

인공 캐비티를 가진 히터를 이용한 가열면의 채널 높이가 풀비등시 기포성장에 미치는 영향에 대한 기초연구

김정배*, 박문희**, 전우철***

*충주대학교 에너지시스템공학과(jeongbae_kim@cjnu.ac.kr),
**대구도시가스 대성청정에너지연구소(mhpark65@korea.com),
***대구도시가스 대성청정에너지연구소(woofe72@korea.com)

Effect of channel height on Bubble growth under Saturated Nucleate Pool Boiling for Various Channel Height using Heater with Artificial Cavity

Kim, Jeong-bae* Park, Moon-hee** Jeon, Woo-cheol***

*Department of Energy System Engineering, Chungju National University(jeongbae_kim@cjnu.ac.kr),
**Daesung Institute for Clean Energy, Daegu City Gas(mhpark65@korea.com),
***Daesung Institute for Clean Energy, Daegu City Gas(woofe72@korea.com)

Abstract

Nucleate pool boiling experiments with constant heat flux condition were performed using pure R113 for various channel heights 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 channel height 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, and bubble shapes. 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 : 인공 캐비티(Artificial cavity), 채널 높이(Channel height), 일정 열유속(Constant heat flux), 단일 기포성장(Single bubble growth), 포화 핵비 등(Saturated nucleate pool boiling), 원형 히터(Circular heater)

투고일자 : 2010년 9월 1일, 심사일자 : 2010년 9월 14일, 게재확정일자 : 2010년 10월 20일
교신저자 : 김정배(jeongbae_kim@cjnu.ac.kr)

1. 서 론

태양열을 이용하여 증기를 만들기 위한 집열기들에서 발생하는 열전달 기구는 흐름비등의 핵비등 영역에 있다. 흐름비등에서의 많은 실험결과들이 제시되어 있고, 이러한 실험 결과로부터 얻어진 다양한 상관식들이 널리 이용되고 있기도 하다.

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⁽¹⁾의 결과와 동일하게, 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⁽²⁾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⁽³⁾은 Lee et al⁽⁴⁾의 부족한 초기성장 영역에서의 많은 실험결과를 이용하여 초기성장영역에서 기포반경이 시간의 1/2에서 2/3 승에 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 열교환기들은 다양한 가열면의 각도 조건에서 이루어지고 있기도 하다. Githinji and Sabersky⁽⁵⁾, Chen⁽⁶⁾, Jung et al⁽⁷⁾

and Chang and You⁽⁸⁾등이 다양한 가열면의 조건에 대한 비등열전달 실험을 수행하였지만, 단일 기포의 성장에 대해서는 명확한 열전달 기구의 특성을 제시하지 못하였다. 또한 김정배⁽⁹⁾는 본 연구와 동일한 실험장치로 실제 비등 가열 조건에서 가장 널리 적용되는 가열면 경사각에 따른 비등 특성을 제시하였다. 그리고 Kim et al⁽¹⁰⁾은 가열면의 경사각에 따른 기포의 성장과 함께 기포의 형상 및 다양한 실험결과들을 제시하였다.

이러한 모든 연구들이 실제 태양열 시스템을 포함한 비등 가열 조건에서 적용하는 코일형 나관 열교환기 등의 적용을 위한 관의 간격 효과와 혹은 실제 채널에 발생하는 기포의 성장 특성을 명확하게 제시하지 못하고 있다.

실제로 코일형 나관 열교환기를 설계시에 기존의 비등열전달 계수를 활용하여 설계를 수행하게 된다. 비등열전달 계수의 기본 형태는 핵비등에서의 단일기포의 성장률에 근거하여 만들어졌으므로, 코일형 열교환기를 적용할 경우에, 특히 열전달 면적을 증대시키기 위하여 관들 사이의 간격을 줄이게 될 경우에 핵비등 특성이 어떻게 변화하게 될 것인가를 분석하는 것은 매우 중요하다.

