

< 논문 >

포화상태 풀비등시 단일기포의 성장에 관한 연구

김정배* · 이한춘** · 오병도*** · 김무환†
 (2004년 3월 16일 접수, 2004년 11월 25일 심사완료)

Study on the Single Bubble Growth During Nucleate Boiling at Saturated Pool

Jeongbae Kim, Han Choon Lee, Byung Do Oh and Moo Hwan Kim

Key Words : Pool Nucleate Boiling(풀핵비등), Single Bubble(단일기포), Bubble Growth(기포성장), Microscale Heater(미세히터), Initial Growth Region(초기성장영역), Thermal Growth Region(열적성장영역)

Abstract

Nucleate boiling experiments on heating surface of constant wall temperature were performed using R113 for almost saturated pool boiling conditions. A microscale heater array and Wheatstone bridge circuits were used to maintain a constant wall temperature condition of heating surface and to measure the heat flow rate with high temporal and spatial resolutions. Bubble images during the bubble growth were taken as 5000 frames per second using a high-speed CCD camera synchronized with the heat flow rate measurements. The bubble growth behavior was analyzed using the new dimensionless parameters for each growth regions to permit comparisons with previous experimental results at the same scale. We found that the new dimensionless parameters can describe the whole growth region as initial and later (thermal) respectively. The comparisons showed good agreement in the initial and thermal growth regions. In the initial growth region including surface tension controlled, transition and inertia controlled regions as divided by Robinson and Judd, the bubble growth rate showed that the bubble radius was proportional to $t^{2/3}$ regardless of working fluids and heating conditions. And in the thermal growth region as also called asymptotic region, the bubble showed a growth rate that was proportional to $t^{1/5}$, also. Those growth rates were slower than the growth rates proposed in previous analytical analyses. The required heat flow rate for the volume change of the observed bubble was estimated to be larger than the heat flow rate measured at the wall. Heat, which is different from the instantaneous heat supplied through the heating wall, can be estimated as being transferred through the interface between bubble and liquid even with saturated pool condition. This phenomenon under a saturated pool condition needs to be analyzed and the data from this study can supply the good experimental data with the precise boundary condition (constant wall temperature).

기호설명

A :	기포 형상 변수	[mm]
B :	기포 형상 변수	[mm]
C :	기포 형상 변수	[mm]

* 한국에너지기술연구원 신재생에너지연구부

** 엘지전자 DA 연구소

*** 포항공과대학교 기계공학과 연구원

† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : mhkim@postech.ac.kr

TEL : (054)279-2165 FAX : (054)279-3199

C_{p_l} :	액체 비열	[J / kgK]
D :	기포 형상 변수	[mm]
E :	기포 형상 변수	[mm]
h_{fg} :	증발 잠열	[J / kg]
k_l :	액체 열전도율	[W / mK]
Ja :	Jakob 수	[-]
\dot{m} :	증발 질량 유량	[kg / sec]
ΔP :	압력차 ($P_v - P_\infty$)	[Pa]
P_v :	증기압력	[Pa]
P_∞ :	주위압력 (시스템 압력)	[Pa]

\dot{q} :	열전달율	[W]
\dot{q}_c :	특성 열전달율 크기	[W]
\dot{q}_{latent} :	잠열 열전달량	[W]
$\dot{q}_{conduction}$:	전도 열전달율	[W]
\dot{q}^+ :	무차원 열전달율	[-]
r :	기포 반경 방향	[mm]
R :	기포 반경	[mm]
R_c :	특성 기포 반경 크기	[mm]
R_d :	기포 이탈 반경	[mm]
R_{eq} :	등가 기포 반경	[mm]
R_{ref} :	기준 기포 반경 크기	[mm]
R^+ :	무차원 기포 반경	[-]
t :	시간	[sec]
t_c :	특성 시간 크기	[sec]
t_{ref} :	기준 시간 크기	[sec]
t^+ :	무차원 시간	[-]
T :	온도	[K]
T_c :	특성 온도 크기	[K]
T_b :	기포 주위의 액체 온도	[K]
T_{sat} :	포화 온도	[K]
T_{wall} :	가열 벽면의 온도	[K]
ΔT :	벽면 과열도 ($T_{wall} - T_{sat}$)	[K]
v_c :	특성 속도 크기	[m/sec]
V :	기포의 체적	[m ³]
V_U :	기포 상부의 체적	[m ³]
V_L :	기포 하부의 체적	[m ³]
그리스 문자		
α :	액체 열확산도	[m ² /s]
ρ_l :	액체 밀도	[kg/m ³]
ρ_v :	기체 밀도	[kg/m ³]
σ :	액체 표면 장력	[N/m]
θ :	접촉각(Contact angle)	[°]

1. 서 론

플렉비등에 대한 연구는 비등 현상의 전체의 열전달 특성의 이해를 위해서 매우 중요하다. 플렉비등 현상에 대한 이론적인 접근은 기포와 주위 액체의 경계(Interface)에서 복잡한 모델링을 요구하기 때문에, 이전의 플렉비등에 관한 연구들은 대부분 실험적인 방법에 의존하였다. 특히 부분 핵비등(Partial nucleate boiling)에 대한 이전의 연구

들은 대부분이 가열벽면의 열유속을 일정하게 제어하면서 풀의 온도(과열, 포화 그리고 과냉 상태); 중력, 벽면과열도 그리고 작동유체의 영향등에 관한 것이었다. 플렉비등에 대한 많은 이전의 연구들이 인용하는 포화상태에 대한 Han & Griffith⁽²⁾ 그리고 Cole & Shulman⁽³⁾의 결과는 동일한 열유속 조건에서 수행된 일련의 결과에서 조차 기포 반경에 대한 규칙적인 반복성을 보여주지 못하였는데, 국소 가열량이 기포의 성장 기간 중 특히 생성 시간 근처에서 가열 조건을 일정하게 유지하기 위해서는 마이크로 초 이내로 제어되어야 하기 때문이다. 이러한 요구 조건이 이전의 연구 결과들의 불규칙한 거동과 연관성이 있다고 판단된다.

최근에 Rule & Kim⁽⁴⁾과 Lee et al⁽⁵⁾는 매우 높은 시간과 공간 분해능을 가진 마이크로 스케일의 미세히터를 개발하였고, 개발된 히터를 이용하여 약 2MHz의 속도로 가열벽면의 온도를 일정할 수 있도록 제어할 수 있었고 가열벽면의 온도 유지를 위한 순간적인 열전달율을 측정하였다. 미세히터를 이용하여 Kim et al⁽⁶⁾과 Rule & Kim⁽⁴⁾은 가열벽면의 온도를 일정하게 제어하여 과냉 비등에 대한 중력의 효과를 실험하였다. Bae et al⁽⁷⁾등은 동일한 미세히터를 이용하여 기포 성장동안의 순간적인 열전달율을 측정하였고, 가열면 밑에서 촬영한 기포 사진을 이용하여 단일 기포의 거동을 분석하였다. 밑면에서 촬영된 기포 이미지는 기포 형상의 정확한 정보를 얻을 수 없기에 이전의 연구 결과들과 정량적인 비교를 수행할 수 없었다. 본 연구에서도 일정한 가열벽면 온도를 유지하고 기포가 성장하는 동안 가열벽면에서의 열전달율을 측정하기 위하여 동일한 방식의 미세히터를 이용하였다.

