 정적 접촉각은 순수 물에 대해서는 71°이고, 냉매 R113에 대해서는 11.4°이다. 원형 히터의 지름은 1mm이고, 원형 실린더 형태의 인공 캐비티의 크기는 지름 14.5 μm, 깊이가 35μm이었다. 캐비티로부터 히터 가열 라인의 왼쪽으로의 간격은 15μm이었고, 오른쪽으로는 18μm이었다. 히터의 전기적 저항은 8.404kΩ이었다.

일정 열유속 조건은 전압 데이터를 100kHz의 속도로 측정하여 전체 실험동안 ±2% 이내로 제어할 수 있는 회로를 이용하여 DC 전압을 조절하면서 얻어졌다.

실험장치는 그림 2와 같으며, 가열면에서 성장하는 기포의 측면 이미지를 촬영하기 위하여 고속의 CCD 카메라를 이용하였는데, 조명으로 150W의 냉온 조명을 사용하였다. CCD 카메라는 Redlake 사의 HG-100K 카메라를 이용하였고, 가열면에서 성장하는 기포의 이미지는 초당 1,000 혹은 5,000 frames의 속도로 촬영하였다. 기포의 이미지를 확대 촬영하기 위하여 마이크로 렌즈를 이용하였다.

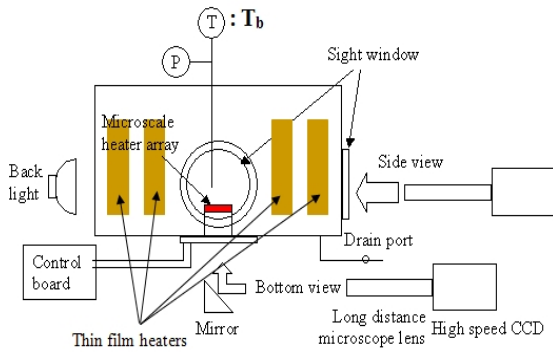


그림 2. 실험 장치도

## 2.2 불확실성 해석

기포의 성장 거동은 측면에서 촬영된 이미지를 이용하여 분석된다. 대부분의 이전의 연구들은 측정된 이미지로부터 기포의 크기를 측정하기 위하여 구형의 기포로 가정하여 분석하였지만, 본 연구에서는 이미지로부터 얻

어진 기포의 체적으로부터 등가 반경을 계산하여 기포 성장을 분석한다.

촬영된 이미지들로부터 기포의 형상이 가열면의 경사각이 영도인 경우를 제외하고는 비대칭의 형상을 가지고 있었다.

따라서, 이러한 형상에 맞게 기포의 크기를 측정하여야 한다.

본 연구에서는 그림 3과 같은 형상으로 가정하여, 기포의 좌상부, 우상부, 좌하부, 및 우하부의 체적을 각각 식 (1)-(4)를 이용하여 계산하였다.

$$V_{UL} = \frac{2}{3} \pi A_L^2 E_L \times \frac{1}{2} \quad (1)$$

$$V_{UR} = \frac{2}{3} \pi A_R^2 E_R \times \frac{1}{2} \quad (2)$$

$$V_{LL} = \pi A_L^2 \left[ D_L - \frac{D_L^3}{3F_L^2} \right], \quad F_L = \sqrt{\frac{D_L^2}{1 - \frac{C_L^2}{A_L^2}}} \quad (3)$$

$$V_{LR} = \pi A_R^2 \left[ D_R - \frac{D_R^3}{3F_R^2} \right], \quad F_R = \sqrt{\frac{D_R^2}{1 - \frac{C_R^2}{A_R^2}}} \quad (4)$$

여기서,  $A$ ,  $A_R$ ,  $A_L$ ,  $B$ ,  $D_R$ ,  $D_L$ ,  $E_R$ ,  $E_L$ ,  $C$ ,  $C_R$ ,  $C_L$ ,  $F_R$ , 및  $F_L$ 은 그림 3에 표시되어 있다.  $V_{UL}$ 은 기포의 좌측 상부의 체적을,  $V_{UR}$ 은 기포의 우측 상부의 체적을,  $V_{LL}$ 은 기포의 좌측 하부의 체적을, 그리고  $V_{LR}$ 은 기포의 우측 하부의 체적을 나타낸다. 그리고  $V_U$ 는 기포의 상부를,  $V_L$ 은 기포의 하부의 체적을 각각 의미한다. 등가 기포 반경( $R=R_{eq}$ )은 측정된 기포의 체적( $V$ )으로 동일한 반경의 구로 가정하여 얻어진다.

