포화상태 풀비등시 단일기포의 성장에 관한 연구

김정배† · 이한춘* · 오병도** · 김무환**

Study on the single bubble growth at saturated pool boiling

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

Key Words : Bubble growth(기포성장), Pool nucleate boiling(풀핵비등), Microscale heater(미세히터), Initial growth region(초기성장영역), Thermal growth region(열적성장영역)

Abstract

Nucleate boiling experiments with constant wall temperature of heating surface 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 and to measure the heat flow rate with high temporal and spatial resolutions. Bubble images during the bubble growth were taken as 5000 frames a sec using a high-speed CCD camera synchronized with the heat flow rate measurements. The geometry of the bubble during growth time could be obtained from the captured bubble images. The bubble growth behavior was analyzed using the new dimensionless parameters for each growth regions to permit comparisons with previous results at the same scale. We found that the new dimensionless parameters can describe the whole growth region as initial and later respectively. The comparisons showed good agreement in the initial and thermal growth regions. The required heat flow rate for the volume change of the observed bubble was estimated to be larger than the instantaneous 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 conditions. 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, B, C, D, E	기포 형상 변수	[mm]
Cp_l	액체 비열	[J/kgK]
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]
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	기포의 체적	[m^3]

---

† 포항공과대학교 기계공학과 대학원
E-mail : jebikim@postech.ac.kr
TEL : (054)279-5807 FAX : (054)279-3199
* 엘지전자 DA 연구소
** 포항공과대학교 기계공학과

V_U	기포 상부의 체적	[m^3]
V_L	기포 하부의 체적	[m^3]
Greek Letters		
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]

1. 서론

단일 기포 성장에 대한 이전의 실험 연구들은 기포 아래 설치된 금속 블록을 가열함으로써 얻어지는 일정 열유속 조건으로, 가열 블록에서와 벽에서의 전도로 인해 열유속이 외곡되어 지는 것으로 평가된다. 이러한 조건하의 이전 실험들(Han 과 Griffith (2), Cole 과 Shulman (3))은 동일한 실험조건을 가진 일련의 결과에서 조차 기포의 성장에 대한 규칙적인 반복성을 보여주지 못하였다. 이는 국소 가열량이 기포의 성장동안 일정 가열 조건을 유지하기 위해 micro 초이내로 제어되어야 하기 때문이다. 이러한 요구 조건이 이전 결과들의 불규칙한 거동과 관계되어진 것일 수 있다.

최근에 Rule 과 Kim (4)과 Lee et al (5)는 매우 높은 시간과 공간 분해능으로 제어될 수 있는 미세 히터를 개발하였고 이러한 미세 히터를 이용하여 일정 벽면 온도조건은 구현할 수 있었고, 단일 기포의 성장시 시간에 대한 열전달율에 있어서의 변화가 측정될 수 있었다. 미세히터를 이용하여 Kim et al (6) 과 Rule 과 Kim (4)은 일정 벽면온도 조건에서 중력의 영향을 변화시키면서 다양한 과냉 비등 실험을 수행하였으며, 배성원 (7)등은 동일한 미세히터를 이용하여 일정 벽면온도 조건에서 열전달량을 측정하고 가열면 밑에서 촬영한 기포 사진을 이용하여 단일 기포의 거동을 분석하기도 하였다.