Rayleigh⁽⁸⁾는 기포 경계에서의 열전달이 없는 경우, 기포와 주위 액체사이의 운동량 상호작용에 의해 지배되는 구형 기포에 대한 운동 방정식을 유도하여 기포와 주위 액체 사이의 일정한 압력차를 가정하여, 초기 성장영역에서 기포 반경이 시간의 일승에 비례하는 결과를 보였다. 그러나 기포의 초기 성장영역을 명확히 정의하지 못하였다. Plesset & Zwick⁽⁹⁾ 그리고 Forster & Zuber⁽¹⁰⁾들은 기포 성장시 경계에 균일하게 과열된 액체의 열경계층의 존재를 가정하여 경계에서 온도구배를 유도하였다. Rayleigh 식을 기포 경계에서 온도구배를 이용하여 열경계층에서의 열전도로부터 유도하였다. Mikic & Rohsenow⁽¹¹⁾는 기포가 생성되기 이전의 대기기간(Waiting period)을 고려하여 기포 주위의 비균일 온도장을 구하고, 이에 따른 기포의 성장을 차원해석을 통해 해석적으로 예측하였다. 또한 Mikic et al⁽¹²⁾은 풀 내부에서 균일하게 과열된 액체

로 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 제시하기도 하였다. Robinson & Judd⁽¹⁾는 기포의 증기압 변화에 따른 기포 경계에서의 온도구배 변화를 주위 액체에 대한 에너지 방정식과 확장된 Rayleigh 방정식을 함께 수치 해석하여, 우선 기포의 성장 초기에 매우 빠른 성장율과 이에 따른 열전달율의 거동(Heat flow rate behavior)을 보여주었다. 또한 포화상태의 풀 조건에서도 기포 경계층을 통한 열전달에 의해 가열 표면 이외에도 기포 경계를 통해 열이 전달될 수 있음을 보였다. 이러한 효과는 Plesset & Zwick⁽⁹⁾와 Zuber⁽¹³⁾ 그리고 Mikic et al⁽¹¹⁾등의 초기 연구자들에 의해서도 또한 제안되었다. Robinson & Judd 는 기포 성장구간을 수치해석 결과로부터 성장초기에는 표면장력에 의해 지배되고(Surface tension controlled region), 반경이 증가함에 따라 압력 포텐셜에 의해 큰 관성력을 가지면서(Inertia controlled region) 성장하고, 반경이 어느 이상 커져 기포 증기압이 주위 액체의 압력과 거의 동일하게 될 때 액체와 기포 경계에 존재하는 온도 구배에 의한 열전달이 기포의 성장을 지배하게 됨을 보였다(Thermal growth region).

단일 기포의 성장에 대한 이전의 실험적인 연구들은 대부분 열유속을 일정하게 제어하면서 수행되었는데 Han & Griffith⁽²⁾는 물을, Cole & Shulman⁽³⁾은 N-Pentane 을 이용하여 기포의 성장 특성을 발표하였다. Sernas & Hooper⁽¹⁴⁾와 Hooper & Abdelmessih⁽¹⁵⁾들은 고속 카메라로서 물에 대한 기포의 초기 거동의 실험 결과를 발표하였다. Lee et al⁽¹⁶⁾은 본 연구와 동일한 미세히터와 초당 1000 장을 촬영할 수 있는 CCD 카메라를 이용하여 순수물질의 포화상태 풀핵비등시 가열벽면의 온도를 일정하게 제어하면서 실험 결과를 얻고, 이전 연구자들의 결과들과 비교하여 단일 기포의 열적 성장영역에서의 새로운 성장율의 특성을 발표하였다.

본 연구에서는 대기압 그리고 포화상태 풀(47 °C, 48 °C)에서 냉매 R113 (포화온도: 47.6 °C)을 이용하여 벽면을 72 °C로 유지하도록 제어하면서 핵비등 실험을 수행하였다. 실험에서 측정된 결과는 가열벽면에서 기포로 순간적으로 공급되는 열전달율과, 성장시 촬영된 기포 이미지들이다. 이미지로부터 얻어진 기포 형상에 대한 결과들은 이전 연구들과 동일한 기준 크기로서 비교하기 위하여 차원해석을 수행하고, 이를 통해 초기 및 열적 성장

영역에서의 기포 성장 거동을 분석하였다. 또한 벽면으로부터 공급되는 순간 열전달율과 고속 CCD 카메라를 이용하여 측면에서 촬영한 기포 사진을 분석하여 기포 성장과 열전달율과의 관계를 정량적으로 분석하였다.

2. 실험

2.1 실험장치 및 실험방법

가열벽면을 일정 온도로 유지하면서 열전달율을 측정하기 위하여 미세히터를 이용하였는데, 미세히터는 양면을 투명하게 가공한 유리 웨이퍼 위에 VLSI 기술을 이용하여 제작되었다. 먼저 열증착 방법을 이용하여 Ti/Pt 층(히터)을 만들고, 파워 라인으로 사용될 Ti/Au 층을 도포하였다.⁽⁶⁾ 미세히터는 2.7 mm × 2.7 mm 내에 0.27 mm × 0.27 mm 크기의 히터 96 개가 배열되어 있다. 본 실험에서 사용되어진 미세히터는 Kim et al⁽⁶⁾의 아이디어를 바탕으로 하여 삼성종합기술원(SAIT)에서 제작되었다. 미세히터 배열 내의 96 개 히터의 온도는 열선 풍속계에 적용되는 휘트스톤 브리지회로 96 개에 의해 개별적으로 조정된다. 실험에 앞서 20 ~ 80 °C 영역에 대해 2 °C 의 범위로 하여 히터의 표면 온도에 대한 히터의 저항치를 결정하는 실험을 수행하였다.⁽¹⁶⁾

각 히터의 발열량은 약 7.35 kHz 의 속도로 각 히터 당 16,000 개의 데이터를 12 bit 해상도로 계측 및 저장할 수 있는 데이터 수집장치를 이용하여 측정되었다. 계측 시작 신호는 고속 CCD 카메라에도 동시에 전달되어 영상 데이터가 히터의 발열량 데이터와 동기화되어(Synchronized) 저장된다.

Fig. 1 에는 실험장치에 대한 개략도를 보여 주고 있다. 미세히터는 주실험부의 한가운데에 설치하였다.

