

고체의 전도를 포함한 기포성장의 복합적 해석

손 기 현[†]

(2002년 10월 4일 접수, 2002년 12월 17일 심사완료)

Conjugate Analysis of Bubble Growth Involving Conduction in Solid

Gihun Son

Key Words: Bubble Growth(기포성장), Nucleate Boiling(핵비등), Conjugate Analysis(복합적 해석), Level Set Method(Level Set 방법)

Abstract

Numerical analysis of bubble motion during nucleate boiling is performed by imposing a constant heat flux condition at the base of a heater which occurs in most of boiling experiments. The temporal and spatial variation of a solid surface temperature associated with the bubble growth and departure is investigated by solving a conjugate problem involving conduction in the solid. The vapor-liquid interface is tracked by a level set method which is modified to include the effects of phase change at the interface, contact angle at the wall and evaporative heat flux in a thin liquid micro-layer. Based on the numerical results, the bubble growth pattern and its interaction with the heating solid are discussed. Also, the effect of heating condition on the bubble growth under a micro-gravity condition is investigated.

기호설명

c_p : 비열
 g : 중력 가속도
 g_e : 지상에서의 중력 가속도
 H : 검사체적내의 액상의 체적비, 식 (5)
 h_{ev} : 증발 열전달계수
 h_{fg} : 증발 잠열
 x : 열전도율
 l_o : 길이의 대표값, $\sqrt{\sigma/g(\rho_l - \rho_v)}$
 Nu : Nusselt 수, $l_o q / k_s \Delta T_w$
 p : 압력
 q : 열유속

q_{micro} : 마이크로 액체층에서의 열유속
 R, Y : 계산영역의 크기
 R_o, R_1 : 마이크로 액체층의 범위, Fig. 1
 R_v : 기체상수
 r, y : 원통좌표계
 T : 온도
 ΔT_o : 가열벽면의 과열도, $T_o - T_{sat}$
 ΔT_w : 비등벽면의 과열도, $T_w - T_{sat}$
 t : 시간
 t_o : 시간의 대표값, $\sqrt{l_o/g}$
 \vec{u} : 속도벡터, (u, v)
 \vec{u}_{int} : 상경계면의 속도벡터
 β : 열팽창계수
 Δ : 격자 간격
 δ : 마이크로 액체층의 두께
 χ : 상경계면의 곡률

[†] 회원, 서강대학교 기계공학과

E-mail : gihun@ccs.sogang.ac.kr

TEL : (02)705-8641 FAX : (02)712-0799

- μ : 점성계수
 ρ : 밀도
 σ : 표면장력계수
 ϕ : Level Set 함수
 φ : 기포면-벽면의 접촉각

하첨자

- int : 상경계면
 l : 액상
 o : 가열벽면 ($y = -Y_s$), Fig. 1
 s : 고체
 sat : 포화상태
 v : 기상
 w : 비등벽면 ($y = 0$), Fig. 1

1. 서 론

핵비등은 매우 효과적인 열전달 형태이기 때문에 발전, 냉동·공조 등 다양한 에너지변환 시스템에서 응용되고 있다. 최근에는 전자칩과 같은 마이크로시스템에서 발생하는 고발열 문제의 해결방안으로 주목받고 있다. 핵비등에 대한 기존의 연구는 주로 실험을 통하여 열전달계수를 예측하는 관계식을 개발하는데 집중되었다. 이러한 관계식은 얻어진 실험조건과 다른 조건에 있는 문제에 확대 적용되기 어렵고, 복잡한 핵비등 현상을 올바르게 이해하는데 큰 도움이 되지 못하고 있다. 핵비등 현상의 해석에서 어려운 점은 가열벽면의 특성뿐만 아니라 열전달에 직접 영향을 주는 기포거동의 복잡한 특성을 고려하여야 한다는 점이다.

최근 들어, 핵비등과 관련된 기포성장 및 이탈을 동반한 열·유동을 수치적으로 해석하려는 연구가 시도되고 있다. Lee와 Nydahl⁽¹⁾은 기포면에 정렬된 body-fitted 격자를 사용하여 수평 가열벽면에서 성장하는 기포와 이에 동반되는 유동 및 열전달을 해석하였다. 그러나, 그들의 수치방법은 성장하는 기포의 형상을 반구형태로 가정해야 하는 한계가 있었다. 이동하는 비직교 격자를 이용하여 기포의 형상을 해의 일부로서 얻는 연구가 Welch⁽²⁾에 의해 수행되었으나, 그의 계산결과는 기포의 초기 성장과정에 한정되었다. Takata 등⁽³⁾은 상변화를 고려하도록 수정한 VOF(Volume of

Fluid) 방법을 사용함으로 기포의 성장뿐만 아니라 이탈과정을 해석할 수 있었다. 상경계면은 이동하는 격자대신에 차분화된 검사체적에서 액상이 차지하는 체적의 비로 정의된 VOF 함수에 의해 결정되었다. Takata 등은 가열벽면에서의 헬름 기포의 거동을 해석하였으나, 물과 같이 액상/기상의 밀도비가 큰 유체에 대한 계산을 수행할 수 없었다.

