

마이크로 핀 표면 핵비등에서의 기포거동에 대한 수치적 연구[§]

이 우 림* · 손 기 현**†

* 서강대학교 기계공학과

Numerical Study of Bubble Motion During Nucleate Boiling on a Micro-Finned Surface

Woorim Lee* and Gihun Son**†

* Dept. of Mechanical Engineering, Sogang Univ.

(Received April 19, 2011 ; Revised May 17, 2011 ; Accepted May 17, 2011)

Key Words: Bubble Motion(기포거동), Nucleate Boiling(핵비등), Micro-finned Surface(마이크로 핀 표면), Level-Set Method(레벨셋 방법)

초록: 열전달 향상을 위한 방법으로 많이 사용되고 있는 마이크로 핀을 포함한 표면 위에서의 핵비등을 액상과 기상에서 질량 및 운동량, 에너지에 대한 지배 방정식을 풀어 수치해석을 수행하였다. 핵비등에서의 기포거동을 계산하기 위해 sharp-interface 레벨셋(level-set) 방법을 상변화 효과와 핀과 캐비티와 같은 잠긴 고체에서의 점착 조건 및 접촉각, 마이크로 액체층에서의 증발 열유속을 포함하도록 수정하였다. 핀과 캐비티를 포함한 표면에서의 기포 생성, 성장, 이탈에 대한 해석을 통하여 핀-캐비티 배열, 핀-핀 간격이 핵비등에서의 기포거동에 중요한 역할을 하는 것을 확인하였다.

Abstract: Numerical simulation is performed for nucleate boiling on a micro-finned surface, which has been widely used to enhance heat transfer, by solving the equations governing the conservation of mass, momentum, and energy in the liquid and vapor phases. The bubble motion is determined by a sharp-interface level-set method, which is modified to include the effect of phase change and to treat the no-slip and contact-angle conditions, as well as the evaporative heat flux from the liquid microlayer on immersed solid surfaces such as micro fins and cavities. The numerical results for bubble formation, growth, and departure on a microstructured surface including fins and cavities show that the bubble behavior during nucleate boiling is significantly influenced by the fin-cavity arrangement and the fin-fin spacing.

- 기호설명 -

- c_p : 비열
- d : 핀-캐비티 거리
- F : 분율 함수
- g : 중력 가속도
- H : 높이 또는 깊이
- h : 격자 간격
- h_{lv} : 증발 잠열
- k : 열전도율
- m : 상변화에 의한 질량 유속
- n : 법선 방향 단위 벡터

- p : 압력
- q : 열유속
- S : 부호 함수
- Sp : 핀-핀 간격
- t : 시간
- T : 온도
- u : 속도 벡터
- U : 상경계면의 속도 벡터
- v_{lv} : $\rho_v^{-1} - \rho_l^{-1}$
- w : 폭

그리스문자

- α : 계단 함수
- β_T : 열팽창 계수
- θ : 접촉각
- κ : 상경계면의 곡률

§ 이 논문은 2011 년도 대한기계학회 유체공학부문 춘계 학술대회(2011. 4. 15.-16., 포항공대) 발표논문임

† Corresponding Author, gihun@sogang.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

μ	: 동점성
ρ	: 밀도
σ	: 표면장력계수
τ	: 반복 계산 단계
ϕ	: 액체-기체 상경계면으로부터 거리함수
ψ	: 유체-고체 상경계면으로부터 거리함수

하첨자

c	: 캐비티
f	: 액체 또는 기체
int	: 상경계면
l, v	: 액체, 기체
ls, rs	: 좌측, 우측
s	: 고체
sat	: 포화상태
w	: 벽면

