

미세관에서의 기포성장에 관한 수치적 연구

서기철* · 손기헌†
 (2004년 4월 19일 접수, 2004년 6월 18일 심사완료)

Numerical Study of Bubble Growth in a Microchannel

Kichel Seo and Gihun Son

Key Words: Bubble Growth(기포성장), Contact Angle(접촉각), Level Set Method(Level Set 방법)
 Microchannel(미세관)

Abstract

The bubble motion during nucleate boiling in a microchannel is investigated by numerically solving the equations governing conservation of mass, momentum and energy in the liquid and vapor phases. The liquid-vapor interface is tracked by a level set method which is modified to include the effects of phase change at the interface and contact angle at the wall. Also, the evaporative heat flux from the thin liquid film that forms underneath a growing bubble attached to the wall is incorporated in the analysis. Based on the numerical results, the effects of channel size, contact angle, wall superheat and waiting period on the bubble growth and heat transfer in a microchannel are quantified.

기호설명

c_p : 비열
 g : 중력 가속도
 H : 미세관의 높이
 h_{ev} : 증발 열전달계수
 h_{fg} : 증발 잠열
 k : 열전도율
 L : 미세관의 길이
 p : 압력
 q : 열유속
 q_{micro} : 마이크로 액체층에서의 열유속
 R_v : 기체상수
 T : 온도

ΔT : 가열벽면의 과열도, $T_w - T_{sat}$
 t : 시간
 t^* : 반복 계산 단계
 U_{in} : 관 입구에서의 평균유속
 \vec{u} : 속도벡터, (u, v, w)
 u_m : 관 입구에서의 유속
 \vec{u}_{int} : 상경계면의 속도벡터
 W : 미세관의 폭
 x, y, z : Cartesian 좌표계
 α : 검사체적내의 액상의 체적비
 β : 열팽창계수
 Δ : 격자 간격
 δ : 마이크로 액체층의 두께
 κ : 상경계면의 곡률
 μ : 점성계수
 ρ : 밀도
 σ : 표면장력계수

* 서강대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 서강대학교 기계공학과

E-mail : gihun@sogang.ac.kr

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

- τ_w : 기포생성 대기기간(waiting period)
 ϕ : Level Set 함수
 φ : 기포면-벽면의 접촉각

하첨자

- int : 상경계면
 l, v : 액상, 기상
 sat, w : 포화상태, 벽면

1. 서론

미세관에서의 비등은 매우 효과적인 열전달 형태이기 때문에 고성능의 초소형 전자장치에서 심각하게 대두되고 있는 고발열 문제를 해결하는 방안으로 주목받고 있다. 또한, 액체-기체 상변화에 의한 체적증가를 동반하는 비등현상을 잉크젯 프린터와 같이 미세유동의 이송방법으로 적용하는 방안도 제시되고 있다. 기존의 연구에서는 가열벽면의 온도와 열량을 측정된 데이터로부터 열전달계수를 예측하기 위한 실험관계식을 개발하는데 중점을 두었다. 이와 같은 관계식은 얻어진 실험조건과 다른 조건에 있는 문제에 확대 적용되기 어렵고, 복잡한 비등현상을 올바르게 이해하는데 큰 도움이 되지 못하고 있다. 비등 열전달량을 예측하기 위한 일반적인 모델을 개발하기 위해서는 가열벽면의 특성뿐만 아니라 열전달에 직접 영향을 주는 기포거동의 특성을 파악하여야 한다.

Peng과 Wang⁽¹⁾은 $0.6 \times 0.7 \text{mm}^2$ 단면을 가지는 미세관을 이용한 실험으로부터 미세관에서 측정되는 비등곡선은 큰 관에서 관측되는 비등곡선과 상당히 다르다는 것을 발견하였다. 이러한 차이를 설명하기 위해 미세관에서는 큰 관의 비등과 달리 기포가 발견되지 않는 가상적인 비등(fictitious boiling)⁽²⁾이 일어난다고 주장하였다. 그러나 Peles 등,⁽³⁾ Jiang 등⁽⁴⁾과 Lee 등⁽⁵⁾은 현미경과 고속 디지털 카메라를 이용한 가시화 실험을 통해 Peng과 Wang⁽¹⁾이 사용한 관보다 더 미세한 관에서도 기포의 발생 및 성장을 관측할 수 있었다. 또한, Balasubramanian과 Kandlikar⁽⁶⁾는 높이와 폭이 $0.197 \times 1.054 \text{mm}^2$ 인 미세관에서의 비등 실험을 통해 기포의 발생 및 성장뿐만 아니라 기포가 관의 단면을 채울 만큼 성장하는 슬러그류

(slug flow) 형태로 변화되는 과정을 가시화하였다. 미세관에서의 비등에 대한 기존의 많은 연구에도 불구하고 측정 및 가시화 기술의 한계로 인해 미세관에서의 기포거동 및 열전달 특성에 대한 이해가 상당히 미흡한 실정이다.