Son 등⁽⁴⁾은 Sussman 등⁽⁵⁾이 제시한 LS(Level Set) 방법을 바탕으로 상변화와 기포면-고체표면의 접점근처에 형성되는 마이크로 액체층(liquid micro-layer)에서의 증발효과를 추가적으로 고려함으로써 수증기포의 성장 및 이탈과정을 해석할 수 있었다. LS 함수는 상경계면으로부터의 거리로 정의되는 함수이며, 미분이 연속적이기 때문에 계단함수를 사용하는 VOF 방법보다 상경계면의 곡률을 정확하게 계산할 수 있다는 장점이 있다. Son 등은 일정한 벽면온도 조건을 사용한 수치해석으로부터, 기포면-벽면의 접점이 이동함에 따라 열전달계수가 상당히 변할 수 있음을 보였다. 이는 전기적인 가열조건과 같이 균일한 열유속 조건을 사용하는 비등실험의 경우, 가열벽면의 온도가 일정하지 않음을 의미한다. Cooper와 Lloyd⁽⁶⁾는 톨루엔을 사용한 핵비등 실험에서 미세한 막저항 온도계를 0.5-1.5mm 간격으로 배치함으로써 가열벽면의 온도변화를 측정하였다. 실험은 20mm 정도의 큰 기포를 얻을 수 있는 저압에서 수행되었으며, 기포의 성장에 따라 가열벽면의 온도가 시간과 공간에 대해 변하는 결과를 얻었다. 가열벽면의 온도변화를 고려한 비등현상에 대한 해석은 Mei 등⁽⁷⁾에 의해서 이루어졌으나, 그들의 해석에서는 기포거동을 동반한 유동의 영향을 무시하였다.

본 연구에서는 핵비등에서의 기포거동과 가열벽면의 열전달 특성간의 상호작용에 대한 이해를 넓히기 위해, 균일 벽면온도 조건뿐만 아니라 실험에서 주로 사용하는 균일 열유속 조건에서의 기포거동에 대한 수치해석을 수행하였다. 또한, 인공위성과 같이 중력이 감소될 때 벽면의 가열조건이 기포거동에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 수치 해석

2.1 지배방정식

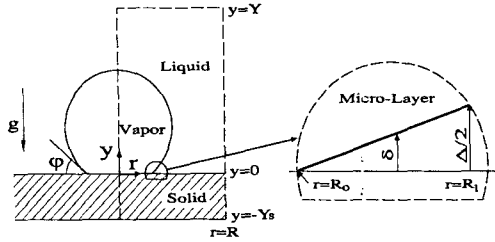


Fig. 1 Computational domain with a liquid micro-layer

본 연구에서는 핵비동에서의 기포거동에 동반되는 유동을 축대칭, 비압축성과 층류로 가정하였다. 또한, 기체의 열전도율은 작기 때문에 기포 내부에서의 열전달을 고려하지 않았다. Fig. 1은 기포성장의 계산에 사용된 계산영역을 나타낸다. 기포면은 기상에서 음의 값, 액상에서 양의 값을 가지는 상경계면으로부터 거리로 정의된 LS (Level Set) 함수에 의해 계산되었다.

가열되는 고체에서의 에너지 보존식과 기상-액상에서의 에너지, 운동량 및 질량 보존식은 다음과 같이 표현된다.

$$\rho_s c_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s \nabla^2 T_s \quad \text{if } y < 0 \quad (1)$$

$$\rho c_{pl} \frac{DT_l}{Dt} = \nabla \cdot k \nabla T_l \quad \text{if } H > 0 \quad (2)$$

$$T_l = T_{sat} \quad \text{if } H = 0$$

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\nabla p + \rho \vec{g} - \rho \beta (T_l - T_{sat}) \vec{g} - \sigma \kappa \nabla H + \nabla \cdot \mu [\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T] \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = \frac{k \nabla T \cdot \nabla \rho}{\rho^2 h_{fg}} + \left(\frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_l} \right) \frac{q_{micro}}{h_{fg}} \quad (4)$$

여기서, 차분화된 검사체적내에서 액상이 차지하는 체적비(H), 상경계면의 곡률(κ), 물성치는 다음과 같이 계산된다.