1. 서론

핀(fin)을 이용하여 유체-고체 접촉면적을 확장하는 방법은 대류 열전달을 증대하는 가장 일반적인 방법 중의 하나이다. 최근에는 단상의 경우뿐만 아니라, 기포생성을 동반하는 기체-액체의 상변화 과정인 비등에서의 열전달을 향상하는 방법으로 마이크로 크기의 핀을 사용하는 연구가 활발하게 수행되고 있다. 마이크로 핀을 이용한 비등 열전달 향상 방법은 고발열기기의 냉각을 위한 방안으로 주목을 받고 있다.^(1,2)

Klein 과 Westwater⁽³⁾는 R-113 과 물의 비등에 대한 실험적인 연구에서 수평 또는 수직으로 배열된 다수의 원형 핀과 직사각 단면의 핀을 사용하였다. 직경이 6.35mm 인 수평 핀의 경우, 핀의 간격이 기포의 이탈 직경에 해당하는 1.6mm 이하에서는 기포성장이 핀에 의해 간섭을 받으며, 이로 인해 열전달이 감소하는 경향이 있음을 관찰하였다. 폭이 6.35mm 인 수직 사각 핀의 경우에는 핀의 간격이 0.8mm 이하에서 열전달이 감소하며, 이는 좁은 공간에서의 증기발생으로 인해 액체와 핀의 접촉이 원활하지 않기 때문에 일어나는 것으로 설명하였다. Guglielmini 등⁽⁴⁾은 HT-55 의 비등 실험에서 길이 3mm, 폭 0.4-0.8mm 인 정사각 단면의 핀을 사용하였다. 열유속에 대한 실험데이터로부터 핀의 방향이 수직인 경우가 수평인 경우보다 열전달 성능이 더 우수함을 발견하였다. Yu 와 Lu⁽⁵⁾는 FC-72 의 비등 실험에서 길이 0.5-4mm, 폭 1mm 인 정사각 단면의 핀이 0.5-2mm 의 간격으로 배열된 수평면을 사용하여, 열유속뿐만 아니라 기포거동

의 가시화 데이터를 보고하였다. 열유속이 낮은 경우 발생하는 기포의 수가 적고 기포의 이탈직경이 0.2-0.3mm 로 핀의 간격보다 작아 기포거동은 핀 간격에 별로 영향을 받지 않음을 볼 수 있다. 하지만 열유속이 증가하여 기포 발생이 많아지고 기포간의 합체로 인해 기포의 이탈직경이 증가하면 기포거동은 핀 간격에 큰 영향을 받게 된다. 열유속이 높고 핀 간격이 좁은 경우 합체된 기포에 의해 액체의 유입이 어려워지면 핀 사이에 드라이아웃(dry-out)이 일어나고 열전달계수가 감소하는 현상을 관찰하였다.

마이크로 핀을 포함하는 핵비등현상에 대한 다수의 실험적 연구에도 불구하고 마이크로 구조에서의 기포 형성, 성장, 이탈 등의 거동은 그 복잡성과 측정의 한계로 인해 제대로 이해하지 못하고 있는 실정이다. 최근에는 핵비등에서의 기포거동과 열전달 현상을 수치기법을 이용하여 직접 해석하려는 시도가 활발히 진행되고 있다. Lee 와 Nydahl⁽⁶⁾은 이동격자 방법을 이용하여 핵비등에서 반구형으로 가정된 기포에 대한 계산을 수행하였고, Welch⁽⁷⁾는 이동하는 비정규격자를 사용하여 보다 일반적인 기포거동을 해석하였다. Son 등⁽⁸⁾은 레벨셋(Level-Set) 방법을 이용하여 접촉각과 상변화, 마이크로 액체층에서 증발량에 대한 효과를 포함한 비등현상에 대한 해석을 수행하였다. 최근에는 Lee 등⁽⁹⁾이 LS 방법을 확장하여 마이크로 캐비티를 포함하는 고체면에서의 기포 형성 및 성장에 대한 계산을 수행하였다.