최근 들어, 비등현상의 이해를 넓히고 비등 열전달량을 예측하는 방법으로, 실험데이터를 도입하는 대신 기포성장에 동반된 2상유동을 지배하는 질량, 운동량과 에너지 보존의 방정식을 직접 수치적으로 해석하려는 연구가 시도되고 있다. Lee와 Nydahl⁽⁷⁾은 기포면을 따라 정렬된 격자를 사용하여 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⁽⁸⁾에 의해 수행되었으나, 그의 계산은 기포의 초기 성장과정에 한정되었다. Takata 등⁽⁹⁾은 상변화를 고려하도록 수정한 VOF(Volume of Fluid) 방법을 사용함으로써 기포의 성장뿐만 아니라 이탈과정을 해석하였다. 상경계면은 이동하는 격자대신에 차별화된 검사체적에서 액상이 차지하는 체적의 비로 정의된 VOF 함수에 의해 결정되었다. Takata 등은 가열벽면에서의 헬름기포의 거동을 해석하였으나, 물과 같이 액상/기상의 밀도비가 큰 유체에 대한 계산을 수행할 수 없었다.

Son⁽¹⁰⁾은 Sussman 등⁽¹¹⁾이 제시한 LS(Level Set) 방법을 바탕으로 상변화와 기포-고체의 접점근처에 형성되는 마이크로 액체층(liquid microlayer)에서의 증발효과를 추가적으로 고려함으로써 수증기포의 성장 및 이탈과정을 해석할 수 있었다. LS 함수는 상경계면으로부터의 거리로 정의되는 미분이 연속적인 함수이며, 계단함수를 사용하는 VOF 방법보다 상경계면의 곡률을 정확하게 계산할 수 있기 때문에 마이크로 스케일 2상유동에서 부각되는 표면장력의 효과를 정확하게 고려할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 상변화와 접촉각 효과를 고려한 LS 방법을 이용하여 미세관에서의 비등에 동반되는 기포거동과 열전달을 해석하고자 한다. 특히, 관의 크기, 접촉각, 과열도와 기포생성 대기시간의 변화가 기포거동과 열전달 특성에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

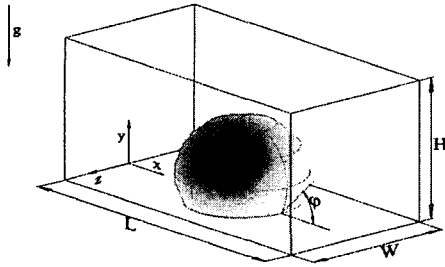


Fig. 1 Computational domain

2. 수치 해석

2.1 지배방정식

본 연구에서는 미세관에서의 기포성장에 동반되는 유동을 비압축성과 층류로 가정하여 해석하였다. 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 함수 (ϕ)에 의해 추적되었다.

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

$$\begin{aligned} \rho c_p \frac{DT}{Dt} &= \nabla \cdot k \nabla T & \text{if } \alpha > 0 \\ T &= T_{sat} & \text{if } \alpha = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{D\vec{u}}{Dt} &= -\nabla p + \rho \vec{g} - \rho \beta (T - T_{sat}) \vec{g} \\ &\quad - \alpha \kappa \nabla \alpha + \nabla \cdot \mu [\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = \frac{k \nabla T \cdot \nabla \rho}{\rho^2 h_{fg}} + \left(\frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_l} \right) \frac{q_{micro}}{h_{fg}} \quad (3)$$