$$H = 1 \quad \text{if } \phi \geq +1.5\Delta$$

$$= 0 \quad \text{if } \phi \leq -1.5\Delta \quad (5)$$

$$= \frac{1}{2} + \frac{\phi}{3\Delta} + \frac{\sin(2\pi\phi/3\Delta)}{2\pi} \quad \text{otherwise}$$

$$\kappa = \nabla \cdot \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \quad (6)$$

$$\rho = \rho_v + (\rho_l - \rho_v)H \quad (7)$$

$$\mu^{-1} = \mu_v^{-1} + (\mu_l^{-1} - \mu_v^{-1})H \quad (8)$$

$$k^{-1} = k_l^{-1}H \quad (9)$$

식 (4)에서 $k \nabla T \cdot \nabla \rho / \rho^2 h_{fg}$ 는 상변화로 인한 체적증가량이며, 상경계면에서의 에너지 균형으로부터 유도되었다. q_{micro} 는 Fig. 1에서 표현된 것처럼 기포면-벽면의 접점 근처에 형성되는 마이크로 액체층으로부터 기포로 전달되는 열유속이다. 본 연구에서는 마이크로 액체층을 기포면이 벽면과 접하는 점에서 액체층의 두께가 $\Delta/2$ (벽면과 ϕ 의 첫 격자간의 간격)인 영역으로 정의하였다. 마이크로 액체층의 두께(δ)는 매우 얇기 때문에 q_{micro} 를 다음과 같이 계산하였다.

$$q_{micro} = \frac{k_l (T_w - T_{int})}{\delta} \quad \text{for } R_0 \leq r \leq R_1 \quad (10)$$

위의 식으로부터, δ 가 감소하여 영에 가까워지면 상경계면의 온도(T_{int})는 벽면의 온도(T_w)까지 증가하여야 함을 알 수 있다. 마이크로 액체층에서 증발 열전달량은 수정된 Clausius-Clayperon 방정식으로부터 다음과 같이 표현된다.⁽⁸⁾

$$q = h_{ev} [T_{int} - T_{sat} + (p_l - p_v) T_{sat} / \rho_l h_{fg}] \quad (11)$$

여기서, h_{ev} 는 분자운동역학으로부터 구해진다.

$$h_{ev} = (2 / \pi R_v T_{sat})^{1/2} \rho_v h_{fg}^2 / T_{sat} \quad (12)$$

식 (11)에서 $(p_l - p_v) T_{sat} / \rho_l h_{fg}$ 는 $T_{int} - T_{sat}$ 보다 작아서 무시할 수 있다고 가정하면,⁽⁹⁾ 식 (10)과 (11)로부터 q_{micro} 를 구할 수 있다.

$$q_{micro} = \frac{T_w - T_{sat}}{\delta / k_l + 1 / h_{ev}} \quad (13)$$

여기서, $1 / h_{ev}$ 는 상경계면에서의 열저항을 의미한다. δ 의 기울기는 기포면-벽면 접점을 제외한 부분에서 거의 일정함으로,⁽⁹⁾ 접촉각(contact angle)을 사용하여 다음과 같이 가정하였다.

$$\delta = (r - R_o) \tan \varphi \quad (14)$$

상경계면의 속도(\vec{u}_{int})는 상경계면에서의 에너지 균형을 나타내는 식 (15)에 의해 결정되며, 상경계면을 포함하는 각 격자점에서의 LS 함수(ϕ)는 식 (15)를 계산영역 전체로 확장하여 정의된 속도에 의해 이루어진다.

$$\vec{u}_{int} = \vec{u} + k\nabla T / \rho h_{fg} \quad (15)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{u}_{int} \cdot \nabla \phi = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} = \frac{\phi_o}{\sqrt{\phi_o^2 + \Delta^2}} (1 - |\nabla \phi|) \quad (17)$$

여기서, ϕ_o 은 식 (16)의 해이며, τ 는 식 (17)의 우변이 상경계면 주위에서 영이 될 때까지 계산하는 반복단계를 의미한다. 상경계면($\phi=0$)은 식 (16)에 의해 결정되지만, H 와 x 를 정확하게 계산하기 위해 LS 함수를 거리함수가 되도록 식 (17)을 사용하여 보정하였다.

2.2 경계조건

Fig. 1에 나타난 계산영역의 경계조건은 다음과 같다.

· 고체의 밑면 또는 가열벽면($y = -Y_s$):

$$-k_s \frac{\partial T_s}{\partial y} = q_o \quad (18)$$

· 고체의 윗면 또는 비등벽면($y = 0$):

$$u = v = 0, \quad T_s = T_l, \quad \frac{\partial \phi}{\partial y} = -\cos \varphi, \\ -k_s \frac{\partial T_s}{\partial y} = -k_l \frac{\partial T_l}{\partial y} + q_{micro} \quad (19)$$

· 대칭면($r = 0, R$):

$$u = \frac{\partial v}{\partial r} = \frac{\partial T_l}{\partial r} = \frac{\partial T_s}{\partial r} = \frac{\partial \phi}{\partial r} = 0 \quad (20)$$

· 계산영역의 윗면($y = Y$):

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0, \quad T_l = T_{sat} \quad (21)$$