본 연구에서는 LS 방법을 더욱 확장하여 마이크로 핀과 캐비티를 포함하는 면에서의 핵비등에 대한 수치해석을 수행하였다. LS 방법은 유체와 고체의 경계면에서 점착(no-slip) 조건과 접촉각 조건 및 잠긴 고체면 (immersed solid) 위의 마이크로 액체층에서 증발량을 포함하도록 수정하였다. 핀과 캐비티를 포함한 표면에서의 기포 생성, 성장, 이탈에 대한 수치해석을 통하여 핀-캐비티 간격, 핀-핀 간격이 핵비등에서의 기포거동에 미치는 영향에 대해 규명하였다.

2. 수치해석 방법

본 연구에서는 마이크로 캐비티 위에서 기포의 성장에 대한 계산을 위해서 제시된 Lee 등⁽⁹⁾의 수치해석 기법을 마이크로 핀을 갖는 표면으로 확장하여 사용하였다. 수치해석에 사용한 계산 영역은 Fig. 1 과 같다. 액체-기체의 상경계면을 추적하

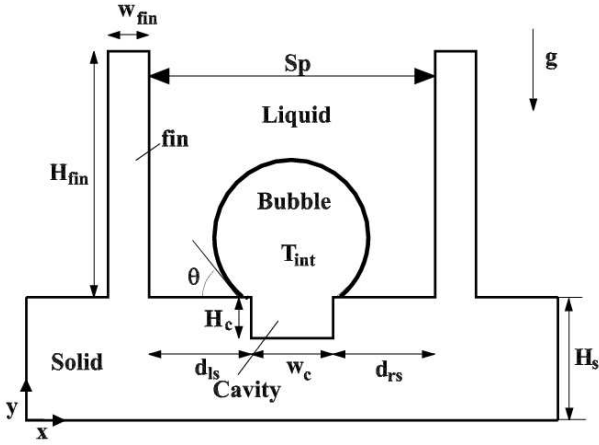


Fig. 1 Configuration for bubble growth on a micro-finned surface

기 위해 액상에서는 양의 값, 기상에서는 음의 값을 갖는 거리함수인 LS 함수(ϕ)를 사용하였다. 액상과 기상 영역 모두에서 적용되는 질량 및 운동량, 에너지 지배방정식은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = v_{lv} \dot{m} \mathbf{n} \cdot \nabla \alpha_\phi \quad (1)$$

$$\hat{\rho} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -[\nabla p + (\sigma \kappa - v_{lv} \dot{m}^2) \nabla \alpha_\phi] + \nabla \cdot \hat{\mu} \nabla \mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (2)$$

$$(\rho c_p)_l \frac{\partial T}{\partial t} = -(\rho c_p)_l \mathbf{u}_l \cdot \nabla T + \nabla \cdot \hat{k} \nabla T \quad \text{if } \phi > 0 \quad (3)$$

$$T = T_{\text{int}} = T_{\text{sat}} + \frac{T_{\text{sat}} v_{lv} \sigma \kappa}{h_{lv}} \quad \text{if } \phi \leq 0 \quad (4)$$

여기서,

$$\alpha_\phi = \begin{cases} 1 & \text{if } \phi > 0 \\ 0 & \text{if } \phi \leq 0 \end{cases}$$

$$\dot{m} = -\frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}}{h_{lv}} = \frac{\mathbf{n} \cdot k_l \nabla T_l}{h_{lv}}$$

$$\mathbf{f} = -\hat{\rho} \mathbf{u}_f \cdot \nabla \mathbf{u}_f + \hat{\rho} [1 - \beta_T (T_f - T_{\text{sat}})] \mathbf{g} + \nabla \cdot \hat{\mu} (\nabla \mathbf{u})^T - \nabla \cdot \hat{\mu} [v_{lv} \dot{m} \mathbf{n} \nabla \alpha_\phi + (v_{lv} \dot{m} \nabla \alpha_\phi)^T]$$