여기서, 차별화된 검사체적내에서 액상이 차지하는 체적비(α), 상경계면의 곡률(κ)과 물성치는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \alpha &= 1 & \text{if } \phi \geq +1.5\Delta \\ &= 0 & \text{if } \phi \leq -1.5\Delta \\ &= \frac{1}{2} + \frac{\phi}{3\Delta} + \frac{\sin(2\pi\phi/3\Delta)}{2\pi} & \text{otherwise} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\kappa = \nabla \cdot \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \quad (5)$$

$$\rho = \rho_v + (\rho_l - \rho_v)\alpha \quad (6)$$

$$\mu^{-1} = \mu_v^{-1} + (\mu_l^{-1} - \mu_v^{-1})\alpha \quad (7)$$

$$k^{-1} = k_l^{-1}\alpha \quad (8)$$

식 (3)에서 $k \nabla T \cdot \nabla \rho / \rho^2 h_{fg}$ 는 상변화로 인한 체적증가량이며, 상경계면에서의 에너지 균형으로부터 유도되었다. q_{micro} 는 기포면-벽면의 접촉선 (contact line) 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.⁽¹⁰⁾

$$q_{micro} = \frac{T_w - T_{sat}}{\delta / k_l + 1 / h_{ev}} \quad (9)$$

여기서, δ 는 접촉선에 수직방향으로의 기울기는 $\tan \varphi$ 로 가정할 수 있다는 조건으로부터 결정되었다. $1/h_{ev}$ 는 상경계면에서의 열저항을 의미하며, h_{ev} 는 분자운동역학으로부터 구할 수 있다.

$$h_{ev} = (2 / \pi R_v T_{sat})^{1/2} \rho_v h_{fg}^2 / T_{sat} \quad (10)$$

상경계면의 속도(\vec{u}_{int})는 상경계면에서의 에너지 균형을 나타내는 식 (11)에 의해 결정되며, 상경계면을 포함하는 각 격자점에서의 LS 함수(ϕ)는 식 (11)을 계산영역 전체로 확장하여 정의된 속도에 의해 이뤄진다.

$$\vec{u}_{int} = \vec{u} + k \nabla T / \rho h_{fg} \quad (11)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{u}_{int} \cdot \nabla \phi = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t^*} = \frac{\phi_0}{\sqrt{\phi_0^2 + \Delta^2}} (1 - |\nabla \phi|) \quad (13)$$

여기서, ϕ_0 은 식 (12)의 해이며, t^* 는 식 (13)의 우변이 상경계면 주위에서 영이 될 때까지 계산하는 반복단계를 의미한다. 상경계면($\phi = 0$)은 식 (12)에 의해 결정되지만, α 와 κ 을 정확하게

계산하기 위해 LS 함수를 거리함수가 되도록 식 (13)을 사용하여 보정하였다.

2.2 경계조건

Fig. 1에 나타난 계산영역의 경계조건은 다음과 같다.

· 입구 ($x = 0$):

$$u = u_{in}, v = w = 0, T = T_{sat}, \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (14)$$

· 출구 ($x = L$):

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (15)$$

· 채널의 밑면 ($y = 0$):

$$u = v = w = 0, T = T_w, \frac{\partial \phi}{\partial y} = -\cos\varphi \quad (16)$$

· 채널의 윗면 ($y = H$):

$$u = v = w = \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \frac{\partial \phi}{\partial y} = -\cos\varphi \quad (17)$$

· 채널의 대칭면 ($z = 0$):

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = w = \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (18)$$

· 채널의 측면 ($z = W/2$):

$$u = v = w = \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \frac{\partial \phi}{\partial z} = -\cos\varphi \quad (19)$$

여기서, φ 는 기포가 벽면과 만날 때 형성되는 접촉각이며, 열전달은 채널의 밑면에서만 일어난다고 가정하였다. 또한, 채널의 입구에서 유동은 완전히 발달되었다고 가정하였으며, 평균속도(U_m)가 주어지면 유속의 분포는 변수분리법을 사용하여 구할 수 있다.

3. 계산결과 및 검토

위에서 서술한 수치해석방법을 검증하기 위해 평판에서의 기포성장에 대한 계산을 선행연구⁽¹⁰⁾에서 수행하였다. 계산에 사용된 격자의 수를 두 배로 증가시켰을 때 기포 성장주기의 변화는 2% 이내였으며 이탈되는 기포의 형상은 거의 일치하였다. 또한, 선행연구⁽¹⁰⁾에서 얻은 계산결과는 실험데이터와 잘 일치하는 것을 확인하였다.

