

< 기술논문 >

풀 핵비등시 단일 기포 성장에 대한 벽면 과열도의 영향에 관한 연구

김정배* · 이한춘** · 김무환†
 (2004년 12월 27일 접수, 2005년 3월 24일 심사완료)

Wall Superheat Effect on Single Bubble Growth During Nucleate Boiling at Saturated Pool

Jeongbae Kim, Han Choon Lee and Moo Hwan Kim

Key Words: Pool Nucleate Boiling(풀핵비등), Single Bubble(단일기포), Bubble Growth(기포성장), Microscale Heater Array(미세히터)

Abstract

Nucleate pool boiling experiments for R11 under a constant wall temperature condition were carried out. A microscale heater array was used for the heating and the measurement of high temporal and spatial resolution by the Wheatstone bridge circuit. Very sensitive heat flow rate data were obtained by the control for the surface condition with high time resolution. The measured heat flow rate shows a discernable peak at the initial growth stage and reaches an almost constant value. In the thermal growth region, bubble shows a growth proportional to $t^{1/5}$. The bubble growth behavior is analyzed with a dimensionless parameter to compare with the previous results in the same scale. As the wall superheat increases, the departure diameter and the departure time increase, and the waiting time decreases. But the asymptotic growth rate is not affected by the wall superheat change. The effect of the wall superheat is resolved into the suggested growth equation. Dimensionless parameters of time and bubble radius characterize the thermal growth behavior well, irrespective of wall condition. The comparison between the result of this study and the previous results shows a good agreement at the thermal growth region. The quantitative analysis for the heat transfer mechanism is conducted with the measured heat flow rate behavior and the bubble growth behavior. The required heat flow rate for the volume change of the observed bubble is about twice as much as the instantaneous heat flow rate supplied from the wall.

기호설명

A : 기포 형상 변수 [mm]
 B : 기포 형상 변수 [mm]
 C : 기포 형상 변수 [mm]
 Cp_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 ($Ja = \frac{\rho_l C_{p_l} \Delta T}{\rho_v h_{fg}}$) [-]
 \dot{m} : 증발 질량 유량 [kg/sec]
 ΔP : 압력차 ($P_v - P_{sys}$) [Pa]
 P_v : 기포 증기압력 [Pa]
 P_{sys} : 주위 압력(시스템 압력) [Pa]

† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : mhkim@postech.ac.kr

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

* 한국에너지기술연구원 신재생에너지연구부

** 엘지전자 DA연구소 (구로) 열교환기그룹

\dot{q}	: 열전달율	[W]
q_{latent}	: 잠열 열전달량	[J]
$\dot{q}_{conduction}$: 전도 열전달율	[W]
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^+	: 무차원 기포 반경	[-]
t	: 시간	[sec]
t_c	: 특성 시간 크기	[sec]
t_d	: 기포 이탈 시간	[sec]
t_w	: 기포 대기 시간	[sec]
t^+	: 무차원 시간	[-]
T	: 액체 온도	[K]
T_c	: 특성 온도 크기	[K]
T_{sat}	: 포화 온도	[K]
T_{wall}	: 가열벽면의 온도	[K]
ΔT	: 벽면 과열도 ($T_{wall} - T_{sat}$)	[K]
v_c	: 특성 속도 크기	[m/sec]
V	: 기포의 체적	[m ³]
V_L	: 기포 하부의 체적	[m ³]
V_U	: 기포 상부의 체적	[m ³]

그리스문자

α	: 액체 열확산도	[m ² /s]
ρ_l	: 액체 밀도	[kg/m ³]
ρ_v	: 기체 밀도	[kg/m ³]
σ	: 액체 표면장력	[N/m]
θ	: 접촉각 (Contact angle)	[m ² /s]

1. 서론

액체나 기체 등의 단상 물질에 비해 이상상태에서의 열전달율의 증가는 비등의 경우에 가열표면 위에 생성된 기포의 성장과 이탈특성과 밀접한 관계가 있다. 많은 비등 현상이 관찰되는 실제 시스템에서의 현상은 다수의 기포가 존재하는 복잡한 열전달 특성을 나타내고 있다. 이러한 복

잡한 열전달 기구를 보다 깊이 있게 이해하기 위하여, 풀에서 가열벽면 위에 한 개의 기포만을 생성, 성장 그리고 이탈시키면서 성장시간 동안의 기포의 성장 특성을 관찰하기 위하여 많은 연구들이 수행되어 오고 있다.

이러한 풀에서의 부분 핵비등 현상은 크게 가열벽면의 표면 조건들과 온도 조건들에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 특히 기포가 표면에서 생성 기구와 관련이 되는 온도 조건들은 가열벽면과 기포 주위 액체의 온도이고, 기포가 표면에서 이탈하기 전까지의 성장 동안은 가열벽면 온도, 물질의 포화온도, 그리고 기포 주위의 액체온도인데 이러한 각 인자들의 독립적인 영향을 검토하기 위한 비등 실험을 수행하는 것은 상당히 어려운 실정이다.