$$\mathbf{u}_l = \mathbf{u} + v_{lv} \dot{m} \mathbf{n} (1 - \alpha_\phi)$$

$$\mathbf{u}_v = \mathbf{u} - v_{lv} \dot{m} \alpha_\phi$$

$$\hat{\rho} = \rho_v (1 - F_\phi) + \rho_l F_\phi$$

$$\hat{\mu}^{-1} = \mu_v^{-1} (1 - F_\phi) + \mu_l^{-1} F_\phi$$

$$\hat{k}^{-1} = k_l^{-1} F_\phi$$

α_ϕ 는 액상과 기상을 구분하는 불연속적인 계단 함수이며 \dot{m} 는 상변화에 의한 질량유속이다. \mathbf{u}_f (\mathbf{u}_l 또는 \mathbf{u}_v)는 각 상에서 유체의 속도이며, 상경계면에서 속도 조건을 이용하여 전체 도메인으로 외삽하여 구하였다. 2 상에서의 유효 물성치 ($\hat{\rho}$ 및 $\hat{\mu}$, \hat{k})는 Lee 등⁽⁹⁾에서 사용된 분율함수 F_ϕ 로부터 구할 수 있다. 기포와 벽면의 접촉점 근처에서는 형성되는 마이크로 액체층으로부터의 열유속은 Lee 등⁽⁹⁾에서 제안된 대로 계산하였다.

LS 방법에서 상경계면은 $\phi=0$ 으로 표현되며 아래와 같이 이루어진다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla \phi = 0 \quad (5)$$

여기서 상경계면의 속도 \mathbf{U} 는 아래와 같다.

$$\mathbf{U} = \mathbf{u}_f + \frac{\dot{m} \mathbf{n}}{\rho_f} \quad (6)$$

상경계면을 제외한 LS 함수를 상경계면으로부터 거리함수가 되도록 재구성하기 위해 다음의 방정식을 추가로 계산하였다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} = S(\phi)(1 - |\nabla \phi|) \quad (7)$$

여기서,

$$S(\phi) = \begin{cases} 0 & \text{if } |\phi| > 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$= \frac{\phi}{\sqrt{\phi^2 + h^2}} \quad \text{otherwise} \quad (9)$$

격자점과 일치하지 않는 고체면을 고려하기 위해 유체에서는 양의 값, 고체에서는 음의 값을 갖는 또 다른 LS 함수 ψ 를 도입하였다. 유체영역에서 정의된 지배방정식들은 아래와 같이 고체면을 포함하는 영역으로 확장된다⁽⁹⁾.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \alpha_\psi v_{lv} \dot{m} \mathbf{n} \cdot \nabla \alpha_\phi \quad (10)$$

$$\hat{\rho} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\alpha_\psi \nabla p + \nabla \cdot \mu_e \nabla \mathbf{u} + \alpha_\psi \mathbf{f} \quad (11)$$

$$(\rho c_p)_e \frac{\partial T}{\partial t} = -\alpha_\psi (\rho c_p)_l \mathbf{u}_l \cdot \nabla T + \nabla \cdot \hat{k}_e \nabla T \quad \text{if } \phi > 0 \text{ or } \psi \leq 0 \quad (12)$$

$$T = T_{int} \quad \text{if } \phi \leq 0 \text{ or } \psi > 0 \quad (13)$$

액체-기체-고체의 접촉점에서 접촉각 조건을 고려하기 위해서 LS 이류방정식을 다음과 같이 수정하였다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\mathbf{U} \cdot \nabla \phi \quad \text{if } \psi > 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} = \cos \theta - \mathbf{n}_s \cdot \nabla \phi \quad \text{if } \psi \leq 0 \quad (15)$$

여기서, \mathbf{n}_s 는 고체영역으로 향하는 단위 벡터이며, $-\nabla \psi / |\nabla \psi|$ 로 얻을 수 있다.