본 논문에서는 대기압 포화상태의 물의 물성치와 $U_m = 0.16 \text{ m/sec}$ 를 사용하고, 높이(H)와 폭(W)

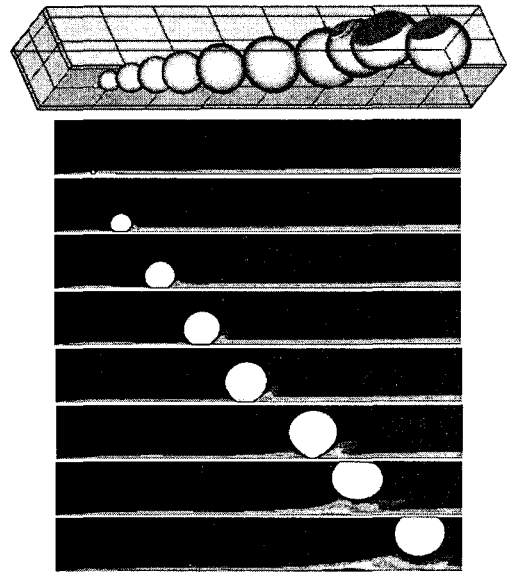


Fig. 2 Bubble growth pattern and temperature field at $H=3\text{mm}$, $\Delta T=5^\circ\text{C}$ and $\varphi=40^\circ$

이 같고 길이(L)는 20mm 인 사각 미세관에 대한 계산결과를 나타내었다. 모든 경우의 계산은 두 단계로 이루어졌다. 먼저 기포를 포함하지 않는 액체의 단상유동이 정상상태에 도달할 때까지 계산을 수행하고, 여기서 얻은 유동장과 온도장을 기포성장 계산의 초기조건으로 사용하였다. 기포 거동에 대한 계산은 아주 작은 구형의 기포를 채널의 밑면의 $x=2\text{mm}$ 위치에 주입한 뒤 기포가 성장 및 이동하면서 채널의 출구에 도달할 때까지 수행하였다. 본 연구에서는 기포생성에 필수적인 가열면에 존재하는 cavity와 이탈되는 기포의 크기(또는 관의 크기)를 동시에 고려할 만큼 격자를 잡을 수 없었기 때문에, 기포의 생성과정을 직접 모사하는 대신 매우 작은 기포를 벽면에 추가함으로써 기포성장에 대한 수치적인 모사를 수행하였다. 본 연구에서 사용하는 해석모델은 연속체 이론과 기포가 가열표면의 cavity에서 생성된다는 가정에 근거를 두고 있다. 연속체 이론은 관의 크기가 분자의 평균자유거리의 100배(약 $7\mu\text{m}$) 이상에서 적용가능하며, 기포생성을 위한 cavity의 크기는 약 $1\text{-}2\mu\text{m}$ 이상⁽¹²⁾인 점을 고려하면, 현 모델의 적용범위는 미세관의 크기가 약 $10\mu\text{m}$ 정도까지라고 사료된다.

Fig. 2는 $H=3\text{mm}$ 인 경우의 기포거동과 온도분포를 나타낸다. 초기에는 기포가 가열되는 밑면

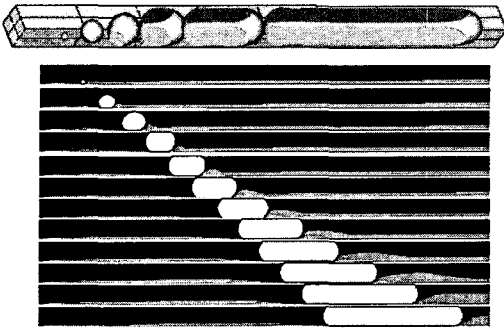


Fig. 3 Bubble growth pattern and temperature field at $H=1mm$, $\Delta T=5^\circ C$ and $\phi=40^\circ$

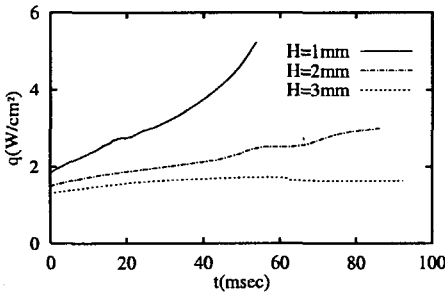


Fig. 4 Effect of channel size on area-averaged heat flux at $\Delta T=5^\circ C$ and $\phi=40^\circ$