그러나, 기전공학을 이용하여 만들어진 미세히터와 높은 속도의 제어회로를 이용하여 포화상태 풀 핵비등에서 가열 벽면의 온도를 일정하게 제어하면서 단일기포가 초기 및 열적 성장영역에서 물질과 가열조건에 무관하다는 것을 Kim et al⁽¹⁾과 Lee et al^(2,3)에 의해 실험과 차원해석을 통해 발표되었다.

본 연구에서는 Kim et al⁽¹⁾과 동일한 미세히터와 제어회로 그리고 냉매 R11(포화온도:23.7℃)을 이용하여, 대기압 하에서 풀 온도는 포화상태를 유지하면서 다양한 벽면 온도조건에서 단일 기포의 성장과 이탈 특성을 실험하였다. 이와 아울러 Kim et al⁽¹⁾과 Lee et al^(2,3)에 의해 제안된 차원 해석을 동일하게 적용하여 실험 결과를 분석하였다.

2. 실험

2.1 실험장치 및 실험방법

가열벽면을 일정 온도로 유지하면서 열전달량을 측정하기 위하여 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.⁽⁴⁾ 미세히터는 2.7×2.7 mm² 내에 0.27×0.27 mm² 크기의 히터 96개가 배열되어 있다. 본 실험에서 사용되어진 미세히터는 Rule et al⁽⁵⁾의 아이디어를 바탕으로 하여 삼성종합기술원(SAIT)에서 제작되었다. 미세히터 배열 내의 96개 히터의 온도는 열선

풍속계에 적용되는 휘트스톤 브리지회로 96개에 의해 개별적으로 조정된다. 실험에 앞서 20 ~ 80 °C 영역에 대해 2 °C의 범위로 하여 히터의 표면 온도에 대한 히터의 저항치를 결정하는 실험을 수행하였다.⁽²⁾

각 히터의 발열량은 약 7.35 kHz의 속도로 136 msec 동안 각 히터 당 16,000개의 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 저장된다.

Fig. 1에는 실험장치에 대한 개략도를 보여 주고 있다. 미세히터는 주실험부의 한가운데에 설치하였다. 주실험부의 측면과 밀면에서 기포이미지를 촬영할 수 있도록 설계하였으며, 밀면 촬영 시에는 알루미늄이 증착된 광학용 거울을 사용하였다. 그리고 챔버 내부 액체의 온도를 조절하기 위하여 챔버 바깥면에 10개의 1.55 W/cm² 용량의 박막 히터를 부착하였다. 고속 CCD 카메라의 촬영시에 필요한 조명을 위해 250 W 용량의 할로젠 램프를 이용하였다. 기포의 이미지는 초당 1000 frame의 속도를 가지는 CCD 카메라를 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. [Kim et al⁽¹⁾ 참조] 자세한 실험 기법은 Rule & Kim⁽⁶⁾과 Bae et al⁽⁷⁾ 및 Bae et al⁽⁸⁾의 논문에 기술되어 있다.

2.2 기포의 형상

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

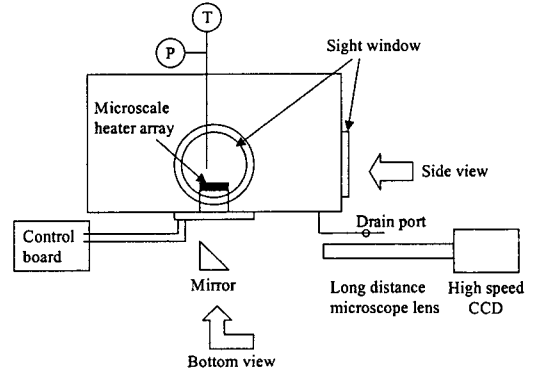


Fig. 1 Schematics of the experimental apparatus

이러한 가정으로부터 Fig. 3에 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. 기록된 좌표들로부터 Fig. 3의 A, B, C, D의 크기가 계산된다. A, B, C, D의 크기를 이용하여 기포 형상 가정으로부터 상반구와 하반구의 체적은 다음과 같이 계산할 수 있으며, 이로부터 기포의 전체 체적을 구하고 등가의 반경을 계산하였다.

$$V_U = \frac{2}{3} \pi B^2 A \tag{1}$$

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

$$V = V_U + V_L = \frac{4}{3} \pi R_{eq}^3 \tag{3}$$

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

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

$$\dot{q} = \dot{m} h_{fg} = \rho_v h_{fg} \frac{dV}{dt} = 4\pi \rho_v h_{fg} R^2 \frac{dR}{dt} \tag{5}$$

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 해상도로 측정되었고, 최대 전압은 12 V이다. 전압을 디지털화 하는데 있어서 오차는 0.0015 V이다. 실험에서 기포가 생성되었을 때 최소 전압이 2 V이었고, 이에 따라 전압 측정에 대한 최대 오차는 0.075 %가 된다.