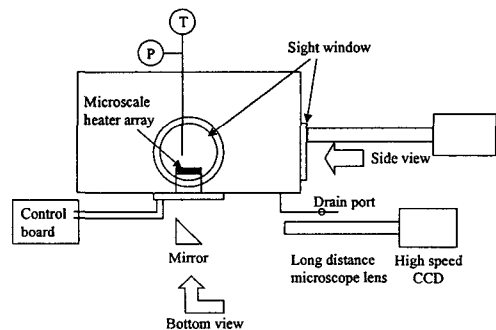


Fig. 1 Schematics of the experimental apparatus

주실험부의 측면과 밑면에서 기포이미지를 촬영할 수 있도록 설계하였으며, 밑면 촬영 시에는 알루미늄이 증착된 광학용 거울을 사용하였다. 그리고 챔버 내부 액체의 온도를 조절하기 위하여 챔버 바깥면에 10 개의 1.55 W/cm² 용량의 박막 히터를 부착하였다. 고속 CCD 카메라의 촬영시에 필요한 조명을 위해 150W 용량의 Cold light(Intralux, 6000-1)를 이용하였다. 기포의 이미지는 초당 5000 frame 의 속도로 CCD 카메라 (Redlake 사의 HG-100K, 최대성능: 100000 fps)를 이용하여 촬영하였다.

박막 히터에 의해 풀의 온도가 포화온도로 일정하게 유지되고, 설정된 온도를 유지하기 위해 미세히터에 계속 전원을 인가하여 가열벽면 위에서 기포의 생성(Inception), 성장(Growth) 그리고 이탈(Departure)의 규칙적이고 주기적인 거동이 정상상태에 도달하는 것을 확인한 후에 계측을 시작하였다. 본 연구에서 실험한 조건에서는 96 개의 미세히터 위에 한 개의 기포 만이 최대 4 개의 미세히터 위에 존재하는 것을 관찰하였다. 자세한 실험 기법은 Rule & Kim⁽⁶⁾과 Bae et al⁽⁷⁾ 및 Bae et al⁽¹⁷⁾의 논문에 기술되어 있다.

2.2 기포의 형상

본 연구에서는 단일 기포의 성장 거동을 측면에서 촬영한 기포 사진과 가열 벽면에서 공급된 열전달율을 상호 비교하여 분석하였다. 이때 기포의 촬영된 기포의 사진은 Fig. 2 와 같다. Fig. 2 의 이미지들로부터 기포 크기를 구하기 위하여 Fig. 2 에서의 기포 형상으로부터 Fig. 3 과 같이 수직으로는 축대칭의, 수평으로는 비대칭 구조의 기포 형상으로 가정하였다.

이러한 가정으로부터 Fig. 3 에 표시된 것과 같이 기포의 상부에 한점, 기포의 최대 길이 위치에 두점 그리고 가열벽면과의 접촉면에 두점의 위치를 일정한 픽셀 크기로 촬영한 사진에서 픽셀의 숫자 그리고 이미지상의 좌표값으로 기록하였다. 기포의 이미지 촬영과 순간적인 열전달율의 측정이 완료되면 일정 크기의 자를 기포가 촬영되었던 위치에 설치하고 동일한 픽셀 크기로 촬영한 사진에서 1000 μm 에 해당하는 픽셀 수를 측정하게 되면 기록된 좌표들로부터 Fig. 3 의 A, B, C, D 의 크기가 계산된다. A, B, C, D 의 크기를 이용하여 기포 형상 가정으로부터 상반구와 하반구의 체적은 다음과 같이 계산할 수 있으며, 이로부터 기포의 전체 체적을 구하고 등가의 반경을 계산하였다.

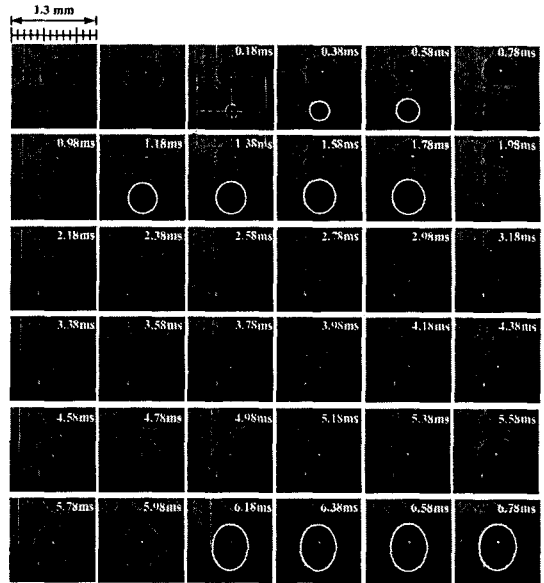


Fig. 2 Side view images during bubble growth

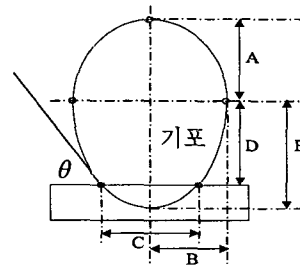


Fig. 3 Geometry of a truncated sphere bubble

$$V_U = \frac{2}{3} \pi B^2 A$$

$$V_L = \pi B^2 \left[D - \frac{D^3}{3E^2} \right], \quad E = \sqrt{1 - \frac{(C/2)^2}{B^2}} \tag{1}$$

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

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

만약 기포 경계에서 기포 주위 액체의 증발에 의해서만 기포의 체적 변화가 발생한다고 가정하면, 기포로 공급되는 열전달율과 기포 반경은 다음과 같은 관계가 성립하게 된다.

$$\dot{q} = \dot{m} h_{fg} = \rho_v h_{fg} \frac{dV}{dt} = 4\pi \rho_v h_{fg} R^2 \frac{dR}{dt} \tag{2}$$

여기에서 식 (2)의 양변을 시간에 대하여 적분하면 식 (3)과 같이 기포로 공급된 열전달율을 이용하여 기포의 등가 반경을 계산할 수 있다.

$$R = \left(R_{ref}^3 + \frac{3}{4\pi B^2 [3 - 2B] \rho_v h_{fg}} \int_{t_{ref}}^t \dot{q} dt \right)^{1/3} \quad (3)$$

2.3 불확실성

본 실험에서 측정하는 값들은 촬영된 이미지로부터 계산되는 기포 반경과 가열 벽면 온도를 일정하게 유지하기 위해 제어회로 상에서 인가되는 전압이다. 각 히터에 인가된 전압은 12 bit 해상도로서 측정되었고, 최대 전압은 12 V 이다. 전압을 디지털화 하는데 있어서 오차는 ± 0.0015 V 이다. 실험에서 기포가 생성되었을 때 최소 전압이 2 V 이었고, 이에 따라 전압 측정에 대한 최대 오차는 $\pm 0.075\%$ 가 된다.

기포 크기 측정의 기준은 0.01 mm 눈금을 가진 기준자를 사용하였다. 이를 기포가 있는 위치에 놓고 512x512 픽셀의 크기로 촬영한 사진에서 1000 μm 에 해당하는 픽셀 수가 197 개로 측정되었다. 따라서 1 픽셀이 5.0671 μm 가 되는데, 촬영된 사진에서 기포 크기를 측정할 때 ± 1 픽셀의 오차가 발생하므로 측정된 기포의 최소 지름이 0.2464 mm 이었다. 이리하여 기포 지름 측정에 있어서 최대 오차는 $\pm 1.35\%$ 가 된다.