을 따라 미끄러지면서 성장하다가 기포체적에 비례해서 증가되는 부력이 기포를 밑면에 유지하려는 표면장력보다 커지게 되면 기포는 밑면으로부터 이탈된다. 이탈된 기포는 열경계층을 벗어나서 채널의 윗면까지 상승한 후 성장에 필요한 열을 공급 받지 못한 상태로 윗면을 따라 이동한다. 기포의 이탈 및 상승에 의해 야기되는 유동은 Fig. 2에 나타난바와 같이 열경계층을 두껍게 하여 벽면으로부터의 열전달을 감소시킨다. 관의 크기가 1mm로 감소할 때 기포의 거동은 Fig. 3과 같다. 관의 크기가 기포의 이탈크기보다 작기 때문에 기포는 관의 기하적인 형상에 구속된 상태로 성장하게 된다. 이탈 없이 벽면에 붙어 있는 기포는 지속적으로 열을 공급받으면서 관의 길이 방향으로 성장하게 됨에 따라 기포형상은 Balasubramanian과 Kandlikar⁶⁾의 실험에서 관측한바와 같이 슬러그형태로 변하게 된다.

Fig. 4는 관의 크기에 따른 열전달량의 변화를 나타낸다. t=0에서의 값은 앞에서 서술한바와 같이 기포성장 계산의 초기조건인 정상상태의 단상 유동에 대한 열전달량을 나타낸다. 관의 크기가

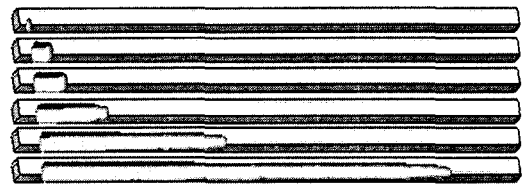


Fig. 5 Bubble growth pattern at $H=0.2mm$, $\Delta T=5^\circ C$ and $\phi=40^\circ$

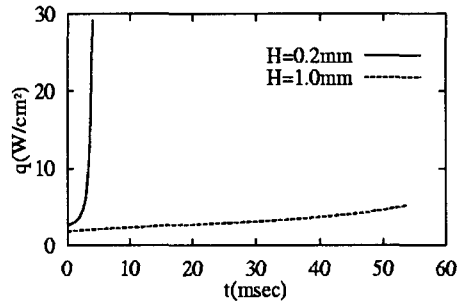


Fig. 6 Area-averaged heat flux at $H=0.2mm$, $\Delta T=5^\circ C$ and $\phi=40^\circ$

기포의 이탈크기보다 작아질수록 큰 관의 경우와 달리 시간에 따라 열전달량이 기하급수적으로 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이는 기포의 이탈크기보다 작은 관에서는 기포가 벽면에 접촉한 상태로 성장함에 따라 상변화 열전달이 일어나는 면적이 시간에 따라 증가하기 때문이다. $H=1mm$ 일 때 열전달량은 기포성장을 동반하지 않는 단상유동의 경우에 비해 2.9배 증가하였다. 관의 크기가 기포의 이탈크기보다 작은 경우와 큰 경우에 기포성장의 유형이 상당히 다르기 때문에, 비등을 동반하는 관의 경우 열전달 특성에 따라 큰 관과 미세관을 구분한다면 Thome¹²⁾에 의해 제시된바와 같이 기포의 이탈크기가 중요한 기준이 될 수 있음을 알 수 있다. 관의 크기가 더욱 작아져서 $H=0.2mm$ 일 때의 기포거동은 Fig. 5와 같다. Fig. 3의 기포거동과 비교하면 기포성장은 관이 미세해질수록 훨씬 빨리 일어남을 볼 수 있다. 기포의 성장속도가 빨라져 유동방향의 증기속도가 증가함에 따라 Fig. 5의 마지막 그림에서 보는바와 같이 기포주변의 액체층이 점점 넓어져 기포주변을 액막이 감싸는 형태가 되고, 2상유동 형태는 연속적인 액상유동과 기상유동이 공존하는 환상류(annular flow)로 유형이 바뀌게 된다. 또한 기포의 빠른 성장으로 인한 상변화 열전달

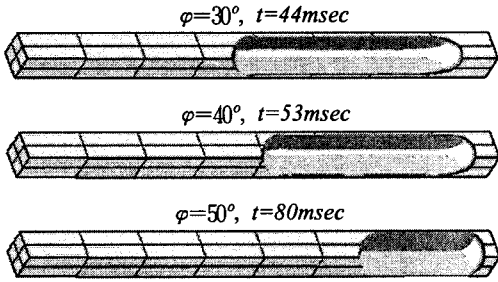


Fig. 7 Effect of contact angle on bubble shape at $H=1mm$ and $\Delta T=5^{\circ}C$