기포 크기 측정의 기준은 기준자를 사용하는데, 기포가 있는 위치에 놓고 촬영한 결과 100 μm에 해당되는 픽셀 수가 30개로 측정되었다. 따라서 1 픽셀이 3.333 μm가 되는데, 촬영된 사진에서 기포 크기를 측정할 때 ±1 픽셀의 오차가 발생하므로 측정된 기포의 최소 지름이 0.241 mm이었다. 이리하여 기포 지름 측정에 있어서 최대 오차는 ± 1.38 %가 된다.

가열 벽면인 미세히터는 OMEGA사의 열전대 보정기를 이용하여 보정되어 0.53°C의 오차를 가지고 있는 열전대를 사용하여 보정하였다.

히터의 온도를 조절하기 위하여 전자회로 내에 0 ~ 512의 디지털 수에 따라 0 ~ 20 kΩ의 변위를 가지는 디지털 가변저항을 사용하였다. 본 연구에서는 히터온도의 변화폭을 60°C가 되도록 보정하였다. 디지털 조정숫자 1에 대한 온도변화 폭은 0.12°C가 된다. 이에 따라 디지털 조정 숫자에 대한 미세히터 벽면 온도의 불확실성은 0.06 °C가 된다. 따라서 벽면 온도의 불확실성은 보정에 사용된 열전대의 불확실성과 디지털 조정에 의한 불확실성을 합한 0.59°C가 된다.

2.4 실험 조건

본 연구에서 수행된 실험의 내용은 아래의 Table 1에 표시하였다. 작동 유체는 순수냉매 R11을 이용하였고, 풀의 압력과 온도는 각각 대기압과 23 °C로 유지하였다. 그리고 벽면의 온도를 4 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 본 연구에서의 벽면 과열도는 11.3에서 17.2°C였고, 무차원 Jakob 수(Ja)로는 비등영역 중에서 부분 핵비등 영역에 해당하는 13.8 ~ 21.1 이었다. 벽면 온도가 43.1 °C이고 벽면 과열도가 19.4°C인 조건에서도 실험을 수행하였으나, 규칙적인 단일기포의 생성, 성장, 그리고 이탈의 사이클이 나타나지 않음을 알 수 있었다.

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 기포내부 기체와 주위 액체 사이의 압력차(ΔP)에 의해 특성화될 수 있다고 가정하면, 특성 속도 크기는 다음과 같이 결정될 수 있다.

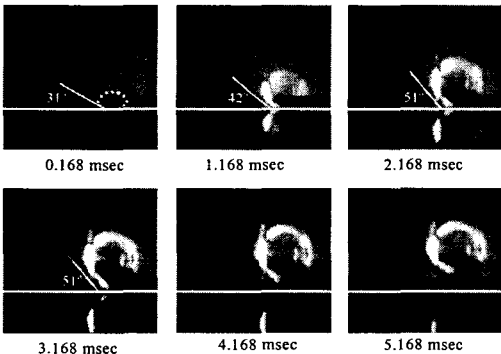


Fig. 2 Side view of bubble growth at T_{wall}=35°C

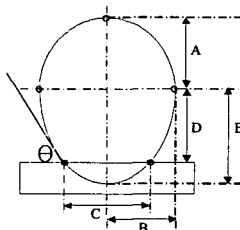


Fig. 3 Bubble geometry to calculate bubble volume

Table 1 Experimental conditions

Fluid	P _{sys} (atm)	T _{wall} (°C)	T _{sat} (°C)	ΔT (°C)	Ja
R11	1	35.0	23.7	11.3	13.8
R11	1	37.1	23.7	13.4	16.4
R11	1	38.9	23.7	15.2	18.6
R11	1	40.9	23.7	17.2	21.1

여기서 2/3는 Mikic et al⁽⁹⁾의 무차원 매개변수와
의 비교를 위해 삽입한 것이다

$$v_c = \frac{R_c}{t_c} = \sqrt{\frac{2 \Delta P}{3 \rho_l}} \quad (6)$$

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

$$\frac{q_{latent}}{q_{conduction}} = \frac{\rho_v h_{fg} \frac{4}{3} \pi R_c^3}{k_l 4 \pi R_c^2 \frac{\partial T}{\partial r}} = \frac{1}{3} \frac{\rho_v h_{fg} R_c^3}{k_l R_c^2} \frac{R^{+3}}{R_c^2} = t_c \frac{R^+}{\partial T^+} \quad (7)$$

$$t_c = \frac{1}{3} \frac{\rho_v h_{fg} R_c^2}{k_l T_c} = \frac{1}{3} \frac{\rho_v h_{fg} R_c^2}{k_l \Delta T} = \frac{1}{3} \frac{1}{Ja \alpha} R_c^2 \quad (8)$$

여기서 Ja수는 포화상태 플에서의 특성 온도 크기인 벽면 과열도를 이용하여 정의하였다. 따라서 식 (6)과 (8)로부터, 특성 반경과 시간 크기는 아래와 같이 표현된다.