$$V = V_U + V_L = \frac{4}{3} \pi R_{eq}^3 = \frac{4}{3} \pi R^3 \quad (5)$$

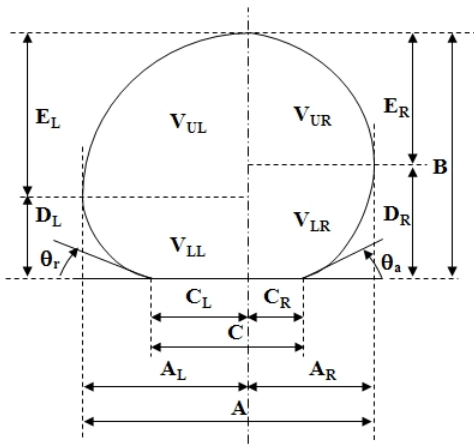


그림 3. 기포 체적을 결정하기 위한 기포 형상

그러나, 기포의 성장 해석에 가장 중요한 것이 기포의 반경이다. 기포의 크기를 측정하기 위해서는 촬영된 이미지의 픽셀의 수를 이용하게 되는데, 기준 거리를 측정하기 위하여 미세 히터가 설치된 위치에 마이크로미터를 설치하여 동일한 촬영 조건에서 측정하게 된다. 이렇게 얻어진 이미지로부터 본 실험에서는  $1000\mu\text{m}$ 가 147 픽셀에 해당함을 알 수 있었다. 그리고, 기포의 이미지에서 한 픽셀에 해당하는 길이는  $6.8027\mu\text{m}$ 이다.

명확히 기포의 이미지로부터 기포의 크기 측정 시에 약  $\pm 1$  픽셀의 오차가 발생하므로, 이를 바탕으로 하여 불확실성 해석을 수행하면 기포의 체적이 가장 작은 첫 번째 이미지로부터 최대 6.0%인 것으로 평가되었다. 따라서, 기포 반경의 측정에 있어서의 불확실성은 상당히 낮은 것으로 판단된다.

### 3. 실험결과 및 고찰

R11의 실험에서는  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ , 및  $90^\circ$ 의 가열면 경사각에 대하여 동일하게 핵비등 영역에 해당하는  $13.6\text{kW/m}^2$ (DC 전압; 9.5V)의, R113의 경우에는  $25.5\text{kW/m}^2$ (DC 전압; 13.0V)의 일정 열유속으로 실험을 수행하였다.

그림 4는 R11에 대하여 촬영된 기포의 이

미지들을 보여주고 있다. 촬영된 이미지로부터  $0^\circ$ 의 경우에는 가열면에 수직인 축을 중심으로 대칭적인 형상을 보여주고,  $0^\circ$ 를 제외한 경우에는 수평과 수직축을 중심으로 모두 대칭이 아닌 것으로 나타났다.