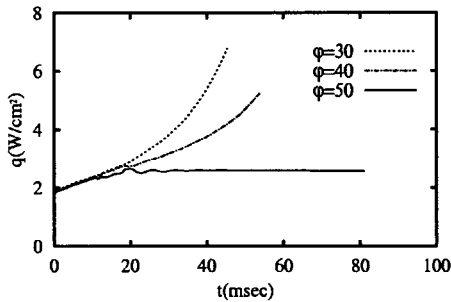


Fig. 8 Effect of contact angle on heat transfer at $H=1mm$ and $\Delta T=5^{\circ}C$

면적의 증가는 Fig. 6에 나타나는 것처럼 가열면으로부터 전달되는 열량의 현저한 증가를 동반하게 된다. 열전달량은 기포성장을 동반하지 않는 단상유동의 경우에 비해 11.9배 증가하였고, $H=1mm$ 의 경우와 비교하면 최대 열전달량은 5.6 배, 시간에 대하여 평균한 열전달량은 2.3배 증가하였다.

Figs. 7과 8은 접촉각이 기포형상과 열전달에 미치는 영향을 나타낸다. 접촉각이 작아질수록 기포의 성장속도와 열전달량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 접촉각이 커져 50° 가 되면 열전달량의 증가는 기포성장의 초기단계를 제외하면 거의 이루어지지 않게 된다. 이러한 현상은 채널의 모서리 근처에서의 기포형상으로부터 설명할 수 있다. 접촉각이 증가함에 따라 기포는 채널의 모서리 방향으로 성장하는 것이 보다 용이하게 되어 Fig. 9에 나타난바와 같이 액체층의 영역이 좁아진다. 접촉각이 50° 인 경우에는 기포의 선단과 후단을 제외하면 채널의 단면에서 액체층이 차지하는 부분이 없어지게 된다. 기포가 성장하더라도 액체-기체 상변화가 일어나는 경계면이 기포

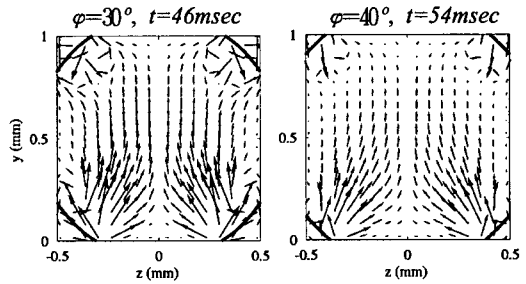


Fig. 9 Bubble shape and velocity field in the cross-section of $x=17.5mm$ at $H=1mm$ and $\Delta T=5^{\circ}C$. The thick solid lines represent the liquid-vapor interfaces

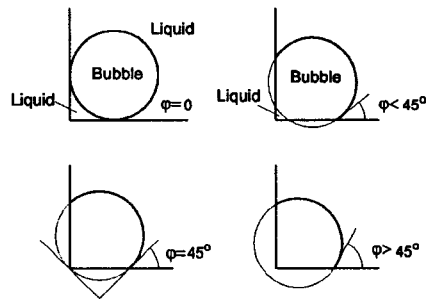


Fig. 10 Schematic of bubble configurations near the channel corner with different contact angles

의 선단과 후단에 제한되기 때문에 열전달량 및 기포의 성장속도가 시간에 따라 가속화되는 현상이 일어나지 않게 된다. 이와 같이 기포성장과 열전달에 중요한 역할을 하는 액체층이 채널 모서리 부분에 존재하기 위해서는, Fig. 10에 나타난 것처럼 구형으로 가정한 기포와 채널 모서리와의 기하학적인 관계로부터 접촉각이 45° 보다 작아야함을 유추할 수 있다. $H=0.2mm$ 인 미세관에서도 $\phi=50^{\circ}$ 인 경우에는 $\phi=40^{\circ}$ 의 결과인 Fig. 6과 같은 열전달량의 증가를 볼 수 없었다. 그러므로 미세관에서의 비등열전달을 향상시키기 위한 설계조건 중의 하나는 접촉각이 45° 보다 작도록 유체와 관의 재질을 선택하는 것이라고 사료된다.