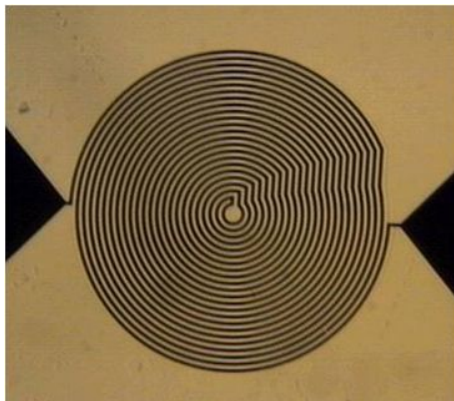
따라서, 본 연구에서는 인공 캐비티를 가진 미세크기의 히터를 이용하여 대기압 하의 포화상태 풀 핵비등 조건에서 가열면의 수직 방향으로 판을 설치하고, 판과 미세히터 사이의 간격을 조절하는 방식으로 채널 효과를 만들고 냉매 R113 (포화온도 47.6°C, 풀온도 47.0°C)를 이용하여 단일기포의 성장에 대한 실험을 다양한 5mm, 2mm, 1mm, 그리고 0.5mm의 채널 높이에 대하여 수행하고 이의 결과를 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 불확실성해석

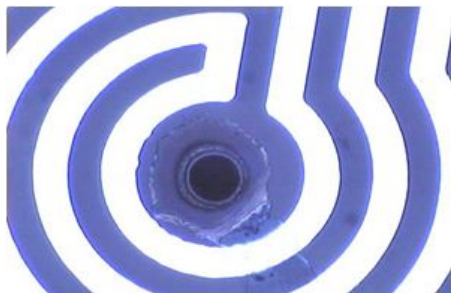
2.1 실험장치

가열벽면을 일정 열유속으로 유지하면서

중앙에 인공적인 캐비티를 가진 원형의 미세 히터를 이용하였는데, 미세히터는 유리 웨이퍼 위에 VLSI 기술을 이용하여 제작되었다. 그림 1의 미세히터는 가열라인의 높이가 거의 $0.4\mu\text{m}$ 이고, 폭은 $10\mu\text{m}$ 이고 가열 라인 사이의 거리도 또한 $10\mu\text{m}$ 로 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 1mm 이고, 원형 실린더 형태의 인공 캐비티의 크기는 지름 $14.5\mu\text{m}$, 깊이가 $35\mu\text{m}$ 이었다. 캐비티로부터 히터 가열 라인의 왼쪽으로의 간격은 $15\mu\text{m}$ 이었고, 오른쪽으로는 $18\mu\text{m}$ 이었다. 히터의 전기적 저항은 $8.404\text{k}\Omega$ 이었다.

일정 열유속 조건은 전압 데이터를 100kHz

의 속도로 측정하여 전체 실험동안 $\pm 2\%$ 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 150W 의 냉온 조명을 사용하였다. CCD 카메라는 Redlake사의 HG-100K 카메라를 이용하였고, 가열면에서 성장하는 기포의 이미지는 초당 $5,000$ frames의 속도로 촬영하였다. 기포의 이미지를 확대 촬영하기 위하여 마이크로 렌즈를 이용하였다.

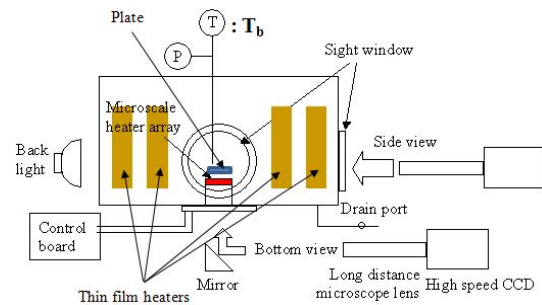


그림 2. 실험 장치도

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 얻어진 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, 윗쪽 반구와 아래쪽 반구의 체적으로부터 기포의 체적을 구하고 등가의 반경을 얻게 된다.

$$V = V_U + V_L = \frac{2}{3}\pi B^2 A + \pi B^2 \left[D - \frac{D^3}{3E^2} \right] = \frac{4}{3}\pi R_{eq}^3 \quad (1)$$

여기서, A, B, C, D, E는 그림 3에 표시되어 있다. 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.

$$V = V_U + V_L = \frac{4}{3}\pi R_{eq}^3 = \frac{4}{3}\pi R^3 \quad (2)$$

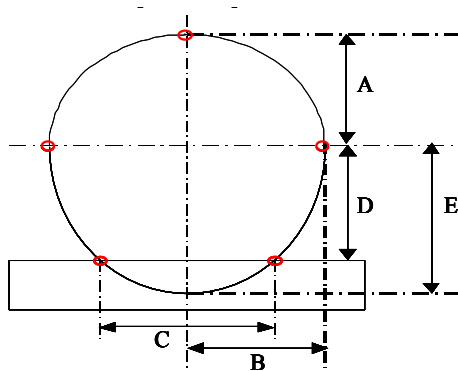


그림 3. 기포 체적을 결정하기 위한 기포 형상

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. 얻어진 이미지로부터 본 실험에서는 $1000\mu\text{m}$ 가 147 픽셀에 해당함을 알 수 있었다. 기포의 이미지에서 한 픽셀에 해당하는 길이는 $6.8027\mu\text{m}$ 이다.