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

무차원의 기포 반경과 시간은 다음과 같다.

$$R^+ = \frac{R}{R_c}, t^+ = \frac{t}{t_c} \quad (10)$$

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)를 식 (9)에 대입하여 정리하면

식 (12)와 같이 표현된다.

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

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

4. 실험결과 및 고찰

본 연구에서 수행된 4 경우의 벽면 과열도에 대한 실험 결과를 간략하게 Table 2와 같이 나타내었다. 여기서, 기포의 이탈시간과 대기시간은 136 msec 동안 측정된 여러 사이클에서의 값들의 평균값으로 나타내었다.

기포의 형상은 Fig. 2에서와 같이 촬영된 기포의 이미지로부터 기포가 생성 직후 0.168msec에 31°의 접촉각을 가지는 편원의 구형 (Oblate spheroidal shape)에 가까운 형상을 하고 있었고, 성장하면서 기포가 거의 잘린 구 (Truncated spheroidal shape)의 형태임을 확인하였다. 초기 성장 영역 이후부터는 접촉각이 51°로 거의 변하지 않으면서 잘린 구의 형상에서 서서히 위로 길어지면서 성장하다가 이탈함을 알 수 있었다.

그리고 실험 벽면온도 조건별로 식 (4)로부터 구해진 기포의 반경을 기존의 해석적인 기포 성장방정식들과 비교하면, Fig. 4과 같이 기존의 성장방정식들이 일부 기포 거동을 잘 묘사하는 것으로 나타나기도 한다. 기존의 기포 성장방정식들은 모두 기포의 반경이 시간의 1/2승에 비례하는 특성을 가지고 있다. 그러나 본 연구에서 측정된 순간 열전달율과 성장방정식을 이용하여 식 (5)에서 얻어진 열전달율을 Fig. 5에 표시하였는데, 측정된 순간 열전달율은 기포 성장 초기에는 증가하지만 약 0.5 msec 이후에는 감소하는 경향을 나타내고 있다.

Table 2 Experimental results

Psys (atm)	T _{wall} (°C)	T _{sat} (°C)	ΔT (°C)	Ja	t _d (msec)	R _d (mm)	t _w (msec)
1	35.0	23.7	11.3	13.8	3.168	0.318	53.176
	37.1		13.4	16.4	4.928	0.407	48.008
	38.9		15.2	18.6	5.760	0.501	23.868
	40.9		17.2	21.1	6.328	0.496	11.254

이는 초기 성장시간 동안은 기포 성장률이 시간의 1/3승 보다 크고, 이후 열적 성장 영역에서는 시간의 1/3승 보다 작아야 함을 의미한다. 따라서 기존의 해석적인 식들과 실제 기포의 성장 특성과는 차이를 있음을 알 수 있다.

등가 기포 반경을 식 (4)를 이용하여 계산하고 Fig. 6(b)에 나타내었다. 벽면 과열도가 증가하면 이 기포의 이탈 시간과 반경이 증가한다. 이탈 시간과 반경의 증가는 미세히터로부터 기포로 공급되는 열전달율이 증가하였음을 의미한다(Fig. 7 참조). 그리고 벽면 과열도의 증가는 성장시간동안 가열 벽면 위에서 낮은 과열도의 조건에 비해 열경계층의 성장을 촉진할 것이므로, Table 1에서와 같이 대기시간이 감소하게 될 것이다.

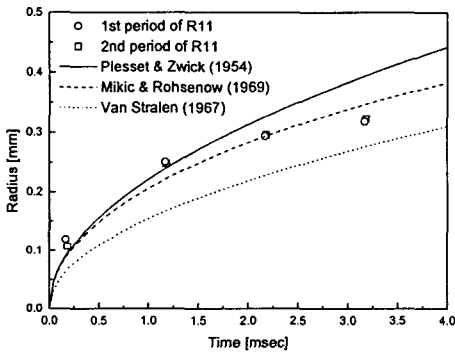


Fig. 4 Comparison of bubble growth with previous analytical predictions ($T_{wall}=35^{\circ}\text{C}$)