Rayleigh (8)는 기포의 경계를 통한 열전달을 고려함이 없이, 기포와 기포를 둘러싼 액체사이의 운동량 상호작용에 의해 지배되는 구형 기포에 대한 운동 방정식을 제안하였다. 뒤에 Plesset 에 의해 수정되어 확장된 Rayleigh-Plesset 방정식으로 불리어 진다. 운동방정식의 해석적인 처리를 통해 기포의 성장동안 일정한 액체와 기체사이의 압력차를 가정하여 초기 성장영역에서 기포 반경이 시간의 일승에 비례하는 결과를 보였다. 그러나 초기 성장영역에 대한 명확한 정의가 이루어진 것은 아니었다. Plesset 과 Zwick (9) 그리고 Forster 와 Zuber (10)들은 균일하게 과열된 액체 내부에서 기포의 경계를 통한 열전달을 고려하여 Rayleigh 방정식을 해석하여, 기포의 성장 방정식이 기포 주위의 열경계층을 통한 열전도로부터 얻어졌다. 그들은 얇은 두께의 열경계층 가정과 균일하게 과열된 액체온도를 가정하여 경계에서 온도구배를 유도하였다. Mikic 과 Rohsenow (11)는 기포가 생성되기 이전의 대기기간을 고려하여 기포 주위의 비균일 온도장을 구하고, 이에 따른 기포의 성장을 차원해석을 통해 해석적으로 예측하기도 하였다. 또한 Mikic et al (12)은 임계반경보다 더 큰 초기 반경을 가지는 기포가 균일하게 과열된 풀의 액체로 둘러싸인 상태에서 t+<<1 에서는 시간에 비례하는, t+>>1 에서는 시간의 1/2 승에 비례하는 결과를 제시하였다. Robinson 과 Judd (1)는 수치해석의 결과로부터 기포의 성장구간을 구분하였는데, 대기기간 이후에 가열표면에서 생성된 기포는 매우 작은 크기이므로 지배방정식에서와 같이 표면장력이 지배하게 되고 (Surface-tension controlled region), 기포의 크기가 증가함에 따라서 표면장력의 효과는 적어지고 대기기간 동안 주어진 압력 포텐셜에 의해 큰 관성력을 가지면서 (Inertia controlled region) 성장하게 된다. 이후에 기포의 압력이 시스템의 압력과 동일하여지면 액체와 기포의 경계에서의 온도 구배에 따른 열전달 특성이 나타나게 됨을 보였다. 또한 포화상태의 풀 조건에서도 경계 냉각 효과 (Interface Cooling Effect)에 의해 가열 표면의 바닥면을 제외하고 기포 경계를 통해서 열이 전달될 수 있음을 보였다. 경계 냉각효과는 또한 Plesset 과 Zwick (9)와 Zuber (13) 그리고 Mikic et al (11) 등의 초기 연구자들에 의해 보고되기도 하였다.

단일 기포의 성장에 대한 실험적인 연구들은 대부분이 일정한 열유속을 가지는 조건으로 수행되었는데, 물을 이용한 Han 과 Griffith (2)와 N-Pentane 을 이용한 Cole 과 Shulman (3)의 결과등이 발표되어 있다. 그리고 물을 이용하여 초기의 거동을 파악한 Sernas 와 Hooper (14)와 Hooper 와 Abdelmessih (15)의 결과 등도 발표되었다. 또한 Lee et al (16)은 본 연구와 동일한 미세히터와 초당 1000 frame 을 촬영할 수 있는 CCD 카메라를 이용하여 냉매 R11 로서 포화상태에서의 열적 성장 영역에서의 기포의 성장에 대한 일정 벽면온도 실험을 수행하였고, 그 결과를 다른 이전의 연구 결과들과 비교 발표하였다.

본 연구에서는 포화상태의 풀비등 실험을 과열과 과냉의 효과 없이 단일 기포의 성장을 분석하기 위해 대기압하의 그리고 포화상태의 풀에서 냉매 R113 (포화온도: 47.6 °C)을 이용하여 일정 벽면온도 조건에서 수행되었다. 측정된 결과는 가열벽면을 통해서 공급되는 순간적인 열전달량과 기포의 성장시 촬영된 이미지를 이용한 기포 형상의 결과를 포함한다. 이미지로부터 얻어진 기포 형상의 결과들은 이전 연구들의 결과를 동일한 크기로 비교하기 위하여 차원해석을 수행하고 기포의 성장영역별 거동을 나타내는 특성 반경과 시간의 크기를 구하였다. 단일 기포의 성장에 있어서 열전달양을 정량적으로 분석하기 위하여 앞서 언급한 미세히터를 적용하였고 벽면으로부터 공급되는 순

간적인 열전달율과 고속 CCD 카메라를 이용하여 초당 5000 frame 으로 측면에서 촬영한 기포 사진을 분석하여 기포 성장과 열전달양과의 관계를 정량적으로 분석하였다.