Fig. 11은 과열도에 따른 기포형상의 변화를 나타낸다. 과열도가 커질수록 기포의 성장속도 및 이동속도가 증가함을 볼 수 있다. 또한, 과열도에 따라 기포는 길이뿐만 아니라 채널 벽면과 닿은 형태도 다르게 된다. $\Delta T=10^{\circ}C$ 인 경우에는 채널

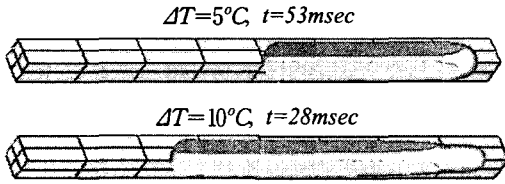


Fig. 11 Effect of wall superheat on bubble shape at $H=1mm$ and $\phi=40^\circ$

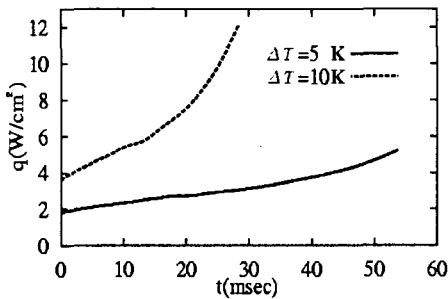


Fig. 12 Effect of wall superheat on heat transfer at $H=1mm$ and $\phi=40^\circ$

의 모서리 부근에 존재하는 액체층이 유동방향에 따라 넓어지며, 출구 근처에서는 액상이 기포를 감싸는 연속적인 액막 형태로 나타난다. 이는 과열도가 커짐에 따라 빨라진 기포의 성장이 유동 방향의 기체속도를 증가시키기 때문이다. 이와 같은 유동의 형태는 관의 크기가 0.2mm일 때 나타난 슬러그류에서 환상류로 천이되는 과정과 유사하다. 과열도에 따른 열전달량의 변화는 Fig. 12와 같다. 단일기포가 성장하는 미세관에서 과열도가 2배 증가할 때 최대 열전달량은 2.3배, 시간에 대한 평균 열전달량은 2배 증가하였다.

실제 미세관의 비등에서는 기포의 생성, 성장 및 이류 과정이 주기적으로 반복해서 일어난다. 생성된 기포가 유동에 의해 이류된 후 기포가 차지하고 있던 공간에 열경계층이 성장하게 되면 또 다른 기포가 생성될 수 있는 조건을 만족하게 된다. 기포가 이류된 후 다음 기포가 생성될 때까지의 시간 즉 대기기간(waiting period)은 과열도, 접촉각 및 cavity의 크기에 따라 달라지며,⁽¹³⁾ 본 연구에서는 대기기간을 매개변수로 하는 계산을 수행하였다. 특정한 cavity에서 성장한 기포가 이류된 후 대기기간이 지나면 또 다른 작은 기포를 cavity 위치에 주입하였다. 이때 LS 함수는 새로운 기포 주위에서 거리함수가 되도록 수정되지만 지배방정식과 경계조건에 특별한 변경은 이루

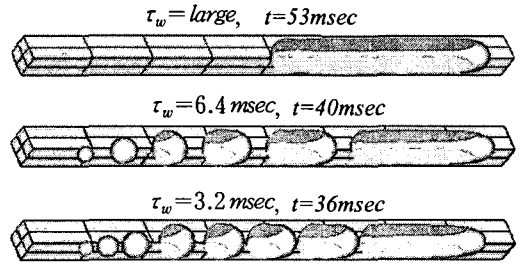


Fig. 13 Effect of waiting period on bubble shape at $H=1mm$, $\Delta T=5^\circ C$ and $\phi=40^\circ$

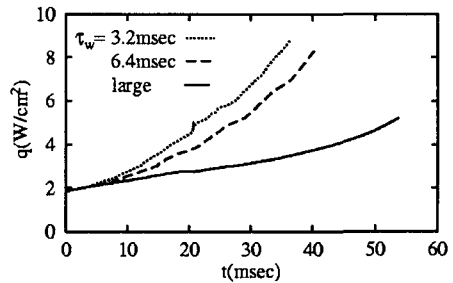


Fig. 14 Effect of waiting period on heat transfer at $H=1mm$, $\Delta T=5^\circ C$ and $\phi=40^\circ$