3. 결과 및 토의

본 연구에서는 1 기압 포화상태인 물의 물성치를 사용하여 계산하였다. 결과에서 길이 및 시간은 각각 1mm 와 1ms 로, 그리고 속도는 1m/s 로 무차원하여 표현하였다. 계산은 2 차원으로 수행하였으며 계산영역은 $0 \leq x \leq 5.12$ 및 $0 \leq y \leq 5.12$, 격자 간격 h 는 0.01로 정하였다. Fig. 1에 나타난 것과 같이 고체영역은 $y \leq H_s = 0.1$ 인 부분이며 길이 $H_{fin} = 0.5$, 폭 $w_{fin} = 0.1$ 인 핀과 깊이 $H_c = 0.05$, 폭 $w_c = 0.1$ 인 캐비티를 포함하고 있다. 초기 핵이 형성되는 캐비티의 형상 및 크기에 대한 영향은 선행 연구^(9,10)에서 고찰하였으며, 캐비티가 기포의 형성 및 성장에 민감하지 않도록 캐비티의 형상 및 크기를 지정하였다. 접촉각(θ)은 38° 이며, 계산영역의 바닥면은 $T = T_w$ 로 일정한 온도조건으로, $T_w - T_{sat} = 5^\circ\text{C}$ 로 지정하였다. 고체영역은 구리의 물성치를 사용하여 열전도를 계산하였다. 본 연구에서는 캐비티에서의 기포형성에서 기포의 이탈을 포함하는 전 과정에 대한 계산을 수행하였다. 계산영역에 비례하는 기포의 이탈직경을 줄이기 위해서 중력을 20 배로 증가시켰고 초기에 기포는 캐비티 내부에 위치하고 유체는 정지된 것으로 가정하였다.

3.1 핀을 포함하지 않는 평면

Fig. 2는 핀이 없는 평판의 캐비티에서 기포가 성장하는 모습을 보여준다. 각 시간에서 그림은 x 방향으로 1.5에서 3.5, y 방향으로 0에서 1까지의 영역을 나타낸다. 초기에 캐비티 내에 있던 기포는 원형을 이루면서 성장한다. 부력이 커짐에 따라서 기포가 상승하면 캐비티 위에서 양쪽 상경계