2. 실 험

2.1 실험장치

본 연구에서는 가열벽면을 일정 온도로 유지하면서 열전달양을 측정하기 위해 미세히터를 이용하였는데, 양면을 투명하게 가공한 유리 웨이퍼 위에 VLSI 기술을 이용하여 제작되었다. 우선 열증착 방법을 이용하여 Ti/Pt 층(히터)을 만들고, 파워라인으로 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 삼성종합기술원의 도움으로 제작되었다.

미세히터 배열 내의 96 개 히터의 온도는 열선풍속계에 적용되는 휘트스톤 브리지회로 96 개에 의하여 개별적으로 조정된다. 이를 위해서 각 온도에 대한 보정 실험이 수행되었다.(16)

계측 시작 신호는 고속 CCD 카메라에도 동시에 전달되어 영상 데이터가 히터의 발열양 데이터와 동기화되어 저장된다. 미세히터를 이용한 자세한 실험 기법은 Rule 과 Kim (6)과 배성원등 (7) 및 Bae et al (17)의 논문에 기술되어 있다. Fig. 1 처럼 주 실험부는 측면과 밑면에서 동시에 고속 CCD 카메라를 이용하여 촬영할 수 있도록 설계되었다. 그리고 챔버 내부 액체의 온도를 조절하기 위하여 챔버 바깥면에 10 W/in^2 용량의 박막 히터를 부착하였다. 고속 CCD 카메라의 촬영시에 필요한 조명을 위해 150W 용량의 Cold light 를 이용하였다. 기포는 고속 CCD 카메라 (Redlake 사의 HG-100K)를 이용하여 촬영한 것이다.

2.2 기포의 형상

촬영된 이미지로부터 기포의 형상을 Fig. 2 와 같이 수직으로는 축대칭의, 수평으로는 비대칭 구조의 형태로 가정하였다.

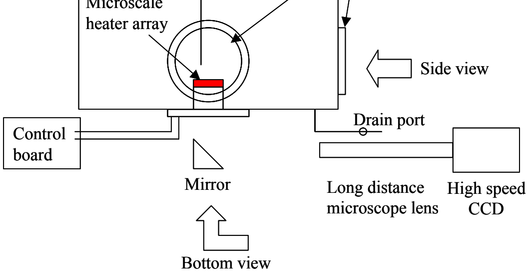

Fig. 1 Schematics of the experimental apparatus

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

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

그리고 증발에 의해서 기포의 체적 변화가 발생한다고 가정한다면 기포로 공급되는 열전달율과 기포 반지름은 다음과 같은 관계가 성립하게 된다.

$$\dot{q} = \dot{m}h_{fg} = 4\pi\rho_v h_{fg} R^2 \frac{dR}{dt} \quad (2)$$

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

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

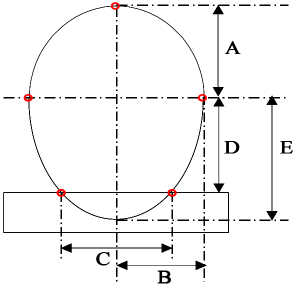

Fig. 2 Geometry of a truncated sphere

3. 실험 결과

3.1 차원 해석

기포의 성장은 기포내의 기체와 기포 주위의 액체사이의 압력차에 의해 특성화될 수 있다고 가정하면, 특성 속도 크기는 driving potential 로부터 다음과 같다. 2/3 는 Mikic et al (11)의 무차원 매개변수와의 비교를 위해 삽입된 것이다.