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

3. 실험결과 및 고찰

실험에서는 판과 히터 사이의 간격을 5mm, 2mm, 1mm, 및 0.5mm에 대하여 동일하게 핵비등 영역에 해당하는 25.5kW/m^2 (DC 전압; 13.0V)의 일정 열유속으로 실험을 수행하였다. 채널 높이는 기존의 R113에 대한 기포 성장 실험에서의 기포 높이를 고려하여 선정하였다.

그림 4는 R11에 대하여 촬영된 기포의 이미지들을 보여주고 있다. 촬영된 이미지로부터 0도의 경우에는 가열면에 수직인 축을 중심으로 대칭적인 형상을 보여준다. 5mm와 2mm에서는 기포의 이탈(departure)이 발생하고, 이탈 시간은 각각 29msec와 22.8msec이었다. 채널의 효과로 인하여 가열면의 열적 경계층의 교란이 2mm에서 일부 발생하여 기포의 형상의 변화는 없으면서 이탈 시간이 줄어들 수 있다.

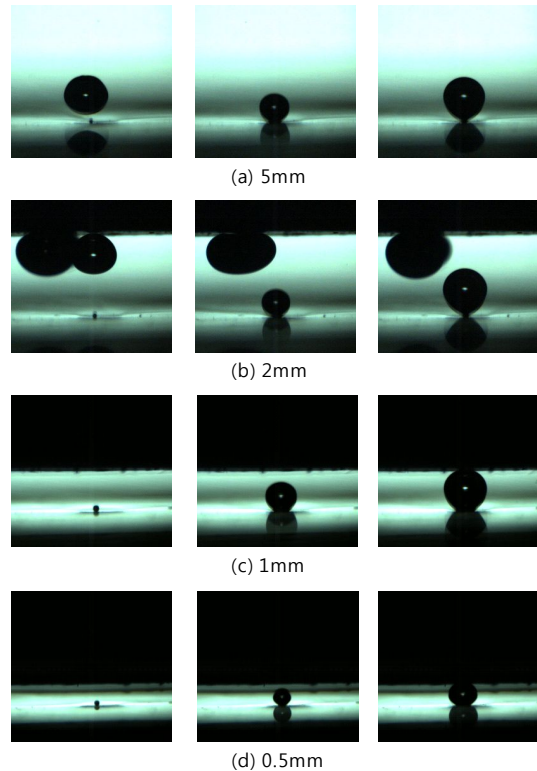


그림 4. 채널 높이별 촬영된 기포 형상

1mm와 0.5mm의 경우에는 각각 20.6msec와 5.8msec부터 기포의 상단부가 채널 벽에 접촉하게 되고, 이후에는 바로 슬러그의 형태로 기포의 형상이 변화됨을 알 수 있었다.

1mm와 0.5mm에서는 상단부 채널 벽에 부착되기 직전까지의 채널 높이별 시간에 따른 기포 반경을 그림 5에 나타내었다. 그림에서와 같이 대체적으로 채널 높이에 따른 기포의 크기가 크게 차이가 없는 것으로 나타나고 있다. 5mm에서의 실험결과를 기존의 Kim et al⁽³⁾와 Lee et al⁽⁴⁾의 실험 결과와 동일하게 무차원화하여 비교하여 그림 6에 나타내었다. 기존의 결과들과 기포의 성장률은 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다.