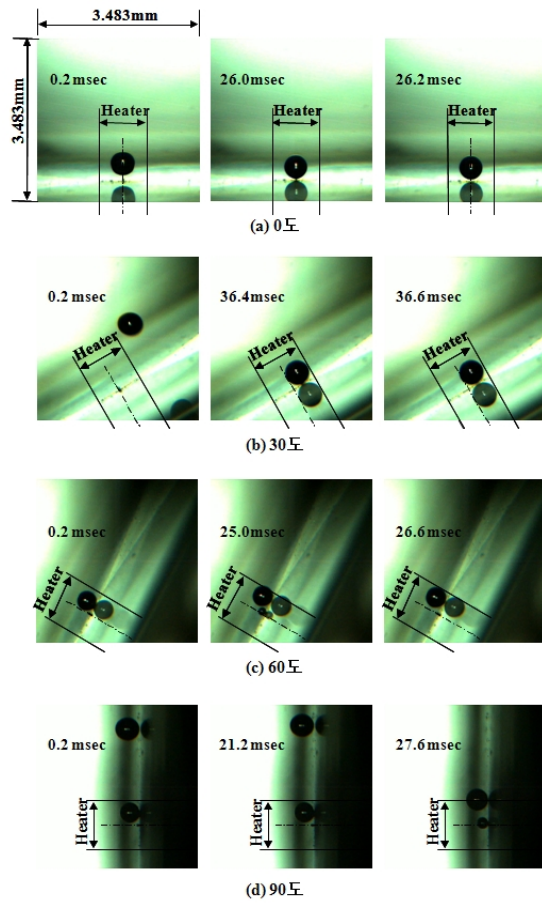


그림 4. R11의 경사 조건별 촬영된 기포 형상

먼저, R11의 경사각별 시간에 따른 기포 반경을 그림 5에 나타내었다. 그림에서와 같이 대체적으로 가열면 경사각이 증가함에 따라서 기포의 크기가 감소하는 것으로 나타나고 있다. 그림 6은 R113의 경사각별 기포 반경을 시간에 따라 나타내고 있는데, R11과 유사하게 가열면 경사각이 증가함에 따라 기포의 크기가 감소하고 있다. 또한, 기존의 Kim et

al<sup>(3)</sup>와 Lee et al<sup>(4)</sup>의 실험 결과와 동일하게 R113의 기포 크기가 R11의 크기에 비하여 큰 것으로 나타나고 있다. 그러나 중요한 것은 시간에 따른 기포 반경의 변화율(시간에 대한 기포의 성장특성)이므로 이에 대한 분석이 필요하다.

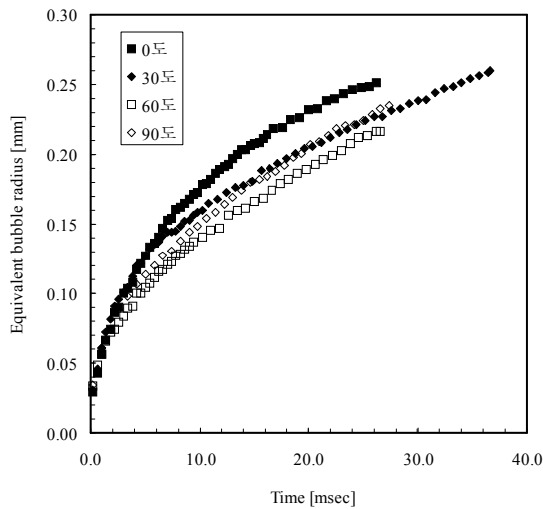


그림 5. R11의 경사 조건별 시간에 따른 기포 반경

기존 실험결과와의 비교를 위해 기포가 가열면에서 벗어나 가열면 히터로부터 열전달이 중단되는 이탈반경과 이탈시간을 이용하여 무차원화된 반경과 시간을 이용하여 비교하였다.(식 (6) 참조)

$$R^+ = \frac{R}{R_d}, \quad t^+ = \frac{t}{t_d} \quad (6)$$

여기서,  $R^+$ 와  $t^+$ 는 무차원 기포반경과 시간을,  $R_d$ 와  $t_d$ 는 이탈시의 기포반경과 시간을 나타낸다.

그림 7은 이러한 무차원화된 결과를 보여주고 있다. 기존의 연구결과에 의하면 가열 조건과 물질에 관계없이 기포의 성장률이 일정한 것으로 제시되었지만, 인공 캐비티를 가지는 조건에서는 그림과 같이 초기의 성장

률이 상대적으로 낮아지는 것으로 나타난다.