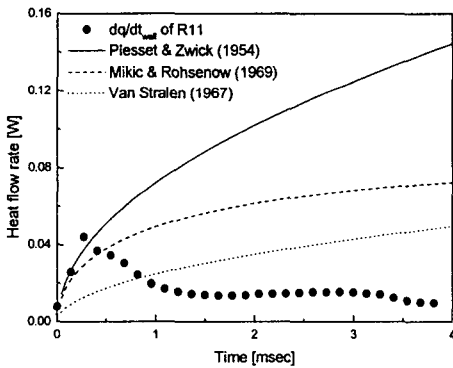


Fig. 5 Comparison of heat flow rate with previous analytical predictions ($T_{wall}=35^{\circ}\text{C}$)

또한 벽면 온도가 40.9°C 에서의 기포의 반경과 이탈시간이 38.9°C 의 반경과 이탈시간과 거의 동일함을 보였다.

Fig. 6(a)에 이전의 포화상태의 풀 핵비등 실험결과들과 비교하여 나타내었다. 이전의 연구들은 물 [Staniszewski⁽¹⁰⁾; Ja=24, Han & Griffith⁽¹¹⁾; Ja=30]과 n-pentane [Cole & Shulman⁽¹²⁾; Ja=23]들을 작동유체로 사용하였고, 가열 벽면의 조건이 일정하게 열유속을 제어하는 조건이었다. 가열 벽면의 조건이 기포의 성장률에 미치는 영향이 명확하지 않고, 열적 성장 영역에서의 가열 벽면의 조건에 따른 차이도 크게 나타나지 않음을 알 수 있었다. 포화상태 풀 핵비등에 있어서 열적 성장 영역에서의 성장률은 시간의 1/3 ~ 1/5승에 비례함을 나타내었는데, 앞서 설명한 바와 같이 시간에 따른 성장률이 순간 열전달율의 거동과 동시에 관계가 있다.

과열도에 따른 기포 반경의 변화와 이전의 연구 결과들은 동일한 크기로 비교하기 위하여 식 (12)의 무차원 크기를 이용하여 Fig. 8에 나타내었다.

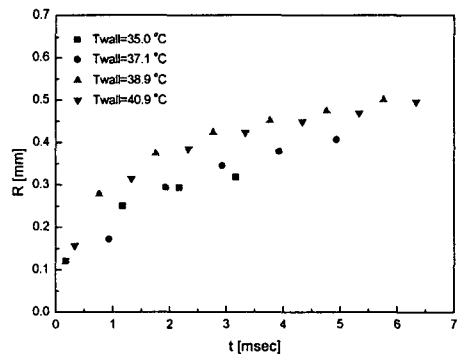
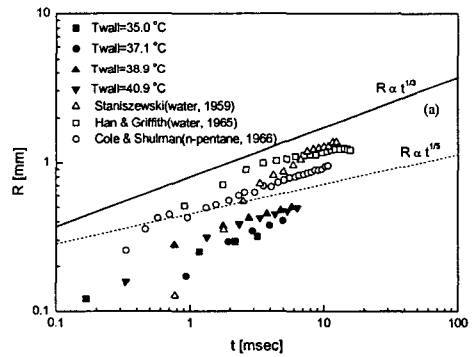


Fig. 6 Comparison of bubble growth with the previous results

그림에서와 같이 열적 성장 영역에서 벽면 과열도에 관계없이 무차원 시간의 1/5승에 비례하는 거동을 보여주고 있으며, 이전의 실험 결과들도 최대 1/3승보다 작은 성장률을 보여주고 있다. 또한 열적 성장영역과 성장률이 확연히 구분되는 초기 성장영역이 존재하고 있음을 알 수 있다. 이전의 실험적인 연구들이 시간의 1/2승에 비례하는 해석적인 결과들과 단순히 기포 반경만을 비교하여 나타냄으로서, 순간적인 열전달율의 특성과 간과하였고 기포의 성장이 일정한 기울기를 가지고 있다고 생각한 것임을 알 수 있다.

최근 Robinson & Judd⁽¹³⁾는 확장된 Rayleigh 방정식 (13)과 기포에 대한 에너지 방정식을 이용하여 수치해석적인 방법으로 기포의 성장특성을 분석하였다. 기포 생성 직후에는 세 번째의 표면장력이, 이후에는 첫째와 둘째항이 나타내는 기포 내부의 압력에 의한 관성이, 마지막으로 기포의 압력이 기포 주위의 압력과 동일해지는 시간에는 기포 경계에서의 온도구배에 의한 열적 성장특성이 나타남을 보였다. 그러나 핵비등시의 단일 기포의 성장을 다루는 연구에서 주로 이용하는 사진 촬영 방법으로는 표면장력이 지배하는 영역을 관찰하는 것은 현실적으로 어렵다.