식 (19)에서 LS 함수의 경계조건으로 사용된 기포면-벽면의 접촉각(φ)은 유체의 물성치와 벽면

의 재질, 표면상태, 온도에 따라 다른 값을 갖는다. 본 연구에서는 Siegel과 Keshock⁽¹⁰⁾의 니켈-물을 사용한 비등실험에서 측정된 38°의 접촉각을 사용하였다. 접촉각이 기포거동에 미치는 영향에 대한 계산은 선행연구⁽⁴⁾에서 수행되었으며, 이탈되는 기포의 크기를 성장주기로 나눈 기포성장률은 접촉각에 별로 영향을 받지 않는 결과를 얻었다. 그러므로, 기포거동과 가열벽면의 열전달 특성간의 상호작용을 고찰하기 위한 본 연구에서 접촉각의 크기는 별로 중요하지 않다. 기포면-벽면의 접점이 이동할 때, 이상적인 매끄러운 고체 표면에서는 접촉각이 일정한 값을 갖지만, 비등 실험에서 사용되는 일반적인 고체의 표면에서는 접촉각이 일정하지 않고 다소 변동하게 된다. 이와 같이 접촉각의 변동이 기포거동에 미치는 영향은 본 연구에서 고려되지 않았다. 균일 벽면온도 조건($T_l = T_w = const$)에서는 고체의 전도방정식을 풀지 않았다.

운동량 및 에너지 보존식과 LS 이류방정식의 대류항은 explicit 방법, 확산항은 fully implicit 방법을 사용하여 차분화하였고, 운동량 및 질량 보존식은 투사법(projection method)을 사용하여 계산하였다.

위에서 서술한 수치해석방법을 검증하기 위해 격자수가 결과에 미치는 영향에 대한 계산을 선행연구⁽⁴⁾에서 수행하였다. 계산에 사용된 격자의 수를 두 배로 증가시켰을 때 기포 성장주기의 변화는 2% 이내였으며 이탈되는 기포의 형상은 거의 일치하였다. 또한, 선행연구⁽⁴⁾의 균일 벽면온도 조건에서 얻은 계산결과는 Siegel과 Keshock⁽¹⁰⁾의 실험데이터와 잘 일치하였다.

3. 계산결과 및 검토

지배방정식과 변수를 무차원화하기 위해, 길이의 대표값으로는 표면장력과 부력의 비를 나타내는 $l_o = \sqrt{\sigma/g(\rho_l - \rho_v)}$ 과 시간의 대표값으로 $t_o = \sqrt{l_o/g}$ 을 이용하였다. 계산영역의 반경과 높이는 $(R, Y) = (l_o, 3l_o)$ 이고 사용된 격자 간격은 $\Delta = l_o/96$ 이다. 고체영역의 격자간격은 y 방향으로 $Y_s/40$ 을 사용하였다. 계산에 필요한 무차원 매개변수는 대기압에서 포화상태인 물의 물

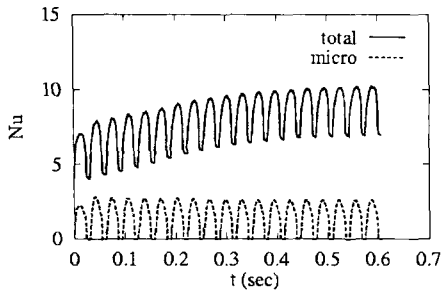


Fig. 2 Temporal variation of area-averaged Nusselt number for $\Delta T_w = 8.5^\circ C$ and $g = g_e$

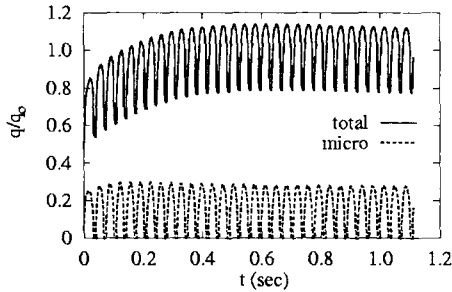


Fig. 3 Temporal variation of area-averaged heat flux for $q_0 = 2.0 W/cm^2$ and $g = g_e$

성치로부터 계산되었다. 지상에서의 중력가속도를 사용하면 l_0 은 $2.5mm$ 이다. 가열되는 고체로는 마이크로시스템의 가공에 많이 사용되는 실리콘 ($\rho_s c_{ps} / \rho_l c_{pl} = 0.41$, $k_s / k_l = 231$)을 선택하였으며, 두께(Y_s)로는 $1mm$ 를 사용하였다. 균일 벽면 온도 조건에서의 기포성장에 대한 계산을 먼저 수행하고, 여기서 얻어진 평균열량을 이용하여 균일 열유속 조건에서의 기포성장에 대한 계산을 수행하였다.