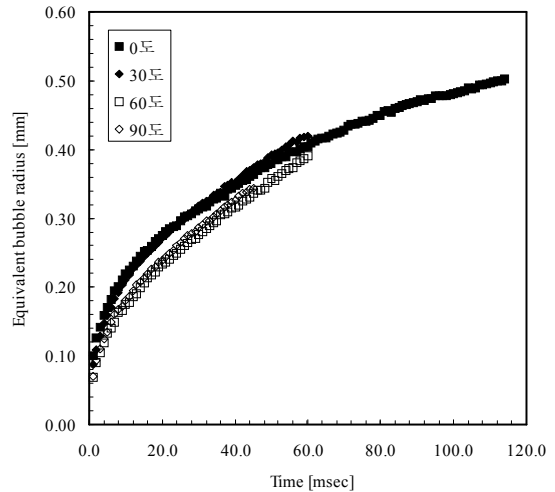


그림 6. R113의 경사 조건별 시간에 따른 기포 반경

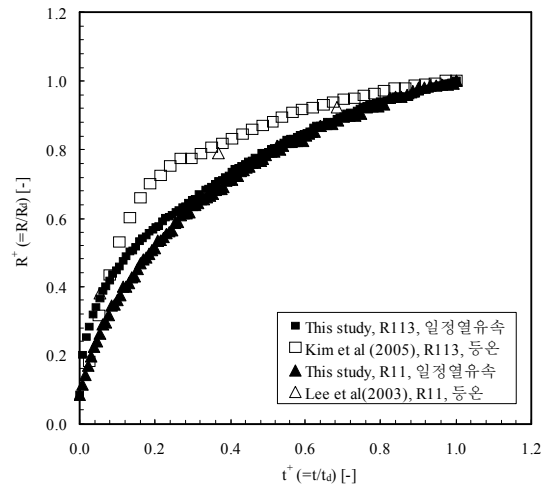


그림 7. R11과 R113의 0도에서의 기존 결과와의 비교

이는 기포 바닥으로부터의 마이크로 층(micro layer)을 통한 열전달량이 매우 큰 것으로 제시되었는데, 본 연구에서와 같이 인공 캐비티를 가지는 경우에는 초기 성장시에 기포 바닥면이 가열면이 아니므로 열전달량이 충분하지 않아 발생하는 것으로 판단된다. 따라서, 기포의 성장특성이 가열면의 열전달 기구에 크

게 의존함을 명확하게 이해할 수 있다.

또한, 인공 캐비티를 가지는 일정 열유속 조건에서는 물질에 상관없이 기포의 성장 특성이 거의 일정한 것으로 나타나고 있다.

이러한 결과는 그림 9에서의 30도, 60도, 및 90도에서도 동일하게 나타난다.

각 경사각 별로 기포의 성장률을 분석하기 위하여 R11의 실험결과를 이용하여 성장률을 그림 10-13에 나타내었다.

그림 10에서와 같이 0도의 가열조건에서는 초기에는 기존의 연구들과 유사한 시간의 1/2승에 비례하여 성장하고, 열적 성장 영역에서는 기존의 연구들에서 제시하는 시간의 1/5승에 비하여 조금 높은 시간의 0.226승에 비례하여 성장함을 알 수 있다.

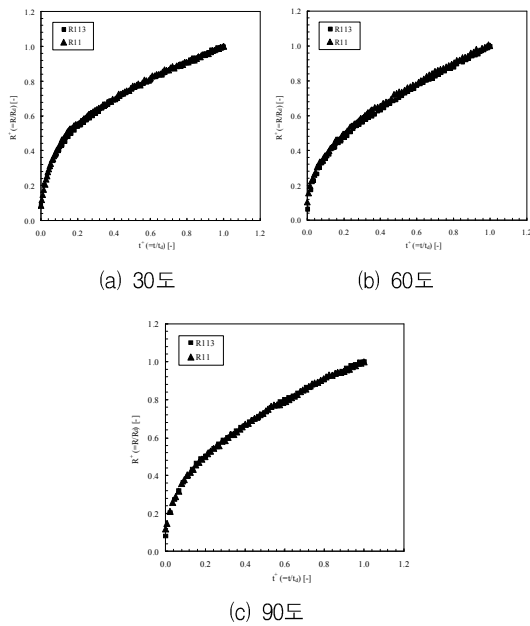


그림 9. R11과 R113의 경사각별 기포 성장 특성

가열면이 30도 경사각을 가지는 경우에는 초기에는 시간의 0.474승에 비례하여 열적 성장 영역에서는 시간의 0.381승으로, 60도와 90도의 가열면의 경우에는 초기에는 0.341에서 0.348승에 비례하여, 열적 성장 영역에서는

0.434에서 0.444승에 비례하여 성장하는 것으로 나타난다.