그러나 기존의 해석적인 연구들이 제시하는 기포가 성장하는 시간동안 일정하게 시간의 1/2승에 비례하는 성장률은 수치해석적인 그리고 실험적인 결과로부터 상이한 것임을 알 수 있다.

$$\Delta P = P_v - P_{\text{sys}} = \rho_l R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \rho_l \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{R} \quad (13)$$

Lee et al^(2,3)이 제시한 바대로, 본 연구에서 수행한 벽면 과열도에 따른 검토에서도 Fig. 8에서와 같이 가열 조건이나 벽면 과열도에 관계없이 기포가 가열 표면에서 이탈시 무차원 시간과 반경이 각각 60과 25 정도였다. 이렇게 얻어진 무차원 값으로부터 평가된 이탈 시간과 반경을 실험값과 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 보듯이 최대 ± 30 % 이내에서 기존의 실험결과들을 포함하여 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10(a)는 벽면 온도가 35.0 °C 인 경우에 순간 열전달율 특성을 나타내고 있다. 기호는 벽면에서 측정된 순간적인 열전달율을 나타내고, 선은 이미지로부터 구해진 기포 반경에 대해 식 (5)

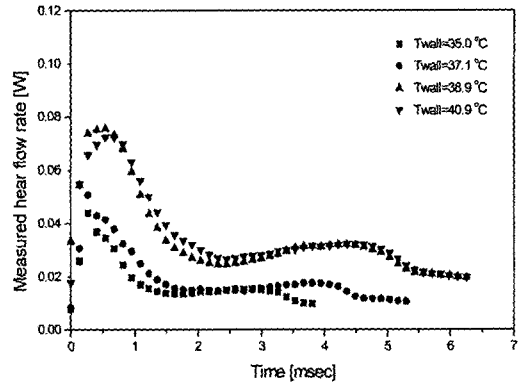


Fig. 7 Comparison of instantaneous heat flow rate

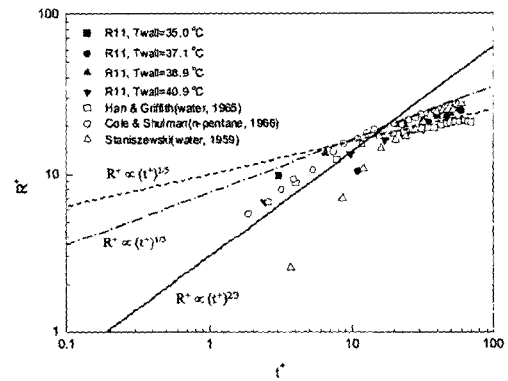


Fig. 8 Dimensionless behavior of bubble growth

를 이용하여 계산한 기포 성장을 위해 필요한 순간 열전달율을 표시하는 것이다. 기포가 가열 벽면에서 이탈 전까지 벽에서 측정된 순간 열전달율과 필요한 순간 열전달율 사이에는 큰 차이를 나타내고 있다. 이러한 측정된 열전달율에 대한 필요한 열전달율의 비율 Fig. 10(b)에 나타내었다. 성장시간동안 측정된 순간 열전달율은 약 47 % 정도임을 알 수 있었는데, 이는 기포 성장에 다른 열전달 경로가 존재하고 있음을 의미한다. 이러한 부가적인 열은 기포의 아래쪽 바닥면이 아닌 다른 부분의 경계를 통해 공급되어야 한다. 이 열은 가열 벽면에서 기포 주위의 액체를 거쳐서 기포로 공급되어야 하므로, 이 부가적인 열은 본 연구에서 이용한 히터로는 순간적인 열전달율을 측정할 수 없다. 열은 기포가 생성되기 전 대기시간 동안 그리고 성장시간 동안에 이미 액체로 공급되고 있었던 것이다.