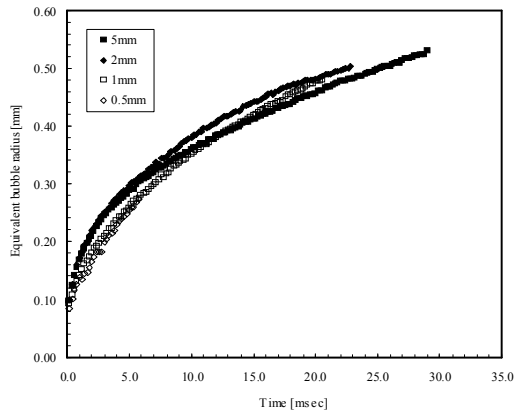


그림 5. 채널 높이별 시간에 따른 기포 반경

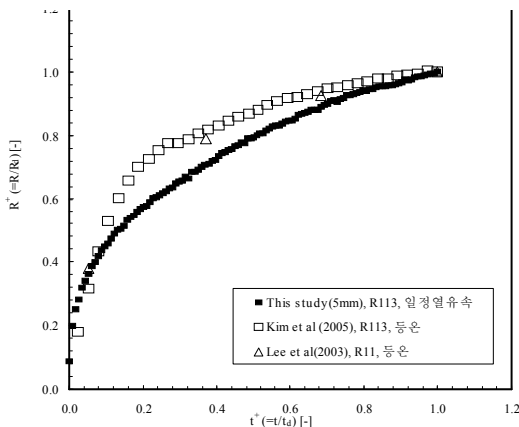


그림 6. R113의 경사 조건별 시간에 따른 기포 반경

무차원화는 이탈반경과 이탈시간을 이용하여 수행되었다.(식 (3) 참조)

$$R^+ = \frac{R}{R_d}, \quad t^+ = \frac{t}{t_d} \quad (3)$$

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

그림 7은 기포 성장 초기의 채널 높이별 기포의 반경을 보여주고 있는데, 채널의 존재와 그 높이에 따라서 히터 가열면에 생성되는 열경계층의 변화로 인하여 초기의 기포의 크기가 채널의 높이가 작아짐에 따라 감소됨을 알 수 있다.

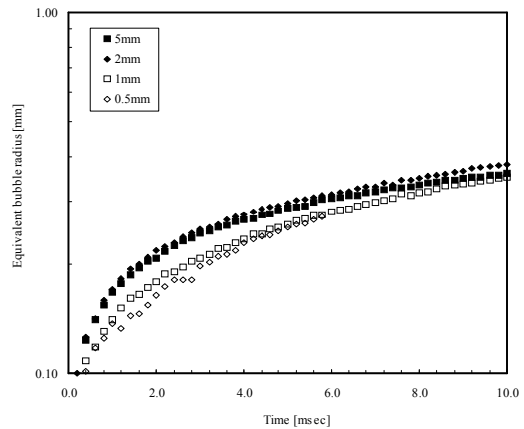


그림 7. 채널 높이별 초기 성장 특성

그림 8은 기포 성장 후기의 채널 높이별 기포의 반경을 보여주고 있는데, 0.5mm 간격에서는 이미 슬러그로 변하여 그 반경이 표시되어 있지 않으며 1mm에서는 오히려 시간에 따른 기포의 반경 증가가 상대적으로 크게 나타난다. 이러한 현상의 원인은 성장 초기에는 이전 기포에 의해 열경계층이 교란되어 기포에 충분한 열이 공급되지 못하지만, 후기에는 채널의 존재로 인하여 대부분의 기포가 상대적으로 열경계층 내부에 존재하게 된 것으로 판단된다.

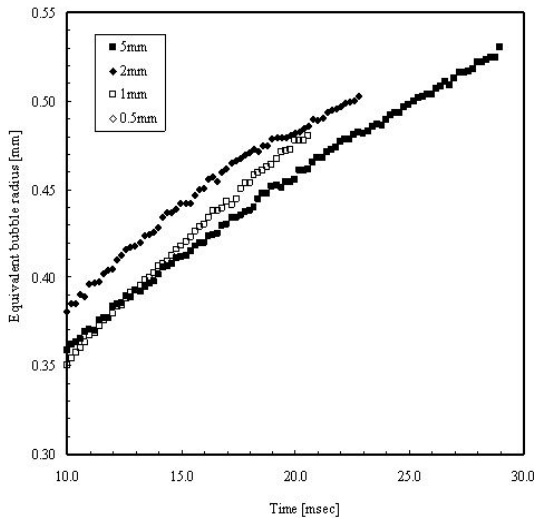


그림 8. 채널 높이별 후기 성장 특성

이와 같이 열경계층의 교란이 발생하여 기포의 성장특성이 변화하게 된다면, 그림 4와 같이 촬영된 사진으로부터 그림 3과 같이 고려하여 측정된 기포의 형상이 시간에 따라서 변화가 발생하게 될 것을 예측할 수 있다.