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

특성 시간 크기는 경계를 통한 열전도율과 기포 생성으로부터 공급된 상응하는 전체 열전달량과의 비로서 결정될 수 있다.

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

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

여기서 기포 주위의 액체는 포화되어 있고 기포의 성장은 벽면 과열에 의해 영향을 받아야만 하므로, Ja 수는 특성 온도 크기로 사용되는 벽면 과열도 ($\Delta T = T_{wall} - T_{sat}$)를 이용하여 $(\rho_l C_{P_l}\Delta T)/(\rho_v h_{fg})$ 로 정의된다. 식(4)와 (5)로부터, 특성 반경과 시간 크기는 아래와 같이 결정되어 진다.

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

무차원의 기포 반경과 시간은 다음과 같다.

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

Mikic et al 은 기포의 운동이 아래와 같은 확장된 Rayleigh-Plesset 식에 의해 지배된다고 가정하였다.

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

압력차와 우변의 두번째 항을 비교하여, 동일한 특성 속도 크기가 유도되어질 수 있다. 또한 압력차가 일정하고 Clausius-Clapeyron 관계식을 이용하여 과열도에 의해 대체될 수 있다고 가정하였다.

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

그리고 Plesset 과 Zwick (9)의 성장율이 또한 특성 크기를 위해 이용되었다. 이렇게 하여 다음의 매개 변수들이 제안되었다.

$$R_c=\frac{\frac{12}{\pi}Ja^2\alpha}{\sqrt{\frac{\pi}{7}\frac{\rho_v h_{fg}\Delta T}{\rho_l T_s}}},\quad t_c=\frac{\frac{12}{\pi}Ja^2\alpha}{\frac{\pi}{7}\frac{\rho_v h_{fg}\Delta T}{\rho_l T_s}} \tag{10}$$

위의 Mikic et al (11)의 크기는 본 연구에서 유도된 식 (6)에 Clausius-Clapeyron 관계식을 적용할 때 거의 동일한 관계식이 얻어짐을 알 수 있다. 따라서 위의 식 (10)의 특성 반경과 시간의 크기는 대기기간 이후에 생성된 기포가 초기의 압력차를 가지고 성장하게 되는, 즉 관성이 지배하는 영역을 잘 모사할 수 있을 것으로 판단된다.

열적 성장 영역에서는 크기 매개변수로서 이탈 반경을 이용할 것이다. 이탈시점 근처에서는 반경 방향의 가속도와 속도가 무시할 수 있으므로 압력차는 이탈 반경과 관계되어 질 수 있다.

$$\Delta P=\frac{2\sigma}{R_d} \tag{11}$$

따라서 열적 성장 영역에서의 특성 반경과 시간 크기는 아래의 식과 같이 정리된다.

$$R_c=\frac{\sqrt{27}}{2}Ja\,\alpha\sqrt{\frac{\rho_l R_d}{\sigma}},\ t_c=\frac{9}{4}Ja\,\alpha\frac{\rho_l R_d}{\sigma} \tag{12}$$

마지막으로, 열전달율의 특성 크기는 식 (2)로부터 얻어진다.

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

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

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

위의 식들을 이용하여 특성 열전달율을 구하고 이를 이용하여 무차원의 측정된 열전달율을 구할 수 있다. 기포의 생성 직후에 열전달율은 급격히 증가하게 되는데, 무차원의 측정된 열전달율의 시간에 대한 기울기는 약 16 이었다. 특성 연전달율의 단위 변화에 대한 특성 시간의 변화는 1/16 이고, 초기 성장 영역동안 열전달율에 있어서의 변화에 대한 차원 시간 차이는 아래의 식과 같이 나타난다.