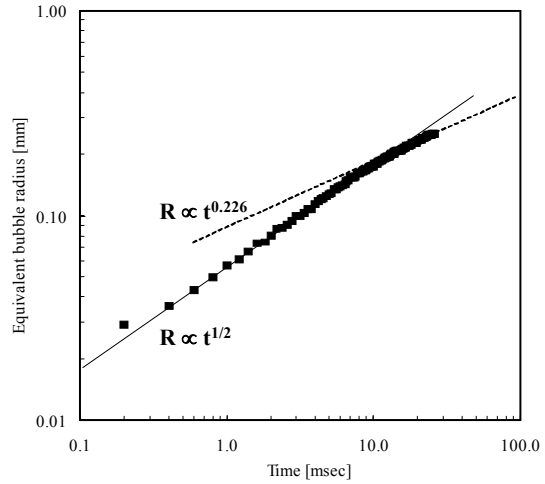


그림 10. 0도에서의 시간에 대한 기포 성장률

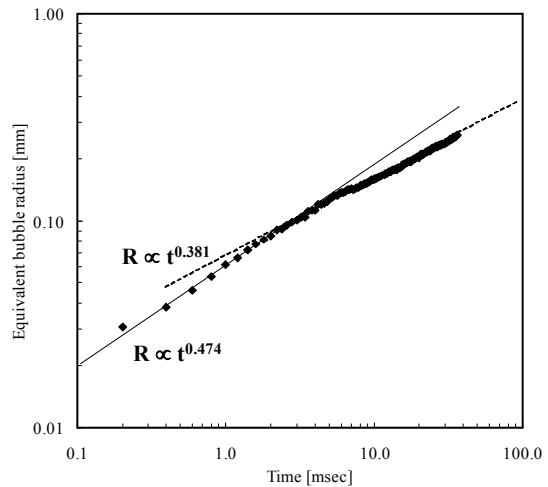


그림 11. 30도에서의 시간에 대한 기포 성장률

30도에서는 기포의 슬라이딩이 미미하지만, 60도 이상에서는 기포의 슬라이딩이 실제로 기포의 성장 특성을 완전히 변화시키고 있음을 알 수 있다. 이러한 성장 특성은 Lee et al.<sup>(9)</sup>의 레이놀즈 수 2.9에서 8.3까지의 마이크로 채널 흐름비등에서의 결과로부터 제시된

바와 같이 기포의 성장률이 영역의 구분없이 시간의 0.4승 정도에 비례하는 것과 일치하는 경향을 명확하게 제시하고 있는 것이다.

마지막으로, 가열면 위에서의 기포의 슬라이딩에 의한 시간에 대한 이동속도를 기준으로 하여 Re수로 표시하면 30°, 60°, 및 90°의 경우에 2.034, 2.590, 및 5.314 정도인 것으로 나타났는데, 이러한 Re수는 Lee et al<sup>(9)</sup>의 실험역역과 매우 유사한 것을 알 수 있다.