가열 벽면인 미세히터는 OMEGA 사의 열전대 보정기를 이용하여 보정되어 0.53 $^{\circ}\text{C}$ 의 오차를 가지고 있는 열전대를 사용하여 보정하였다. 히터의 온도를 조절하기 위하여 전자회로 내에 0-512의 디지털 수에 따라 0-20 k Ω 의 변위를 가지는 디지털 가변저항을 사용하였다. 본 연구에서는 히터 온도의 변화폭을 60 $^{\circ}\text{C}$ 가 되도록 보정하였다. 디지털 조정숫자 1 에 대한 온도변화 폭은 0.12 $^{\circ}\text{C}$ 가 된다. 이에 따라 디지털 조정 숫자에 대한 미세히터 벽면 온도의 불확실성은 0.06 $^{\circ}\text{C}$ 가 된다. 따라서 벽면 온도의 불확실성은 보정에 사용된 열전대의 불확실성과 디지털 조정에 의한 불확실성을 합한 0.59 $^{\circ}\text{C}$ 가 된다.

3. 차원 해석

본 연구에서 측정된 기포의 등가반경을 다른 작동유체와 가열조건에서 수행된 기존 연구의 결과들과 동일한 크기의 길이와 시간으로 비교하기 위하여 차원 해석을 수행하였다.

가열벽면에서 성장하는 기포의 성장특성이 기

포내부 기체와 주위 액체 사이의 압력차(ΔP)에 의해 특성화될 수 있다고 가정하면, 특성 속도 크기는 다음과 같이 결정될 수 있다. 여기서 2/3 는 Mikic et al⁽¹¹⁾의 무차원 매개변수와의 비교를 위해 삽입한 것이다.

$$v_c = \frac{R_c}{t_c} = \sqrt{\frac{2 \Delta P}{3 \rho_l}} \quad (4)$$

특성 시간 크기는 기포 경계에 존재하는 주위액체의 온도 구배로 인한 열전달율(열전도)과 기포의 체적 변화에 해당하는 잠열에 의한 열전달량과의 비로서 아래와 같이 결정될 수 있다.

$$\frac{\dot{q}_{latent}}{\dot{q}_{conduction}} = \frac{\rho_v h_{fg} \frac{4}{3} \pi R^3}{k_l 4\pi R^2 \frac{\partial T}{\partial r}} = \frac{1}{3} \frac{\rho_v h_{fg} R_c^3}{k_l R_c^2 \frac{T_c}{R_c}} \frac{R^+}{R^{+2} \frac{\partial T^+}{\partial r^+}} = t_c \frac{R^+}{\frac{\partial T^+}{\partial r^+}}$$

$$t_c = \frac{1}{3} \frac{\rho_v h_{fg} R_c^2}{k_l T_c} = \frac{1}{3} \frac{\rho_v h_{fg} R_c^2}{k_l \Delta T} = \frac{1}{3} \frac{1}{Ja \alpha} R_c^2 \quad (5)$$

여기서 Ja 수는 포화상태 풀에서의 특성 온도 크기인 벽면 과열도 ($\Delta T = T_{wall} - T_{sat}$)를 이용하여 $(\rho_l C_p \Delta T) / (\rho_v h_{fg})$ 로 정의하였다. 따라서 식 (4)와 (5)로부터, 특성 반경과 시간 크기는 아래와 같이 표현된다.

$$R_c = \sqrt{\frac{27}{2} Ja \alpha} \sqrt{\frac{\rho_l}{\Delta P}}, \quad t_c = \frac{9}{2} Ja \alpha \frac{\rho_l}{\Delta P} \quad (6)$$

무차원의 기포 반경과 시간은 다음과 같다.

$$R^+ = \frac{R}{R_c}, \quad t^+ = \frac{t}{t_c} \quad (7)$$

Mikic et al⁽¹¹⁾은 기포의 운동이 아래와 같은 확장된 Rayleigh 방정식에 의해 지배된다고 가정하였다.

$$\Delta P = P_v - P_{\infty} = \rho_l R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \rho_l \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{R} \quad (8)$$

압력차와 우변 두번째 항을 비교하여 특성 속도 크기를 압력차는 Clausius-Clapeyron 관계식을, 온도차는 벽면 과열도를 이용하여 정리하면 아래와 같다. 식 (9)의 앞부분은 본 연구에서의 식과 동일함을 알 수 있다.

$$v_c = \frac{R_c}{t_c} = \sqrt{\frac{2 \Delta P}{3 \rho_l}} = \sqrt{\frac{2 \rho_v h_{fg} \Delta T}{3 \rho_l T_s}} \quad (9)$$

그리고 Plesset & Zwick⁽⁹⁾의 성장방정식을 특성 크기를 위해 이용, 정리하여 다음과 같은 특성 반경과 시간들을 제안하였다.

$$R_c = \frac{12 Ja^2 \alpha}{\pi \rho_v h_{fg} \Delta T} \sqrt{\frac{\rho_l R_d}{\rho_l T_s}}, \quad t_c = \frac{12 Ja^2 \alpha}{\pi \rho_v h_{fg} \Delta T} \sqrt{\frac{\rho_l R_d}{\rho_l T_s}} \quad (10)$$

위의 Mikic et al⁽¹¹⁾의 크기는, 가열벽면에서 기포의 생성 이후 초기 성장영역에서는 기포의 증기압이 기포 주위 액체의 압력보다 높은 상태에 있으므로, 본 연구에서 유도된 식 (6)에 압력차이를 Clausius-Clapeyron 관계식을 이용할 때 거의 동일한 관계식이 얻어짐을 알 수 있었다. 따라서 위의 식 (10)의 특성 반경과 시간의 크기는 대기기간 이후에 생성된 기포가 초기의 압력차를 가지고 성장하게 되는, 즉 관성이 지배하는 영역을 잘 묘사할 수 있을 것으로 판단된다.

열적 성장영역에서는 크기 매개변수로서 이탈시 기포 반경을 이용하였다. 이탈시점 근처에서는 반경방향의 가속도에 의한 운동량과 운동에너지에 의한 운동량을 무시할 수 있으므로 압력차는 이탈 반경과 관계되어질 수 있다.