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

윗 식을 이용하여, 열전달율에 있어서의 단위 변화에 대해 평가된 시간 변화는 3.4×10^{-6} (0.294 MHz) 이었다. 그러므로, 가열 제어의 시간 분해능은 열전달율의 빠른 증가동안 정확한 제어를 유지하기 위해서는 이 값보다 커야만 한다. 그런데 본 연구에서는 4MHz 의 발진소자(Oscillator)가 클럭 신호(clock signal)를 위해 적용되었다. 그러므로 최대 클럭 속도는 본 연구의 A/D 시스템에서는 발진소자 속도의 반 즉 2 MHz 가 된다. 따라서 본 연구에서 적용되는 가열 벽면의 시간 제어 분해능은 서론에서 이전의 일정 열유속 실험들과 달리 요구되는 조건을 충분히 만족함을 알 수 있었다.

3.2 초기 성장 영역에서의 기포 거동

본 연구에서 촬영된 기포의 형상으로부터 측정된 반경을 이용하여 확장된 Rayleigh-Plesset 방정식(8)에서의 우변의 각 항들의 값을 계산하여 Fig. 3 에 나타내었다. Robinson 과 Judd (1)의 구분에 따른다면 기포내의 증기압이 시스템의 압력과 거의 동일해질 때 까지를 초기 성장영역으로 고려할 수 있을 것이다. 결과로부터 알 수 있듯이 R113 의 경우는 초기 성장 영역(표면장력 그리고 관성 지배영역)의 경우는 대략 1.0~1.2 ms 정도인 것으로 나타났다. 무차원 값으로는 약 150~200 정도이었다.

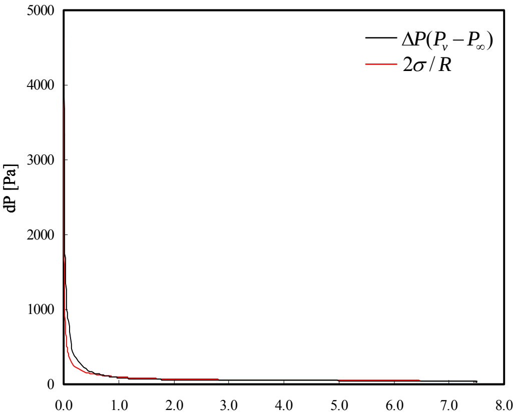

Fig. 3 Variations in the pressure difference to the growth time

초기 성장 영역에서의 기포의 크기는 물질별로 상당히 차이가 남을 알 수 있었는데, 본 연구에서 적용된 R113 의 경우가 기포크기가 제일 작으며,

동일한 33 의 Ja 수에서의 물의 경우는 물리적인 크기로 최대 10 배 정도 큼을 알 수 있었다. 각 물질별로 그래프에서 표시된 시간이 다른 이유는 본 연구에서 이용된 R113 의 실험결과로부터 기포의 압력에 의해 결정되어진 초기 거동의 시간을 무차원화한 시간으로 계산하고 (무차원 시간크기로 하면 약 150~200 정도임) 이를 다른 물질에서의 시간으로 환산하여 이전의 실험 결과들을 나타낸 것이다. 위의 결과들을 무차원화하여 나타내면 아래의 Fig. 4 와 같이 나타나는데, 이의 결과로부터 초기 성장영역에서의 기포의 거동은 물질이나 Ja 수에 관계없이 일정한 성장율을 가짐을 알 수 있다.

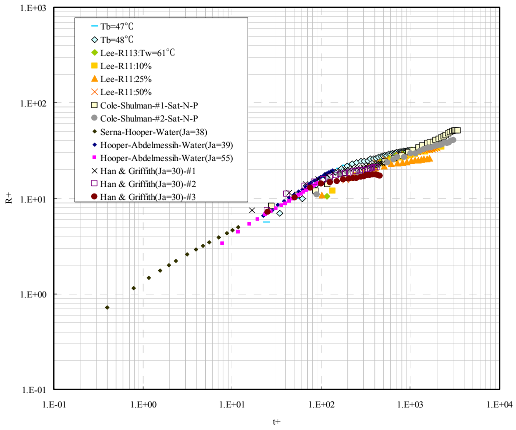

Fig. 4 Dimensionless equivalent bubble radius to dimensionless growth time

3.3 열적 성장 영역에서의 기포 거동

열적 성장 영역에서의 기포의 물리적인 크기도 초기 거동영역에서와 마찬가지로 물질별로 큰 차이가 있는데, 기포의 성장 특성을 식(12)의 특성길이와 시간을 이용하여 무차원화하면 아래의 Fig. 5 와 같다.