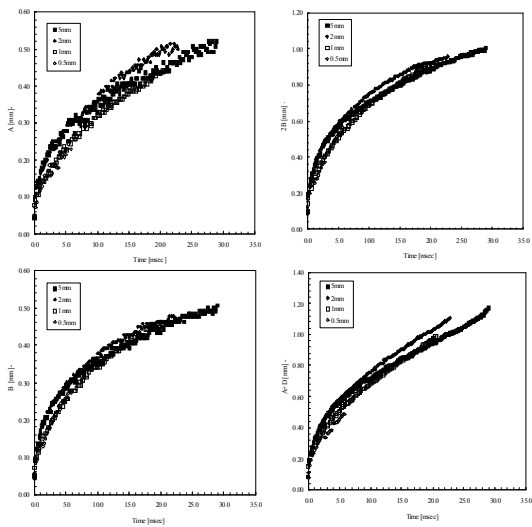


그림 9. 채널 높이별 기포의 위치별 크기

그림 9는 그림 3의 기포의 형상 중에서 2B, A+D, B와 A를 나타내고 있는데, 채널의 높

이에 따른 아주 명확한 큰 차이를 나타내고 있지는 않다. 다만, 그림 10에서와 같이 그림 3의 C에 해당하는 기포의 히터 가열면과의 접촉 직경이 채널의 높이가 감소함에 따라 급격하게 증가하는 것으로 나타난다. 또한 0.5mm 간격에서도 1mm와 같은 증가 경향을 보이지만 초기에 슬러그로 변함에 따라 후기의 경향이 없어 명확하게 나타나지는 않는다. 채널의 존재와 그 높이에 따라 기포의 형상은 상부보다는 하부의 기포 형상에 크게 작용함을 보여 주는데, 이러한 결과는 그림 9에서와 같이 기포의 최대 크기인 A의 길이가 다른 기포 형상에 비하여 채널 높이의 효과가 나타나고 있음을 알 수 있다.

따라서, 1mm에서의 후기 기포 성장률의 증가는 열경계층의 교란과 함께, 기포가 가열면과 접촉하는 길이가 채널의 효과로 후기에 상대적으로 증가하면서 열공급의 증가 효과인 것으로 판단된다. 기존의 연구결과⁽¹⁰⁾에서 제시한 성장률 식과 큰 차이를 나타내지 않아, 기존의 비등열전달계수 상관식을 수정하지 않아도 될 것으로 판단된다. 다만, 슬러그로 기포가 변화된 이후의 열전달 현상에 대한 부분은 다른 형태의 연구가 수행될 필요성이 있음을 알 수 있다.

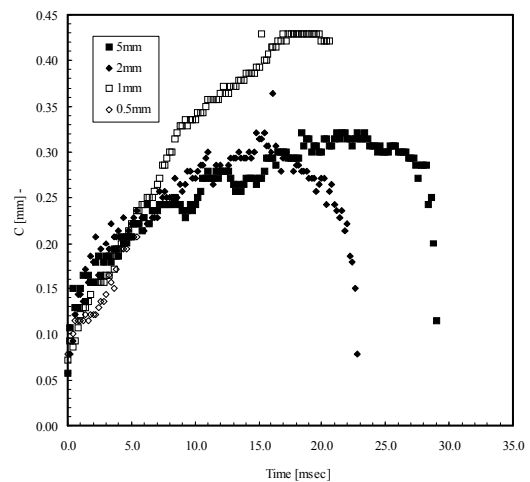


그림 10. 채널 높이별 기포의 접촉길이

4. 결 론

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

인공 캐비티를 가지는 경우에도 가열 벽면의 조건이나 물질에 관계없이 기존의 연구결과와 유사한 거의 일정한 성장률 특성을 보여줌을 알 수 있었다. 또한 실제 열전달 시스템에서 발생하고 있는 다양한 채널의 높이별 기포의 성장 특성을 제시하기 위하여 5mm, 2mm, 1mm, 및 0.5mm에 대하여 실험을 수행하여 제시하였다.

가열면에 존재하는 채널의 높이는 가열면의 열경계층의 교란과 전체적인 유동장 자체의 압력도 변화시켜 기포의 형상과 기포의 성장특성에 영향을 줄 수 있다. 다만, 명확하게 채널 높이의 영향을 분석하기에 본 실험에 대한 상당한 추가 실험이 필요함을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 신재생에너지연구사업인 대구도시가스(주) 주관의 “200kW급 타워형 태양열 발전 시스템 기술개발”(과제번호: 2008-N- SO12-P-01)의 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

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. *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.
10. 김정배. 2009. 인공 캐비티를 가진 히터를 이용한 가열면 경사각에 따른 포화상태 풀 핵비등 열전달 기초연구. *한국태양에너지 학회 논문집*, Vol. 29, No. 4, pp. 7-14.
11. Kim, J., Kim, H. D., Lee, J., Kwon, Y. C., Kim, J. H., and Kim, M. H. 2006. Experimental Study on Heating Surface Angle Effects on Single Bubble Growth. *J. of Mechanical Science and Technology*. Vol. 20, No. 11, pp. 1980-1992.