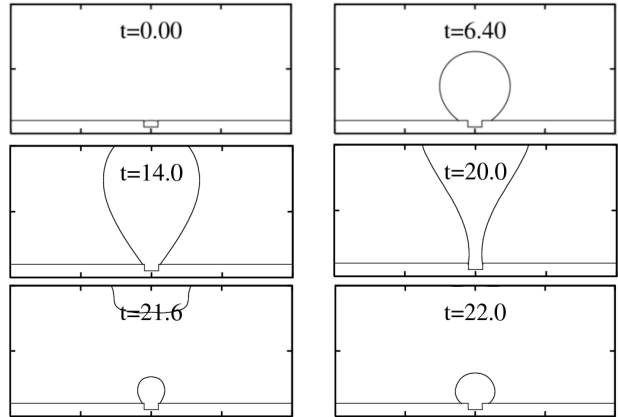


Fig. 2 Bubble growth on a plain surface

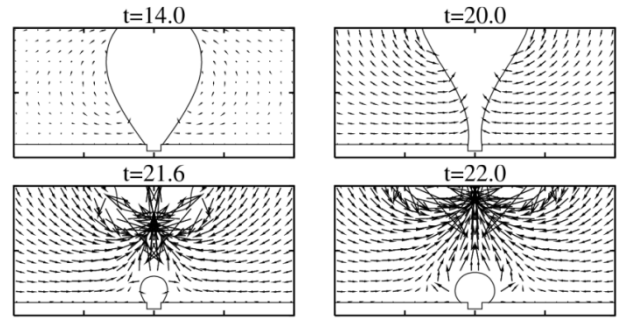


Fig. 3 Bubble growth and the associated flow field on a plain surface

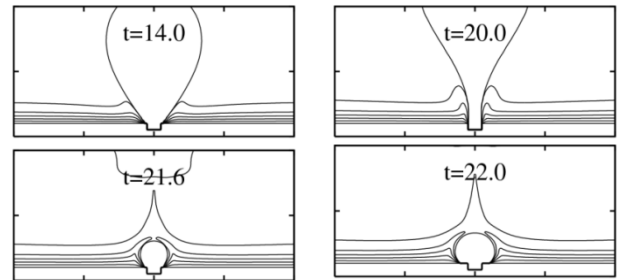


Fig. 4 The associated temperature field on a plain surface

면이 가까워져 기포 목을 형성하게 된다. 이는 기포 내의 증기가 위쪽으로 상승함에 따라 질량 보존을 만족하도록 상경계면의 간격이 좁아지기 때문이다. 가늘어진 기포의 목 부분에서 양쪽 상경계면이 만나면 분리가 일어나 상부의 기포는 이탈하며 하부는 캐비티 내에 남게 된다. 남겨진 기포는 다시 성장하여 기포 형성에서 이탈이 반복되는 과정이 나타난다.

캐비티에서 기포의 성장부터 이탈 과정에 동반된 유동장 및 온도장은 Figs. 3과 4와 같다. 상승하던 기포가 이탈된 후($t=21.6$) 이탈로 인해 생긴 공간으로 액체가 유입되며, 그 후($t=22.0$) 캐비티에서 기포가 성장하면서 강한 상승 유동이 형성되는

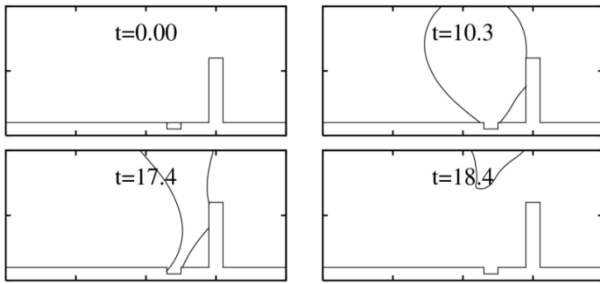


Fig. 5 Bubble growth on a single micro-finned surface with $d_{rs}=0.3$

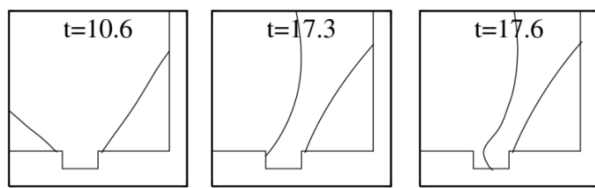


Fig. 6 Bubble growth near a cavity on a single micro-finned surface with $d_{rs}=0.3$

것을 볼 수 있다. 온도장의 경우 고체 부분에서 열전도도가 매우 크기 때문에 온도가 벽의 온도 T_w 와 거의 동일하게 나타난다. 고체와 기포 사이의 액체층 부분에는 조밀한 등온선이 나타나며 이는 액체층 부분에서 열유속이 큰 것을 의미한다.

3.2 단일 마이크로 핀을 포함하는 면

Fig. 5 는 캐비티와 마이크로 핀의 거리 d_{rs} 이 0.3 인 면에서의 기포성장상을 나타낸다. 기포가 성장할 때 반경이 캐비티-핀 간격보다 더 커지므로 기포는 핀에 접촉한다. 기포가 계속 팽창하여 상승하게 되면 하부의 폭이 줄어들면서 핀 쪽으로 휘어진다 ($t=17.4$). 부력이 더욱 증가하면 기포는 분리되지 않은 상태로 상승하여 캐비티에서 모두 빠져나간다 ($t=18.4$). 캐비티 주위에서 이탈하는 기포의 모습을 확대하면 Fig. 6 과 같다. 이때 그림이 나타나는 영역은 x 가 2.5 에서 3, y 가 0 에서 0.5 사이이다. 평판인 경우 기포가 상승할 때 두 상경계면이 캐비티 주위에서 만나지만 우측 상경계면이 핀에 접촉하여 고정되어 있기 때문에 좌측 상경계면이 시계방향으로 회전하게 된다. 회전하던 좌측 상경계면은 캐비티 내벽과 접촉각 조건을 만족시킨 후 캐비티 내부로 이동하여 액체가 캐비티 내부에 유입된다. 이처럼 캐비티에서 0.3 만큼 떨어진 곳에 위치한 단일 마이크로 핀은 캐비티에서 생성된 기포를 이탈시켜 캐비티를 비활성화하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7 은 캐비티가 핀의 하단부와 접촉하여 위치할 때 ($d_{rs}=0$) 기포성장을 보여준다. 초기에 기포