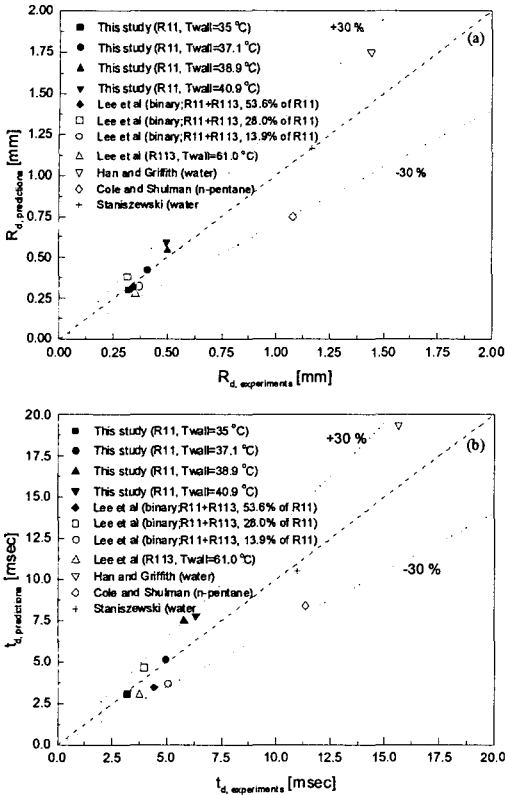


Fig. 9 Comparison of departure radius and time between estimated and measured

액체로 공급된 열은 경계 냉각 효과(Interface cooling effect)에 의해 기포로 공급되어 질 수 있음은 이미 이전의 많은 연구자들에 의해 제안되고 증명되었다 [Plesset & Zwick,⁽¹⁴⁾ Zuber,⁽¹⁵⁾ Mikic & Rohsenow,⁽¹⁶⁾ Robinson & Judd,⁽¹³⁾ Lee et al.⁽²⁾].

Fig. 11은 벽면 온도가 35 °C 인 경우에 기포의 하면에서 촬영한 기포 이미지들이다. Fig. 2의 이미지들과 동일 시간에 측정된 이미지는 아니다. 본 연구에서는 하나의 CCD 카메라를 이용하였기 때문에, 하면과 측면에서 동시에 촬영할 수는 없었다. 실험에서 측면 촬영을 한 이후에, 카메라의 위치를 이동시키고 하면으로부터의 이미지를 촬영하였다. 이미지에 표시된 수는 96개 히터중의 각각의 히터 번호를 나타내고, 점선은 기포의 히터와의 접촉선을 나타낸다. 실험에서 기포는 80번 히터에서 생성되었고 Fig. 12에서와 같이 80번 히터에서만 일정 온도를 유지하기 위한 열전달율보다 높은 열전달율이 측정되었다.

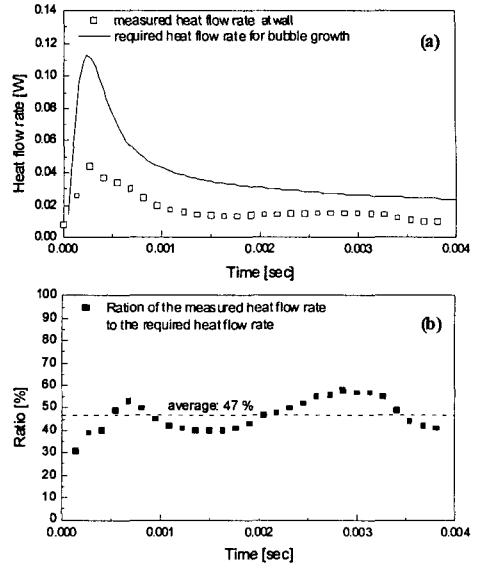


Fig. 10 Comparison of heat flow rate behavior ($T_{wall} = 35^{\circ}C$)

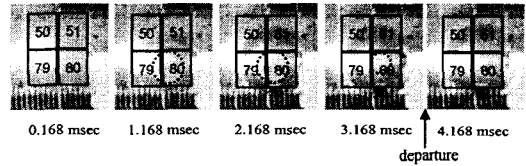


Fig. 11 Bottom view of bubble growth($T_{wall} = 35^{\circ}C$)

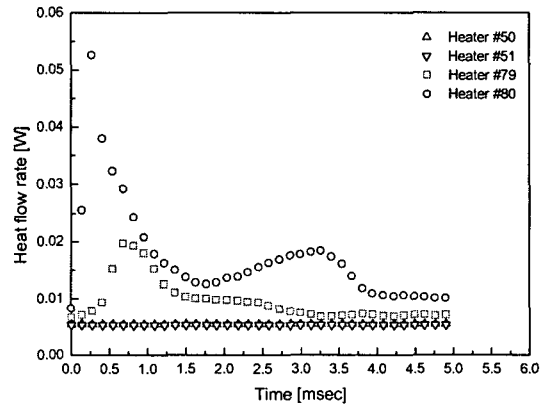


Fig. 12 Measured heat flow rate of heaters around a bubble ($T_{wall} = 35^{\circ}C$)

Fig. 11의 첫 번째 이미지에서 기포는 존재하였으나 이미지상으로는 명확히 구분되지는 않았다. 기포는 0.168에서 1.168 msec 사이에 79번 히터와

접촉하게 된다. 그리고 2.168에서 3.168 msec 사이에 기포는 79번 히터와 접촉하지 않게 된다. 79번 히터는 Fig. 12에서와 같이 약 0.5 msec로부터 일정 온도를 유지하기 위한 열전달율보다 높은 열전달율이 측정되었고, 약 3 msec에 일정 온도를 유지하기 위한 열전달율로 감소하였다. 기포는 50번과 51번 히터와는 접촉하지 않으므로 Fig. 12과 같이 두 히터는 일정 온도를 유지하기 위한 열전달율만을 나타내고 있다. 히터에서 측정하는 순간 열전달율은 기포와 히터의 접촉영역에서 주로 공급되는 것임을 알 수 있다. 이러한 열의 공급은 기존의 미세 액체막을 통한 열의 공급과 관계되어 지는데, 기포 바닥에 미세 액체막이 존재한다면 가열 벽면에서 측정된 순간 열전달율이 미세 액체막을 통해 기포로 공급된 최대값임을 알 수 있다.