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{R_d} \quad (11)$$

따라서 열적 성장영역에서의 특성 반경과 시간 크기는 식 (11)을 식 (6)에 대입하여 정리하면 식 (12)와 같이 표현된다.

$$R_c = \frac{\sqrt{27}}{2} Ja \alpha \sqrt{\frac{\rho_l R_d}{\sigma}} \quad (12)$$

$$t_c = \frac{9}{4} Ja \alpha \sqrt{\frac{\rho_l R_d}{\sigma}}$$

열전달율의 특성 크기는 식 (2)로부터 유도하였다.

$$\dot{q}_c = 4\pi \rho_v h_{fg} R_c^2 \frac{R_c}{t_c} \quad (13)$$

식 (12)의 특성 반경과 시간을 이용하면 무차원의 열전달율은 아래의 식과 같이 정리된다.

$$\dot{q}_c = 54 \frac{1}{\sqrt{3}} \pi \rho_v h_{fg} Ja^2 \alpha^2 \sqrt{\frac{\rho_l R_d}{\sigma}} \quad (14)$$

$$\dot{q}^+ = \frac{\dot{q}}{\dot{q}_c}$$

4. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 일정 벽면온도 조건에서 풀백비 등시 미세히터를 이용하여 가열벽면으로부터 기포로 공급된 열전달율을 측정하여 단일 기포의 성장 거동을 분석하였다. 열전달율은 약 7.35 kHz의 속도, 즉 0.136 msec 당 1 개씩 총 136 msec 동안 1,000 개의 데이터가 수집된다. Fig. 4는 47 °C 풀온도에서 벽면 온도가 72 °C 인 경우(Ja=32.4)에 측정된 열전달율을 각 주기별로 나타낸 것이다. 기포가 생성된 직후에 최대 25 %의 열전달율 오차를 보여주고 있다. 열전달율이 0.136 msec의 시간 해상도를 가지고 있기 때문에 기포 생성 시점 예측에 있어서 0.136 msec의 오차가 있고, 초기에는 열전달율 값의 증가율이 매우 크기 때문에 초기에 주기별로 큰 편차를 보이고 있다. 최대값 이후에는 열전달율 값들의 편차가 최대 4 %이었다. 이는 미세히터위의 동일한 위치에서 생성, 성장 그리고 이탈하는 기포들의 성장 거동이 거의 규칙적임을 의미하는 것이다.

Fig. 4에서와 같이 기포생성 직후에 열전달율은 급격히 증가하게 되는데, 측정된 무차원 열전달율의 시간에 대한 기울기는 약 16 이었다. 초기 성장영역동안 단위 특성 열전달율의 변화에 대한 특성 시간의 변화는 약 1/16 이 되고, 이러한 조건에 상응하는 차원 시간은 아래의 식과 같이 나타난다.

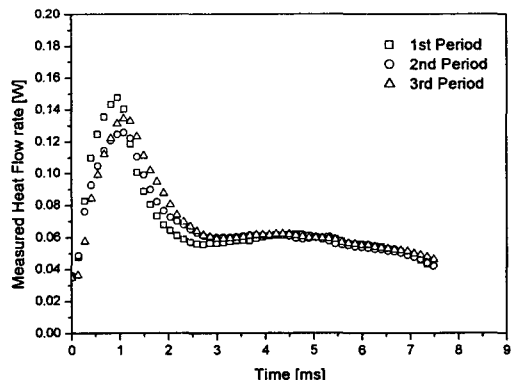


Fig. 4 Repeatability of the measured heat flow rate data

$$\Delta t = t_c \Delta t^+ = \frac{9}{4} Ja \alpha \frac{\rho_l R_d}{\sigma} \times \frac{1}{16} \quad (15)$$

윗 식을 이용하여, 단위 열전달율의 변화에 상응하는 시간은 약 3.4×10^{-6} sec (0.294 MHz)이었다. 그러므로, 가열 제어를 위한 시간 분해능은 열전달율의 빠른 증가동안 정확하게 미세히터의 제어를 유지하기 위해 이 값보다 커야만 한다. 본 연구에서는 4 MHz의 발진소자(Oscillator)를 클럭 신호(Clock signal)를 위해 적용하였다. 최대 클럭 속도는 본 연구의 A/D 시스템에서는 발진소자 속도의 절반인 2 MHz가 된다. 따라서 본 연구에서 가열 벽면으로 적용한 미세히터의 시간 제어 분해능이 서론에서 설명한 바대로 이전의 일정 열유속 핵비등 실험들과 달리 요구되는 조건을 충분히 만족함을 알 수 있었다.

측정된 기포의 이미지로부터 기포가 생성 직후에 반구에 가까운 형상을 하고 있었고, 약 0.6 msec가 지나면 기포가 거의 잘린 구의 형태임을 확인하였다. 초기 성장 영역 이후부터는 접촉각이 51° 로 거의 변하지 않으면서 잘린 구의 형상에서 서서히 위로 길어지면서 성장하다가 이탈함을 알 수 있었다.

촬영된 기포 이미지로부터 계산된 기포반경을 이용하여 확장된 Rayleigh 방정식에서의 우변의 각 항들의 값을 계산하여 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4와 Fig. 5의 결과로부터 측정된 열전달율이 최대가 되는 시간과 기포의 증기압이 기포 주위 액체의 압력과 거의 같아지는 시간이 일치함을 알 수 있었다. Robinson & Judd⁽¹⁾도 본 연구와 동일하게 기포내의 증기압이 시스템의 압력과 거의 동일해질 때 까지를 초기 성장영역으로 고려하였다.

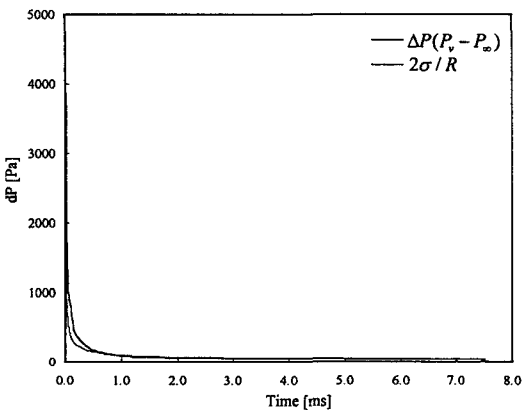


Fig. 5 Variations in the pressure difference to the growth time

위의 결과로부터 알 수 있듯이 R113의 경우, 초기 성장영역의 경우는 대략 1.0~1.2 ms 정도인 것으로 나타났다. 또한 1.0~1.2 ms의 시간은 무차원 시간으로는 약 140 정도에 해당한다.

기포의 등가 반경을 초기 성장영역만 나타내면 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서와 같이 초기 성장영역에서의 기포 반경은 작동유체별로 매우 차이가 크음을 알 수 있다. R113의 기포 반경이 제일 작으며 거의 동일한 Ja수(Ja=33)에서의 물의 경우는 물리적인 크기로 R113보다 최대 5배 정도 크음을 알 수 있었다. 각 작동유체별로 그래프에 표시된 기포반경의 시간은 본 연구에서 이용된 R113의 실험결과로부터 열전달율과 압력 거동에 의해 결정되어진 약 140 정도의 무차원 시간을 각각의 작동유체에서의 시간으로 환산하여 나타낸 것이다.