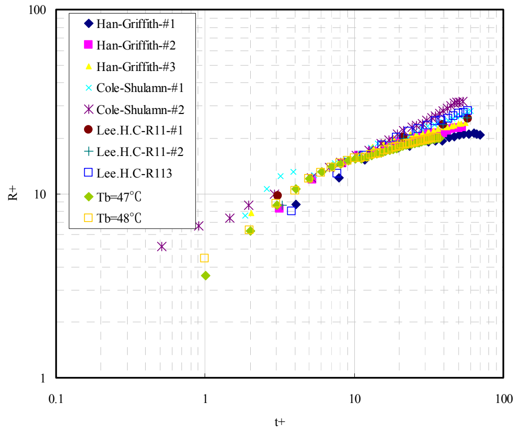

Fig. 5 Dimensionless equivalent bubble radius to dimensionless growth time

Fig. 5 에서와 같이, 열적 성장 영역에서의 기포 거동도 Ja 수와 물질과 관계없이 일정한 성장율을 가지는 것으로 나타났다.

3.4 포화상태의 기포 거동

초기 성장 영역과 열적 성장 영역에서의 Ja 수와 물질에 상관없이 나타나는 각 영역에서의 일정한 기포의 성장율은, 초기 성장 영역에서는 시간의 약 2/3 승에 비례하는 특성으로 기존의 Rayleigh 의 해석적인 결과보다는 낮게 나타난다. 이는 Rayleigh 의 해석적인 결과가 일정한 기포와 시스템의 압력차를 가정하여 나타나는 결과인데 반하여, 실제의 기포 성장시에는 압력차가 일정하지 않으므로 성장율이 감소하는 것으로 판단할 수 있다. 또한 Mikic 의 결과에서와 같이 무차원 시간이 1 보다 아주 많이 작은 경우에 기포의 반경이 시간의 1 승에 비례한다고 하였는데, 이 영역은 Robinson 과 Judd (1)의 결과에 따르면 표면장력 지배 영역인 것으로 판단된다. Robinson 과 Judd 의 계산 결과로부터 구분된 영역은 표면장력 지배영역은 무차원 시간으로 0.00014 에서 0.014 까지, 관성 지배영역은 0.014 에서 139.74 인 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서의 무차원 시간이 0.1~150 까지의 영역은 초기 성장 영역 중에서 관성 지배영역으로 판단할 수 있다. 이러한 초기 관성 지배시간 영역에서 벽에서 측정된 열전달율이 최대가 되는 영역까지의 시간과 또한 일치하는 경향을 알 수 있었다. 표면장력 지배 영역에서의 기포의 거동을 촬영하기 위해서는 R113 경우는 약 14Mfps 의 성능이, 물은 약 2.4Mfps 의 성능이 필요함을 알 수 있는데 이는 현실적으로 불가능하다.

열적 성장 영역에서의 성장율은 다소 차이를 보이고 있는데 이는 근본적으로는 기포의 형상의 가정으로부터 야기됨을 알 수 있었다. 본 연구의 열적 성장 영역에서의 시간의 약 1/5 승에 비례하는 경향을 나타내는데, 이는 미세히터에서 측정된 열전달율의 결과에서와 같이 측정된 열전달율이 1ms 이후에 감소하는 경향과 일치함을 알 수 있다. 식 (2)에서의 관계처럼 열적 성장 영역에서 기포의 성장율이 시간의 1/3 승보다 크거나 같으면 열전달율은 증가하거나 일정하여야 하는데, 열전달율의 측정결과에서와 같이 열적 성장 영역에서 열전달율은 증가하지 않고 감소하는 경향을 보여주고 있는 것이다.