Fig. 2는 균일 벽면온도($\Delta T_w = 8.5^\circ C$) 조건에서 계산된 무차원 열전달량을 면적에 대해 평균한 값을 나타낸다. 핵비등 현상은 가열조건이 변하지 않는 한 주기적으로 반복되는 현상이므로, 계산은 초기조건의 영향이 없어지고 열전달량이 주기와 주기간에 변화가 없을 때까지 수행되었다. 균일 열유속 조건에서의 기포거동에 대한 계산을 위해, Fig. 2에서 주기성을 가지는 18과 19번째 주기의 열전달량을 시간에 대해 평균한 값을 고체의 밑면(가열벽면)에 가해지는 열유속(q_0)으로 이용하였다. 이와 같이 열유속을 선택한 것

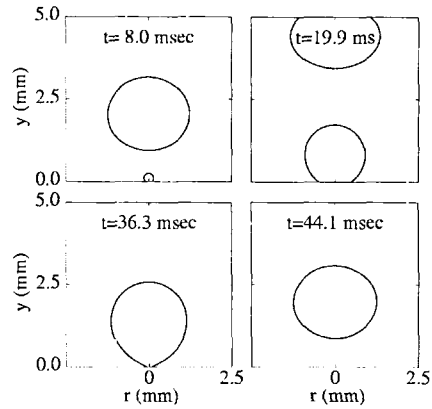


Fig. 4 Bubble growth pattern for $q_0 = 2.0 W/cm^2$ and $g = g_e$

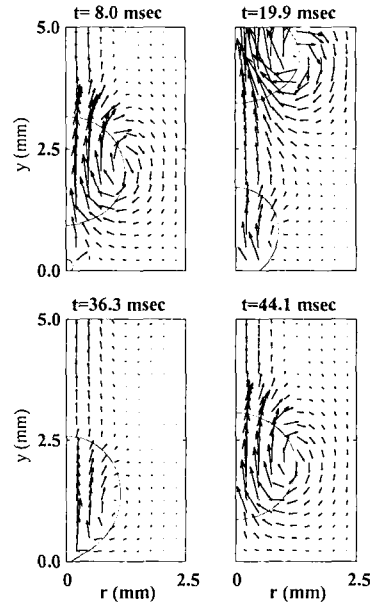


Fig. 5 Flow fields for $q_0 = 2.0 W/cm^2$ and $g = g_e$

은 유체에 전달되는 전체열량을 일정하게 하면서 가열조건에 따른 기포성장의 변화를 살펴보기 위해서이다. 고체의 윗면(비등벽면)에서 유체로 전달되는 면적에 대해 평균한 열량은 Fig. 3과 같다. 초기에는 고체내부의 온도분포에 대한 초기조건의 영향으로 가열벽면의 열전달량과 비등벽면의 열전달량이 다르다. 시간이 지남에 따라 초기조건의 영향은 없어지고 비등벽면에서의 열전달량은 주기적으로 변하지만 시간에 대해 평균한 열전달량은 가열벽면의 열전달량과 같게 된다. Fig. 3에서 기포면-벽면의 점점 근처에 형성되는

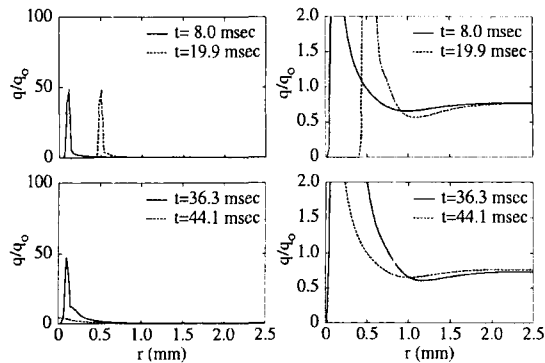


Fig. 6 Local wall heat flux for $q_o = 2.0 \text{ W/cm}^2$ and $g = g_e$

마이크로 액체층에서 전달되는 열량은 전체 열전달량의 약 17% 정도이며, 이 비율은 Fig. 2의 균일 벽면온도 조건의 경우와 같다.

Figs. 4와 5는 수평 비등벽면에서의 기포성장 및 이탈과정동안 상경계면의 변화와 이에 따른 유동장의 변화를 나타낸다. 기포성장의 초기에는 기포가 성장함에 따라 기포-벽면의 접촉면적 또한 확장된다. 그러나, 기포의 성장은 벽면에서의 마찰력과 접촉각을 유지하려는 표면장력이 증가함에 따라 $t=20\text{msec}$ 에서 둔화되기 시작한다. 또한, 기포성장과 부력에 의해 발생하는 시계방향의 와류가 기포의 성장과 함께 강해지게 되면, 기포-벽면의 접촉면적은 수축하게 된다. 접촉면적의 수축은 기포를 벽면에 유지하는 표면장력의 힘을 감소시키기 때문에 빠르게 진행되며, 결국 기포는 $t=36\text{msec}$ 에서 벽면으로부터 이탈되게 된다. Lee와 Nydahl⁽¹⁾을 포함한 기존의 많은 연구에서는 기포 성장에 동반된 유동을 제대로 해석하지 못했기 때문에, 기포에 작용하는 합력이 벽면의 반대방향으로 작용할 때 기포가 이탈된다는 모델을 제시하였다. 그러나, 이는 밀도가 작은 기포의 관성을 무시하면 힘의 합력은 항상 영이라는 사실과 상충된다. 본 연구에서는 기포거동을 포함하는 2상유동을 직접 수치해석함으로써 기포의 이탈과정을 실험에 의존한 모델을 사용하지 않고 모사할 수 있었다. 핵비등에서는 기포의 생성, 성장 및 이탈과정이 주기적으로 반복되어 일어난다. 본 연구에서는 기포생성에 필수적인 가열면에 존재하는 공동(cavity)과 이탈되는 기포의 크기를 동시에 고려할 만큼 격자를 잡을 수 없었기 때문에, 기포의 생성과정을 직접 모사하는 대신