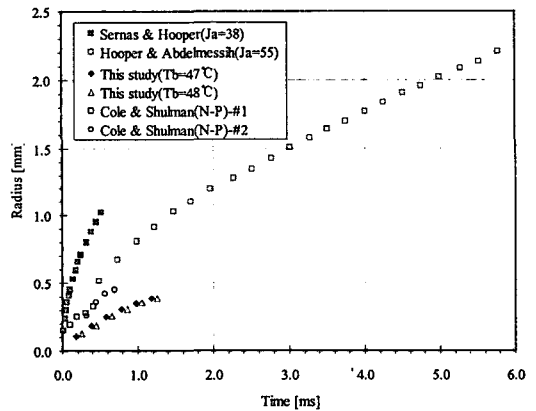


Fig. 6 Dimensional equivalent bubble radius to the growth time

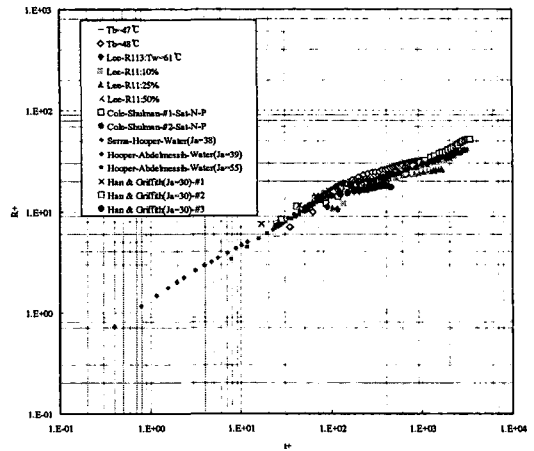


Fig. 7 Dimensionless equivalent bubble radius to dimensionless growth time

다만 Sernas & Hooper⁽¹⁴⁾의 경우는 그들이 실험한 전체 시간까지를 표시한 것이다.

위의 기포 반경들을 초기 성장영역의 해석에 적합한 식 (10)의 특성길이와 시간을 이용하여 무차원화하여 나타내면 Fig. 7 과 같이 나타난다. 그림에서과 같이 초기 성장 영역에서 기포의 성장율은 작동유체나 Ja 수에 관계없이 거의 일정한 성장율을 가지고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 8 에서와 같이 대기기간 이후에 생성된 기포는 열적 성장영역에 비해 상대적으로 높은 온도를 가지는 열경계층 영향을 더 크게 받게 될 것으로 초기 성장영역에서 기포의 성장율은 가열조건이나 작동유체에 크게 의존하지 않을 것으로 판단할 수 있다. 초기 성장영역에서 Ja 수와 작동유체에 상관없이 나타나는 거의 일정한 기포 성장율은 시간의 약 2/3 승에 비례하는 특성으로, Rayleigh의 해석적인 결과보다는 낮게 나타난다. 이는 Rayleigh⁽¹⁾의 해석이 기포와 시스템의 압력차를 일정하게 가정하여 나타나는 결과인데, 실제의 기포 성장시에는 압력차가 감소하여 일정하지 않으므로 성장율이 감소하는 것으로 판단할 수 있다.

Mikic et al⁽¹²⁾은 무차원 시간이 1 보다 아주 많이 작은 경우에 시간의 1 승에 비례한다고 하였는데 이 영역은 Robinson & Judd⁽¹⁾의 결과에 따르면 표면장력 지배영역인 것으로 판단된다. Robinson & Judd⁽¹⁾의 계산 결과로부터 구분된 영역은 표면장력 지배영역은 기포 생성에서 0.014 까지, 관성 지배영역은 0.014 에서 139.74 의 무차원 시간인 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서의 무차원 시간 0.1~140 까지의 영역은 초기 성장영역 중에서 관성 지배영역으로 판단할 수 있다. 본 연구에서 적용한 R113 의 표면장력 지배영역에서의 기포 거동을 촬영하기 위해서는 약 14 Mfps 의 성능이, 물의 경우는 약 2.4 Mfps 의 성능이 필요함을 알 수 있는데 이는 측정에 있어서 현실적으로는 해결하기 어려운 부분이다.

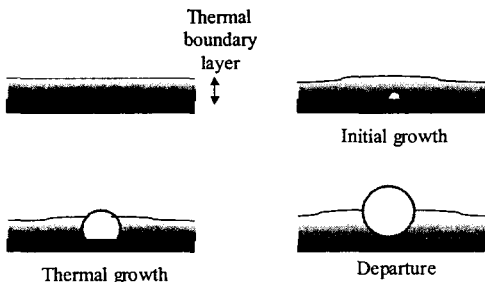


Fig. 8 Schematics of bubble growth with heating surface

열적 성장영역에서의 기포의 물리적인 크기도 초기 거동영역에서와 마찬가지로 작동유체별로 큰 차이가 있다. 열적 성장영역에서의 기포의 성장 특성을 식 (12)의 특성 길이와 시간을 이용하여 무차원화하면 아래의 Fig. 9 와 같다. Fig. 9 에서와 같이, 초기 성장영역에서와 마찬가지로 열적 성장영역에서의 기포 거동은 Ja 수와 작동유체에 관계없이 일정한 성장율을 보였다. 열적 성장영역에서의 성장율은 다소 차이를 보이고 있는데 이는 기포의 등가반경을 계산하는 방법의 차이로부터 야기됨을 알 수 있었다. 동일한 실험 결과에 대해서도 등가반경의 계산방법 차이로 인해 기포의 성장율이 시간의 0.143 승에서부터 0.349 승까지 다양하게 변화할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 미세히터가 열적 성장영역에서 측정된 열전달율의 기율 기로부터 본 연구에서 적용한 기포의 형상 가정과 등가반경 계산방법이 타당함을 검증하기도 하였다 (Kim et al⁽¹⁸⁾ 참조). 본 연구의 열적 성장영역에서의 기포 반경은 시간의 약 1/5 승에 비례하는 경향을 나타내는데, 이는 미세히터에서 측정된 열전달율의 결과인 Fig. 4 에서와 같이 측정된 열전달율이 1 msec 이후에 감소하는 경향과 일치함을 알 수 있다. 식 (2)로부터 열적 성장영역에서 기포의 성장율이 시간의 1/3 승보다 크거나 같으면 열전달율은 증가하거나 일정하여야 하는데, 열전달율의 측정결과에서와 같이 열적 성장영역에서 열전달율은 증가하지 않고 감소하는 경향을 보여주고 있는 것이다. 이러한 열적 성장영역에서의 열전달율이 시간에 따라 감소하는 경향은 일정 열유속 조건에서 물에 대해 수행한 Fontana⁽¹⁹⁾의 실험 결과와도 잘 일치한다.