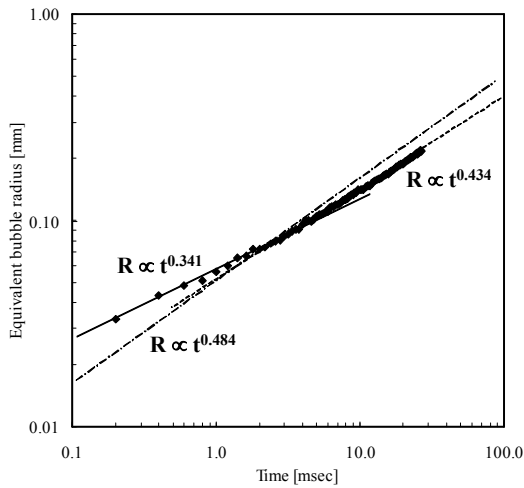


그림 12. 60도에서의 시간에 대한 기포 성장률

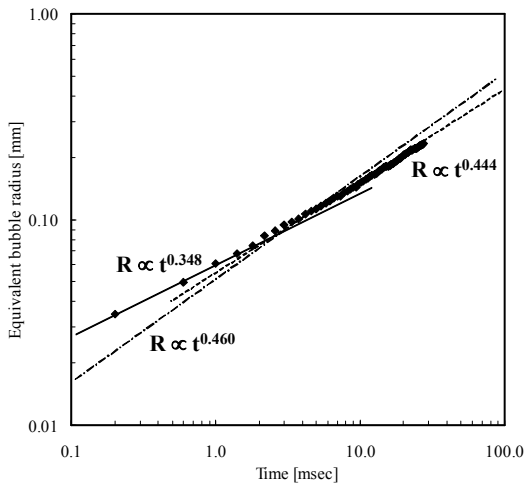


그림 13. 90도에서의 시간에 대한 기포 성장률

#### 4. 결 론

MEMS 기술을 이용하여 제작된 미세 히터와 히터의 중앙에 인공적인 캐비티를 제작하여 포화 핵비등 조건에서 기포의 성장 특성을 일정 열유속 가열 조건에서 실험적으로 규명하였다.

인공 캐비티를 가지는 경우에도 가열 벽면의 조건이나 물질에 관계없이 기존의 연구결과와 유사한 거의 일정한 성장률 특성을 보여줌을 알 수 있었다.

다만, 인공 캐비티의 존재로 인하여 발생하는 초기 가열시의 열전달량의 부족에 대해서는 추후의 상세한 실험이 필요할 것을 판단된다.

또한 실제 열전달 시스템에서 발생하고 있는 다양한 가열면의 경사각에서의 기포의 성장 특성을 제시하기 위하여 30°, 60°, 및 90°에서 실험을 수행하여 제시하였다.

가열면의 경사각이 증가함에 따라서 기포의 가열면 위에서의 슬라이딩으로 인하여 풀 핵비등시에 비하여 기포의 성장률이 매우 증가하고, 이러한 증가 특성은 저 Re수 조건에서 수행된 흐름 비등에서 제안하는 결과와 매우 일치함을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 충주대학교의 2008년도 신입교원 학술연구과제 연구비지원으로 수행되었음.

#### 참고문헌

1. Mikic, B. B., Rohsenow, W. M. and Griffith, P. 1970. On Bubble Growth Rates. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 13, pp. 657-666.
2. Lee, H. C., Oh, B. D., Bae, S. W., and Kim, M. H. 2003. Single Bubble Growth in Saturated Pool Boiling on a Constant Wall Temperature Surface. Int. J. of

- Multiphase Flow, Vol. 29(12), pp. 1857-1874.
3. Kim, J., Oh, B. D., and Kim, M. H. 2006. Experimental Study of Pool Temperature Effects on Nucleate Pool Boiling. *Int. J. of Multiphase Flow*, Vol. 32, pp. 208-231.
  4. Lee, H. C., Kim, J., Oh, B. D., and Kim, M. H. 2004. Single Bubble Growth in Saturated Pool Boiling of Binary Mixtures. *Int. J. of Multiphase Flow*, Vol. 30(6), pp. 697-710.
  5. Githinji, P. M. and Sabersky, R. H. 1963. Some Effect of the Orientation of the Heating Surface in Nucleate Boiling. *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 85, pp. 379.
  6. Chen, L. T. 1978. Heat Transfer to Pool Boiling Freon from Inclined Heating Plate. *Lett. Heat Mass Transfer*, Vol. 5, pp. 111- 120.
  7. Jung, D. S., Venart, J. E. S., and Sousa, A. C. M., 1987. Effects of Enhanced Surfaces and Surface Orientation on Nucleate and Film Boiling Heat Transfer in R-11. *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 30, pp. 2627- 2639.
  8. Chang, J. Y. and You, S. M. 1996. Heater Orientation Effects on Pool Boiling Micro-porous-enhanced Surfaces in Saturated FC-72. *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 118, pp. 937-943
  9. Lee, J., Cho, K., Song, I. S., Kim, C. B., and Son, S. Y. 2003. Microscale Bubble Nucleation from an Artificial Cavity in Single Microchannel. *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 125, pp. 545.