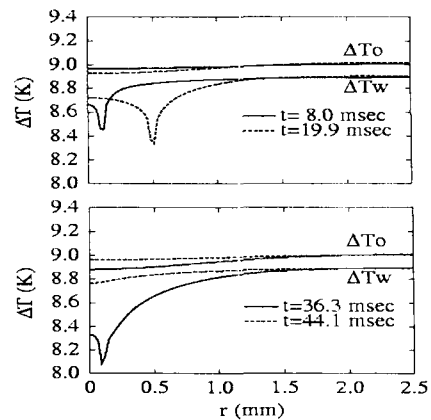


Fig. 7 Spatial variation of solid temperature for $q_o = 2.0 \text{ W/cm}^2$ and $g = g_e$

기포가 이탈된 후 매우 작은 기포를 벽면에 추가함으로 기포성장 및 이탈과정에 대한 주기적인 모사를 수행하였다. 기포의 추가는 이탈된 기포가 충분히 상승하여 추가되는 기포의 성장에 영향을 주지 않는 시점에서 이루어졌다.

기포 성장에 따른 비등벽면에서의 열유속의 분포는 Fig. 6과 같다. 열유속은 마이크로 액체층에서 최대값을 가지며, 이 값은 평균 열유속(q_o)의 50배 정도이다. 마이크로 액체층의 면적은 기포면-벽면의 접촉점의 위치에 따라 변하며, 이로 인해 면적에 대해 평균한 열유속은 Fig. 3에 나타난바와 같이 시간에 따라 주기적으로 변하게 된다. 또한, $t=44\text{msec}$ 에서 기포가 벽면에서 이탈되면, 이탈된 기포의 상승으로 인해 생기는 공간에 상대적으로 차가운 액체가 유입됨으로 벽면의 중심에서 열전달이 증가한다. 그러나, 기포가 벽면에 붙어있을 때 형성되는 마이크로 액체층에서 일어나는 열전달량보다 작기 때문에 전체 열전달량은 기포가 이탈했을 때 줄어든다.

Fig. 7은 균일한 열유속으로 가열되는 벽면($y = -Y_o$)과 비등이 일어나는 벽면($y = 0$)에서의 온도분포를 나타낸다. 비등벽면에서는 Fig. 6과 같이 기포 성장에 따른 열유속의 변화가 크기 때문에 균일하지 않는 온도분포를 나타낸다. 비등벽면의 온도는 열전달량이 큰 마이크로 액체층 부근에서 최소가 되며, 기포면-벽면의 접촉점으로부터 멀어짐에 따라 상승하는 분포를 가진다. 비등벽면에서의 온도는 약 0.9°C 정도 변하지만 가열벽면에서의 온도변화는 0.1°C 이내로 제한된

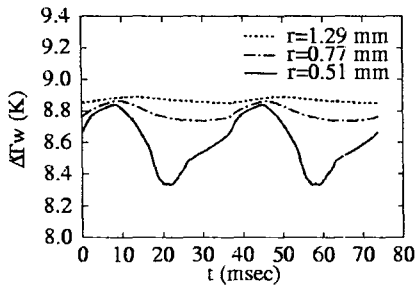


Fig. 8 Temporal variation of wall temperature for $q_o = 2.0 W/cm^2$ and $g = g_e$

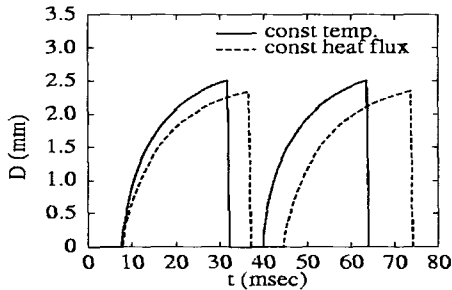


Fig. 9 Comparison of bubble growth with different heating conditions for $g = 1g_e$

다. 이는 비등벽면의 열유속의 불균일성이 큰 열전도율을 가진 고체 내부에서 급격히 감소하기 때문이다.

비등벽면에서 시간에 따른 온도변화는 Fig. 8과 같다. 비등벽면의 온도는 기포성장이 시작되기 직전인 $t=8msec$ 에서 최대값을 가지며 기포성장에 따라 기포와 벽면 접촉면적이 확장되어 유체로 전달되는 열량이 최대로 되는 $t=20msec$ 에서 최소값을 가진다. 이와 같은 경향은 Collier⁽¹¹⁾의 기포 성장에 따른 벽면온도 변화에 대한 설명과 일치한다. 기포가 성장하는 영역에서 멀어짐에 따라 온도의 변화는 감소되며, 이는 Fig. 6에서 나타난 바와 같이 $r=R$ 부근의 열유속이 시간에 대해 일정하기 때문이다.