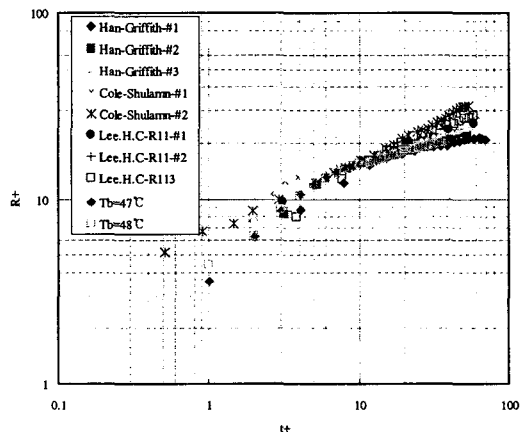


Fig. 9 Dimensionless equivalent bubble radius to dimensionless growth time

Fig. 10 은 미세히터에서 측정된 열전달율과 기포의 반경으로부터 식 (2)에 의해 계산된 열전달율(기포의 체적변화에 요구되는 열전달율)을 비교하여 나타내고 있다. 기포 체적변화에 요구되는 열전달율이 미세히터에서 측정된 열전달율보다 기포의 성장기간 동안 더 큼을 알 수 있다. 이러한 열전달율의 차이는 Fig. 11 과 같이 기포 성장을 위한 열전달 기구를 고려한다면 쉽게 이해할 수 있을 것이다. 가열벽면 위에서의 기포의 성장은 가열벽면으로부터 직접 기포로 전달되는 열, 가열벽면에서 기포 주변의 액체를 거쳐서 기포로 전달되는 열과 마지막으로 기포 상단부(Bubble cap)의 기포 경계에서 기포 주위의 액체로부터 기포로 전달되는 열에 의해 결정되어 진다. 기포의 체적변화로 인해 미세히터에서 측정하는 순간적인 열전달율이 앞의 두가지 전달기구의 열전달량을 측정 한 것이므로 (기포의 체적변화에 의해 기포주변의 온도분포가 변화하게 되고 이러한 온도분포의 변화가 미세히터에 영향을 주는 영역은 Fig. 11 에서와 같이 열경계층 두께 이하의 영역임), 두 열전달율의 차이인 부가적인 열은 기포의 바닥면이 아닌 기포의 상단부를 통해서 공급되는 양에 해당하는 것이다. 최근, Robinson & Judd⁽¹⁾는 확장된 Rayleigh 방정식을 이용하여 시간에 따른 기포의 증기압의 변화를 평가하였다. 기포 경계 근처에서의 비균일 온도장이 수치적으로 에너지 방정식을 풀어 계산되었다. 기포 내부 증기압의 빠른 감소 이후의 열적 성장영역에서도 온도구배가 기포 경계에서 발생하게 되고 열이 큰 비율로 공급되었다. 그러한 열전달 기구가 경계 냉각 효과이고, 측정된 열전달율과 요구되는 열전달율의 차이를 설명할 수 있다.

이러한 기포 주위의 온도구배 존재로 인한 열전달

은 결국 van Stralen et al⁽²¹⁾에 의해 제안된 relaxation 미세 액체막이론과 거의 동일한 것임을 알 수 있다.

Fig. 12 는 기포 성장을 위해 요구되는 전체 열에 대한 가열 벽면에서 기포로 공급된 측정 열전달율의 비를 보여준다. 그림에서 보듯이 기포의 생성이후 이탈시까지 미세히터에서 측정된 열전달량은 약 50 % 임을 알 수 있다. 가열벽면으로부터 기포로의 공급하는 양은 기포 성장을 위해 요구되는 전체열의 약 50%임을 의미하는 것이다. Koffman & Plesset⁽²⁰⁾은 기포의 성장기간 동안 최대 50 %의 열전달율이 기포 기저의 미세 액체막(Microlayer)의 증발에 의해 전달되어 질 수 있음을 보였다. 이와 달리 Fontana⁽¹⁹⁾는 기포 성장에 요구되는 열전달율에 비해 측정된 열전달율이 약 60~70 % 수준임을 보였다. 그러나 나머지의 열전달율은 기포의 가열벽면으로부터의 이탈 후에 비워진 공간을 매우게 되는 차가운 액체를 히터가 대기기간동안 가열하게 되고 이렇게 가열된 액체가 기포 성장에 따라 기포를 감싸게 될 것이므로, 기포 주위에 형성된 온도구배를 통해서 기포로 공급되는 것으로 예측하기도 하였다.

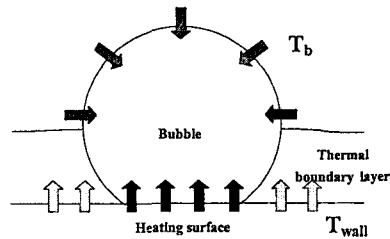


Fig. 11 Schematics of heat transfer mechanism for bubble growth on heating surface

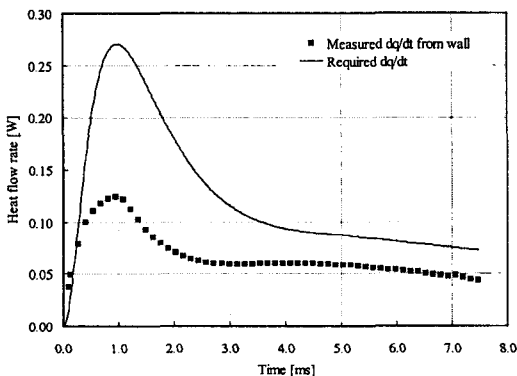


Fig. 10 Heat flow rate comparison between measured at wall and required

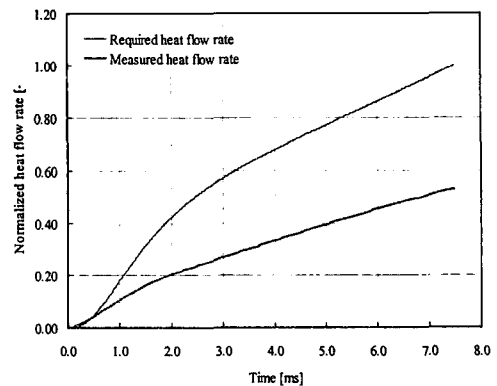


Fig. 12 Normalized heat flow rate comparison between measured at wall and required

미세히터에서 순간적으로 측정하는 열전달율은 기포가 성장하면서 기포주변의 히터와 접촉하게 되는 시점부터 접촉한 히터의 발열량이 일정 표면 온도 조건을 유지하기 위하여 증가하게 됨을 관찰하였다. 만약 미세 액체막이 기포 아래에 존재한다면, 가열벽면에서 측정된 열전달율의 대부분은 미세 액체막의 증발에 의해 전달될 것이다. 그러나 미세 액체막을 통한 기포로의 열전달율을 실험적으로 정확하게 구분하는 것은 쉽지 않다.

5. 결론

본 연구에서는 일정 벽면 온도 조건에서 포화 상태 풀 핵비등 실험을 MEMS 가공기술에 의해 만들어진 미세히터와 고속 CCD 카메라를 이용하여 수행하였다.