5. 결론

순수 물질인 냉매 R11을 이용하여 가열 벽면을 일정한 온도로 유지하기 위해 제어하면서 기포 성장에 대한 벽면 과열도의 영향을 조사하기 위하여 포화 풀 핵비등 실험을 수행하였다. 이를 위해 휘트스톤 브리지회로를 이용하는 높은 시간적 해상도를 가지는 미세히터를 가열과 순간 열전달율의 측정을 위해 이용하였다.

측정된 열전달율은 초기성장 영역에서 최대값을 나타내었고 이후에는 일정한 온도를 유지하기 위한 열전달율의 값으로 접근하는 특성을 나타내었고, 초당 1000 frame의 성능을 가진 CCD 카메라를 이용하여 열전달율의 측정과 동기화되어 기포의 성장동안 기포의 이미지를 촬영하였다. 촬영된 기포의 이미지로부터 기포의 기하학적인 형상의 정보들이 계산되었다.

벽면 과열도가 증가함에 따라 이탈 직경과 이탈 시간이 증가하였다. 그러나 열적 성장영역에서의 기포의 성장특성은 벽면 과열도의 변화에 크게 영향이 없음을 알 수 있었다. 기포의 이탈과 다음 기포의 생성사이의 대기시간은 벽면 과열도가 증가함에 따라 감소하였다. 열적 성장영역에서 기포는 시간의 1/2승에 비례하는 성장 특성을 보여준 이전의 해석적인 결과보다 낮은 시간의 1/5승에 비례하는 성장률을 나타내었다.

벽면 과열도에 따른 기포의 성장 거동을 이전

의 연구들과 동일한 크기로서 비교하기 위하여 무차원 해석을 수행하였다. 무차원 시간과 기포 반경의 변수들은 벽면 가열 조건에 관계없이 열적 성장 특성을 잘 묘사할 수 있었다. 본 연구와 이전의 연구들의 결과들은 열적 성장 영역에서 비슷한 성장률을 나타내었다. 또한 무차원 이탈 시간과 반경이 각각 약 60과 25이었다.

열전달 기구의 정량적인 해석을 측정된 열전달율의 거동과 기포 성장 거동을 파악하기 위하여 수행하였다. 벽에서 측정된 순간 열전달율은 실험에서 측정된 기포의 성장에 필요한 순간 열전달율의 약 50 % 정도인 것으로 나타났다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Kim, J., Lee, H. C., Oh, B. D. and Kim, M. H., 2005, "Study on the Single Bubble Growth During Nucleate Boiling at Saturated Pool," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 29, No. 2, pp. 169~179.
- (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. Multiphase Flow*, Vol. 29, pp. 1857~1874.
- (3) 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. Multiphase Flow*, Vol. 30, pp. 697~710.
- (4) Kim, J. and Benton, J. F., 2002, "Highly Subcooled Pool Boiling Heat Transfer at Various Gravity Levels," *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, Vol. 23, pp. 497~508.
- (5) Rule, T. D., Kim, J. and Kalkur, T. S., 1998, "Design, Construction and Qualification of a Microscale Heater Array for Use in Boiling Heat Transfer," *NASA/CR-1998-207407*.
- (6) 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.
- (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) 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.
- (9) Mikic, B. B., Rohsenow, W. M. and Griffith, P., 1970, "On Bubble Growth Rates," *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 13, pp. 657~666.
- (10) Staniszewski, B. E., 1959, "Nucleate Boiling Bubble Growth and Departure," *M. I. T. DSR Project No. 7-7673, Technical Report No. 16*.
- (11) 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.
- (12) Cole, R. and Shulman, H. L., 1966, "Bubble Growth Rates at High Jakob Numbers," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 9, pp. 1377~1390.
- (13) Robinson, A. J. and Judd, R. L., 2001, "Bubble Growth in a Uniform and Spatially Distributed Temperature Field," *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 2699~2710.
- (14) 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.
- (15) Zuber, N., 1961, "The Dynamics of Vapor Bubbles in Nonuniform Temperature Fields," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 2, pp. 83~98.
- (16) 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.
- (17) Van Stralen, S. J. D., 1967, "The Mechanism of Nucleate Boiling in Pure Liquids and in Binary Mixtures-Part IV," *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 10, pp. 1485~1498.