Fig. 9는 균일 열유속($q_o = 2.0 W/cm^2$) 조건에서의 기포성장을 균일 벽면온도 조건의 경우와 비교한 것이다. 유체에 가해진 전체 열전달량이 일정한 경우, 균일 열유속 조건에서의 기포의 성장속도는 균일 벽면온도 조건의 것보다 작음을 볼 수 있다. 이는 전체 열전달량 중에서 기포성장에 사용되는 열전달량의 비율이 균일 열유속 조건의

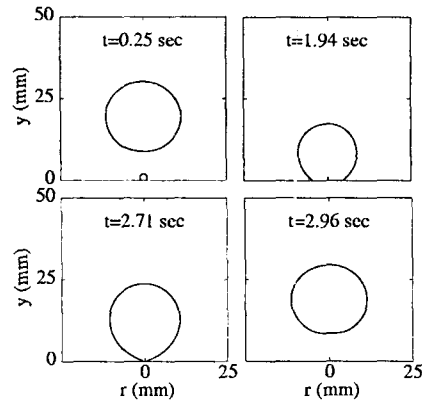


Fig. 10 Bubble growth pattern for $q_o = 0.26 W/cm^2$ and $g = 0.01g_e$

경우에 더 작음을 의미한다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 열전달이 큰 마이크로 액체층 주변에서 비등벽면의 온도가 낮아지며, 이로 인해 열전달량 또한 온도가 일정한 경우의 열전달량 보다 작아지게 되어 기포성장이 느리게 진행된다. 기포 성장이 느려지면 열전달계수 또한 감소하게 되기 때문에, Fig. 7에서 보는바와 같이 비등벽면의 온도가 균일 벽면온도 조건의 $\Delta T_w = 8.5^\circ C$ 보다 높아진다.

본 연구에서는 인공위성과 같이 중력이 달라지는 경우에 가열조건이 기포거동에 미치는 영향을 살펴보았다. 계산은 중력가속도가 1/100로 감소되는 경우에 대해 수행되었으며, 지상에서의 중력가속도를 사용한 경우와 마찬가지로 균일 벽면온도($\Delta T_w = 8.5^\circ C$) 조건에서 얻어진 평균열량을 이용하여 균일 열유속 조건에서의 기포성장을 해석하였다. 또한, 고체의 두께(Y_s)로는 1mm를 사용하였다.

Fig. 10은 수평 비등벽면에서의 기포성장 및 이탈과정을 나타낸다. 지상에서의 중력가속도를 사용하여 얻은 Fig. 4와 비교하면, 기포의 성장 및 이탈 형태는 비슷하지만 이탈되는 기포의 크기는 약 9.3배 증가됨을 볼 수 있다. 이는 이탈되는 기포의 크기가 $0.93/\sqrt{g}$ 에 비례함을 나타내며, Siegel과 Keshock⁽¹⁰⁾의 이탈되는 기포의 크기는 \sqrt{g} 에 반비례한다는 실험결과와 잘 일치한다.

낮은 중력조건에서 가열벽면과 비등벽면의 온

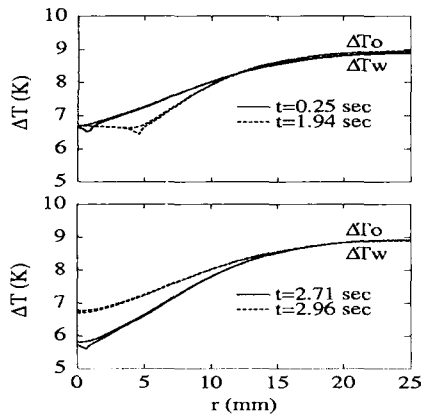


Fig. 11 Spatial variation of solid temperature for $q_o = 0.26 \text{ W/cm}^2$ and $g = 0.01g_e$

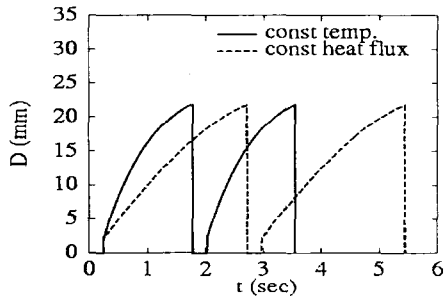


Fig. 12 Comparison of bubble growth with different heating conditions for $g = 0.01g_e$