어질 필요가 없다. Figs. 13과 14는 대기기간(τ_w)이 기포거동과 열전달에 미치는 영향을 나타낸다. 대기기간이 짧아져서 미세관내에 기포의 수 또는 기상 체적비가 증가할수록 열전달량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한, 미세관에서 기포가 성장 및 이동하는 과정에서 대기기간이 짧아져서 기포-기포 간격이 작아져도 기포간의 합체는 잘 일어나지 않는 것을 관찰할 수 있다. 이는 기포성장 또는 액상-기상 체적변화로 인해 유동 방향을 따라 평균유속이 증가하기 때문이다. 즉 선행기포보다 나중에 생성된 기포의 성장은 선행기포의 이동을 더욱 촉진하게 된다. 이러한 경향은 Fig. 14에 나타난바와 같이 대기기간이 짧아질수록 선행기포가 출구에 도달하는 시간이 짧아지는 것으로부터 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 상변화와 접촉각 효과를 고려한 Level Set 방법을 이용하여 미세관에서의 비등에 동반되는 기포거동과 열전달을 해석하였다. 관의 크기, 접촉각, 과열도와 기포생성 대기기간을 변

화시켜 수치해석한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

관의 크기가 기포의 이탈크기보다 작아지면 관에서 관찰되는 비등현상과 달리 열전달량은 기포의 성장과 함께 기하급수적으로 증가하였다. 기포성장을 동반하는 미세관에서 열전달량은 단상유동의 경우와 비교하면, $H=1mm$ 일 때 2.9배, $H=0.2mm$ 일 때 11.9배 향상되었다. 관의 크기가 미세해질수록 기포의 성장속도와 열전달량이 증가하며, 2상유동의 형태는 기포가 관의 단면을 가득 채우는 슬러그류 또는 환상류로 천이하는 것을 확인할 수 있었다.

채널 모서리 부근에 형성되는 액체층은 기포성장 및 열전달에 중요한 역할을 하며, 기포면-벽면 접촉각은 이러한 액체층의 면적을 결정하는 중요한 인자임을 발견하였다. 접촉각이 증가할수록 액체층의 영역이 좁아지며 접촉각이 45° 이상인 경우에는 채널의 단면에서 액체층이 차지하는 부분이 없어졌다. 그러므로 미세관에서의 비등열전달을 향상시키기 위한 설계조건은 하나의 접촉각이 45° 보다 작게 되도록 유체와 관의 재질을 선택하는 것이라고 사료된다.

단일기포가 성장하는 미세관에서 열전달량은 과열도에 거의 비례하여 증가하며, 기포성장 대기기간이 짧아져서 관내에 기포가 차지하는 면적이 증가할수록 열전달량이 증가하는 것을 관찰할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 마이크로 열시스템 연구센터의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Peng, X. F. and Wang, B. X., 1993, "Forced Convection and Flow Boiling and Heat Transfer for Liquids Flowing Through Microchannels," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 3421~3427.
- (2) Peng, X. F., Hu, H. Y. and Wang, B. X., 1998, "Boiling Nucleation During Liquid Flow in Microchannels," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 41, pp. 101~106.
- (3) Peles, Y. P., Yarin, L. P. and Hetsroni, G., 2001, "Steady and Unsteady Flow in a Heated Capillary," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 27, pp. 577~598.
- (4) Jiang, L., Wong, M. and Zohr, Y., 2001, "Forced Convection Boiling in a Microchannel Heat Sink," *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 10, pp. 80~87.
- (5) Lee, M., Wong, Y. Y., Wong, M. and Zohar, Y., 2003, "Size and Shape Effects on Two-Phase Flow Patterns in Microchannel Forced Convection," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 13, pp. 155~164.
- (6) Balasubramanian, P. and Kandlikar, S. G., 2003, "High Speed Photographic Observation of Flow Patterns During Flow Boiling in Single Rectangular Minichannel," Paper No. HT2003-47175, *Proc. HT2003 ASME Summer Heat Transfer Conference*, Las Vegas, Nevada, July 21-23.
- (7) 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.
- (8) Welch, S. W. J., 1998, "Direct Simulation of Vapor Bubble Growth," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 41, pp. 1655~1666.
- (9) 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.
- (10) Son, G., 2001, "Numerical Simulation of Bubble Motion During Nucleate Boiling," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 25, No. 3, pp. 389~396.
- (11) 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.
- (12) Thome, J. R., 2004, "Boiling in Micro Channels: a Review of Experiment and Theory," *Int. J. Heat Fluid Flows*, Vol. 25, pp. 128~139.
- (13) Hsu, Y. Y. and Graham, R. W., 1976, *Transport Processes in Boiling and Two-Phase Systems*, Hemisphere, Washington, pp. 15~18.