기포의 성장을 위한 순간 열전달율을 Fitting 식을 이용하여 계산하고, 순간적인 열전달율을 적산하여 측정된 기포의 크기로부터 성장에 필요한 전체 열전달율을 구하였다. 이를 이용하여 순간 요구되는 열전달율과 벽에서 미세히터를 이용하여 측정된 열전달율을 무차원화하면 Fig. 6 에서와 같이 벽에서 측정된 열전달율이 필요한 열전달율의 약 50% 정도임을 알 수 있다. 이의 결과는 기존의 Koffman 과 Plesset 등의 연구 결과들에서 예측된 것과 거의 비슷한 결과이다. 나머지 50%는 대기기간동안 과열된 액체가 기포의 생성 이후에 경계를 통한 열전달(경계 냉각 효과)의 영향인 것으

로 판단된다.

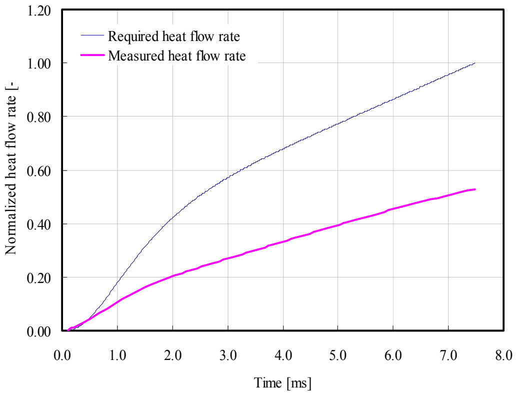

Fig. 6 Normalized heat flow rate comparison between measured at wall and

4. 결 론

본 연구에서는 일정 벽면 온도 조건에서 풀핵비등 시에 단일 기포의 성장에 대하여 정량적인 분석을 수행하였다.

무차원 해석을 통하여 초기 성장 영역과 열적 성장 영역을 잘 모사할 수 있는 특성 반경과 시간의 크기를 제안하였다. 초기 성장 영역의 특성치들은 이전의 Mikic et al (11) 의 크기들과 거의 일치함을 알 수 있었다. 이러한 특성치들을 이용하여 각각의 성장 영역별로 이전의 다른 물질들에 대한 실험 결과들과 비교하였다. 초기 성장 영역에서는 물질과 실험 조건에 관계없이 시간의 약 2/3 승에 비례하는 성장율을 보이는데, 이 영역은 본 연구에서 구분하는 영역으로는 관성 지배영역으로 판단된다. 초기 영역은 기포의 증기압과 시스템의 압력이 거의 일정해지는 영역이며, 가열벽면에서 측정한 열전달율이 최대값에 도달하는 시간과 일치함을 알 수 있다. 열적 성장 영역에서도 마찬가지로 기존의 일정 열유속 실험 결과들과 함께 성장율이 시간의 약 1/5 승에 비례하는 특성을 나타내는데, 이는 가열벽면에서 측정된 열전달율과 기포의 성장에 필요한 전체 열전달율의 경향과 일치함을 알 수 있다.

벽면으로부터 공급된(측정된) 열전달율의 측정결과는 기포의 성장에 요구되는 열전달율에 비해 포화 상태의 경우에 약 50% 정도인 것으로 나타났다. 이는 이전의 여러 결과들과 일치하는 것이다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실사업의 연구비로 수행되었으며, 또한 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., 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) 배성원, 이한춘, 김무환 (2000) “Wall Heat Flux Behavior of Nucleate Pool Boiling Under a Constant Temperature Condition in a Binary Mixture System,” 대한기계학회논문집 B 권, 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. , 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.