도분포는 Fig. 11과 같다. 비등벽면의 온도뿐만 아니라 가열벽면의 온도 또한 시간과 공간에 따라 상당히 변화가 크며, 최대 온도변화는 약 3°C 이상임을 볼 수 있다. 이는 $g = 0.01g_e$ 에서 기포가 약 20mm 이상까지 성장하여 가열고체의 두께와 기포크기의 비율이 감소함에 따라 고체의 열용량(thermal capacity)이 상대적으로 작아졌기 때문이다. 이와 같은 온도분포의 심각한 불균일성은 Fig. 12에 나타난바와 같이 기포성장에 상당한 영향을 미친다. 균일 열유속 조건의 기포성장을 균일 벽면온도 조건의 결과와 비교했을 때, 이탈되는 기포의 크기는 별로 달라지지 않지만 기포의 성장기간은 약 70% 정도 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 11에서 보는 바와 같이 균일 열유속 조건에서 기포면-벽면의 접점부근의 벽면온도가 상당히 낮아지게 되면 열전달량 또한 온도가 일정한 경우의 열전달량 보다 작아지게 되므로 기포성장이 둔화되기 때문이다. 그러므로

낮은 중력조건에서는 기포의 거동 특히 기포의 성장속도는 벽면의 가열조건에 따라 상당히 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 Level Set 방법을 이용하여 핵비등에서의 기포성장 및 이탈에 대한 수치해석을 수행하였다. 특히, 기포의 거동과 고체표면의 열전달 특성간의 상호작용을 살펴보기 위해 균일 벽면온도 조건뿐만 아니라 균일 열유속 조건에서 기포거동을 해석하였다. 균일 열유속 조건을 사용하는 경우에는 액상-기상의 열·유동뿐만 아니라 고체의 전도를 함께 고려하였다. 균일 열유속 조건의 수치해석 결과로부터, 기포면-벽면의 접점부근에 형성되는 마이크로 액체층 주변에서의 열유속은 평균 열유속의 50배까지 크며, 이로 인해 비등벽면의 온도는 기포면-벽면의 접점에서 최소가 되며 접점으로부터 멀어짐에 따라 상승하는 분포를 얻었다. 기포의 성장과정에서 기포-벽면의 접촉면적은 확장 및 수축하며, 이에 따라 벽면온도 또한 시간과 공간에 따라 변하는 결과를 얻었다. 균일 열유속 조건에서의 열전달계수와 기포의 성장속도는 균일 벽면온도 조건의 경우보다 작았다. 중력이 달라지는 경우에 가열조건이 기포거동에 미치는 영향을 살펴보기 위해, 중력가속도가 1/100로 감소되는 경우에 대해 해석을 수행하여 기포의 크기는 중력가속도의 제곱근에 반비례하여 증가하는 결과를 얻었다. 가열조건이 기포거동에 미치는 영향은 중력가속도가 감소되어 기포의 크기가 증가하는 경우에 더욱 크게 됨을 발견할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 마이크로 열시스템 연구센터의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Lee, R. C. and Nydahl, J. E., 1989, "Numerical Calculation of Bubble Growth in Nucleate Boiling From Inception Through Departure," *J. Heat Transfer*, Vol. 111, pp. 474-479.

- (2) Welch, S. W. J., 1998, "Direct Simulation of Vapor Bubble Growth," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 41, pp. 1655~1666.
- (3) Takata, Y., Shirakawa, H., Kuroki, T. and Ito, T., 1998, "Numerical Analysis of Single Bubble Departure from a Heated Surface," *Proc. 11th Int. Heat Transfer Conf.*, Vol. 4, pp. 355~360.
- (4) Son, G., Dhir, V. K. and Ramanujapu, N., 1999, "Dynamics and Heat Transfer Associated with a Single Bubble During Nucleate Boiling on a Horizontal Surface," *J. Heat Transfer*, Vol. 121, pp. 623~631.
- (5) Sussman, M., Smereka, P. and Osher, S., 1994, "A Level Set Approach for Computing Solutions to Incompressible Two-Phase Flow," *J. Comput. Phys.*, Vol. 114, pp. 146~159.
- (6) Cooper, M. G. and Lloyd, A. J. P., 1969, "The Microlayer in Nucleate Pool Boiling," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 12, pp. 895~913.
- (7) Mei, R., Chen, W. and Klausner, J. F., 1995, "Vapor Bubble Growth in Heterogeneous Boiling-I. Formulation," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 909~919.
- (8) Wayner, P. C. Jr., 1992, "Evaporation and Stress in the Contact Line Region," *Proc. The Engineering Foundation Conf. On Pool and External Flow Boiling*, pp. 251~256.
- (9) Son, G., 2001, "Numerical Simulation of Bubble Motion During Nucleate Boiling," *Trans. KSME B*, Vol. 25, No. 3, pp. 389~396.
- (10) Siegel, R. and Keshock, E. G., 1964, "Effects of Reduced Gravity on Nucleate Boiling Bubble Dynamics in Saturated Water," *AICHE J.*, Vol. 10, pp. 509~517.
- (11) Collier, J. G., 1972, *Convective Boiling and Condensation*, McGraw-Hill, New York, pp. 128~131.