미세히터를 이용하여 가열벽면을 일정 온도로 유지할 수 있었으며, 국부적으로 기포의 성장에 따라 가열 표면을 일정 온도로 유지하는데 필요한 시간에 따른 열전달율을 동시에 측정하였다. 가열 벽면에서 측정된 열전달율에 따르면 매우 주기적인 반복성과 규칙성을 보였으며, 초당 5000 프레임의 고속 CCD 카메라를 이용하여 열전달율과 동기시켜 촬영한 기포 사진을 이용하여 기포의 성장 특성을 분석하였다.

사진을 통하여 측정된 기포의 등가 반경과 가열 벽면에서 측정된 열전달율 모두 초기 성장영역에서는 매우 빠른 증가를 보였다. 열적 성장영역에서는 기포의 반경은 서서히 일정한 값에 접근하면서 증가하고, 열전달율은 서서히 감소하는 경향을 보였다.

무차원 해석으로부터 얻어진 특성길이와 시간의 크기들을 이용하여 성장 영역별로 이전 연구들의 실험 결과들과 비교하였다.

초기 성장영역에서는 작동유체와 가열조건(일정 열유속 또는 일정 표면온도 조건)에 관계없이 시간의 약 2/3 승에 비례하는 성장율을 나타내었는데, 이 영역은 Robinson & Judd⁽¹⁾의 결과로는 주로 판성 지배영역에 해당하였다. 초기 성장영역은 기포의 증기압과 시스템의 압력이 거의 일정한 영역이며, 가열벽면에서 측정된 열전달율이 최대값에 도달하는 시간과 일치함을 알 수 있었다.

열적 성장영역에서도 마찬가지로 기존의 일정 열유속 실험 결과들과 함께 성장율이 시간의 약 1/5 승에 비례하는 특성을 나타내는데, 이는 가열 벽면에서 측정된 열전달율의 경향과 일치함을 알 수 있다.

벽면으로부터 공급된 (가열벽면에서 측정된) 열

전달율의 측정결과는 기포의 성장에 요구되는 열전달율에 비해 포화 상태의 경우에 약 50% 정도인 것으로 나타났다. 이는 이전의 여러 결과들의 경향과 일치한다.

마지막으로 기포의 성장을 해석하기 위하여 기포의 기하학적인 형상 가정과 등가반경을 계산하는 방법을 제시하였다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실사업의 연구비로 수행되었으며 또한 본 연구에 적용된 미세히터의 제작에 많은 도움을 주신 삼성종합기술원(SAIT)에 본 지면을 통하여 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Robinson, A. J. and Judd, R. L., 2001, "Bubble Growth in a Uniform and Spatially Distributed Temperature Field," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 2699~2710.
- (2) Han, C. H. and Griffith, P., 1965, "The Mechanism of Heat Transfer in Nucleate Pool Boiling-Part I Bubble Initiation, Growth and Departure," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 8, pp. 887~904.
- (3) Cole, R. and Shulman, H. L., 1966, "Bubble Growth Rates at High Jakob Numbers," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 9, pp. 1377~1390.
- (4) Rule, T. D. and Kim, J., 1999, "Heat Transfer Behavior on Small Horizontal Heaters During Pool Boiling," *J. of Heat Transfer*, Vol. 121, No. 2, pp. 386~393.
- (5) Lee, J., Kim, J. and Kiger, K. T., 2001, "Time-and Space-Resolved Heat Transfer Characteristics of Single Droplet Cooling using Microscale Heater Arrays," *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, Vol. 22, pp. 188~200.
- (6) Kim, J., Benton, J. F. and Wisniewski, D., 2002, "Pool Boiling Heat Transfer on Small Heaters: Effect of Gravity and Subcooling," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 3919~3932.
- (7) Bae, S. W., Lee, H. C. and Kim, M. H., 2000, "Wall Heat Flux Behavior of Nucleate Pool Boiling Under a Constant Temperature Condition in a Binary Mixture System," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 24, No. 9, pp. 1239~1246.
- (8) Rayleigh, J. W. S., 1917, "On the Pressure Developed in a Liquid During the Collapse of a Spherical Cavity," *Philos. Mag.*, Vol. 34, pp. 94~98. ; This is cited in the book titled "Boiling Phenomena" by S. van Stralen, 1979, McGraw-Hill.
- (9) Plesset, M. S. and Zwick, S. A., 1954, "The Growth of Vapor Bubbles in Superheated Liquids," *J. of*

- Applied Physics*, Vol. 25, No. 4, pp. 493~500.
- (10) Forster, H. K. and Zuber, N., 1954, "Growth of a Vapor Bubble in a Superheated Liquid," *Journal of Applied Physics*, Vol. 25, pp. 474~478.
- (11) Mikic, B. B. and Rohsenow, W. M., 1969, "Bubble Growth Rates in Non-Uniform Temperature Field," *Progress in Heat and Mass Transfer II*, pp. 283~293.
- (12) Mikic, B. B., Rohsenow, W. M. and Griffith, P., 1970, "On Bubble Growth Rates," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 13, pp. 657~666.
- (13) Zuber, N., 1961, "The Dynamics of Vapor Bubbles in Nonuniform Temperature Fields," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 2, pp. 83~98.
- (14) Sernas, V. and Hooper, F. C., 1969, "The Initial Vapor Bubble Growth on a Heated Wall During Nucleate Boiling," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 12, pp. 1627~1639.
- (15) Hooper, F. C. and Abdelmessih, A. H., 1966, 3rd *Intl. Heat Tr. Conf. Chicago.* ; This is cited in the paper titled "A Theoretical Study on Bubble Growth in Constant and Time-Dependent Pressure Fields" by T. Theofanous, L. Biasi, H. S. Isbin and H. Fauske, 1969, *Chemical Engineering Science*, Vol. 24, pp. 885~897.
- (16) 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, Issue 12, pp. 1857~1874.
- (17) Bae, S. W., Kim, J. and Kim, M. H., 1999, "Improved Technique to Measure Time- and Space-Resolved Heat Transfer Under Single Bubbles During Saturated Pool Boiling of FC-72," *Experimental Heat Transfer*, Vol. 12, No. 3, pp. 265~279.
- (18) Kim, J., Lee, H. C., Oh, B. D. and Kim, M. H., 2004, "Effects of Bubble Shape Assumption on Single Bubble Growth Behavior in Nucleate Pool Boiling," *J. of Flow Visualization and Image Processing*, Vol. 11, pp. 1~15.
- (19) Fontana, D. M., 1972, "Simultaneous Measurement of Bubble Growth Rate and Thermal Flux from the Heating Wall to the Boiling Fluid near the Nucleation Site," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 15, pp. 707~720.
- (20) Koffman, L. D. and Plesset, M. S., 1983, "Experimental Observation of the Microlayer in Vapor Bubble Growth on a Heated Solid," *J. of Heat Transfer*, Vol. 105, pp. 625~632.
- (21) van Stralen, S. J. D., Sohal, M. S., Cole, R. and Sluyter, W. M., 1975, "Bubble Growth Rates in Pure and Binary Systems: Combined Effect of Relaxation and Evaporation Microlayers," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 18, pp. 453~467.