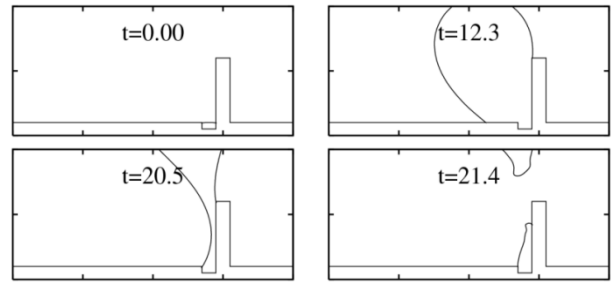


Fig. 7 Bubble growth on a single micro-finned surface with $d_{rs}=0$

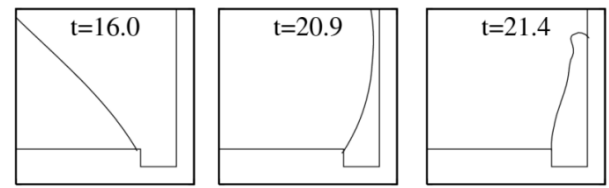


Fig. 8 Bubble growth near a cavity on a single micro-finned surface with $d_{rs}=0$

의 좌측 상경계면은 바닥면을 따라, 우측 상경계면은 핀을 따라서 팽창한다($t=12.3$). 기포가 상승하면서 바닥면과의 접촉이 줄어들고 폭이 좁아져 핀 근처에서 기포의 목이 형성된다. 부력이 더욱 증가하면 목 부분이 분리되어 상부 기포는 액체 속으로 상승하고 하부는 캐비티 내부에 남아 기포 성장 과정이 되풀이된다. 캐비티 근처에서 기포성장을 확대하면 Fig. 8 과 같다. 기포가 상승하면서 좌측의 기체-액체 상경계면은 캐비티의 모서리를 축으로 회전한다. 좌측 상경계면은 캐비티 내벽과 접촉각 조건을 만족하기 전에 핀을 만나서 기포가 분리된다. 이 결과는 마이크로 핀의 존재가 기포 성장 및 연속적인 생성에 영향을 주며, 이때 핀과 캐비티의 거리가 중요한 변수임을 의미한다.

3.3 두 개의 핀을 포함하는 면

핀과 핀 사이의 거리 S_p 가 0.5 인 두 개의 핀이 존재할 때 내부 캐비티의 위치를 변화시켜 계산을 수행하였다.

Fig. 9 에는 캐비티가 두 핀에서 동일한 거리에 있을 때 ($d_{rs}=d_{ls}=0.2$) 기포의 성장을 나타낸다. 기포가 팽창하면서 양쪽 모서리에 액체를 남긴 상태로 핀에 접촉한 후 핀 상단으로 성장한다. 핀의 끝에서 기포는 다시 원형을 이루면서 팽창하고 부력에 의해 이탈한다($t=16.2$). 핀 내부에 남아 있던 기포는 복원력에 의해 움츠러 들며 이때 외부의 액체가 핀의 간격으로 유입된다($t=16.4$). 남은 기포는 다시 성장과 이탈을 반복하고 액체 또한 내부와 외부의 순환이 일어난다.

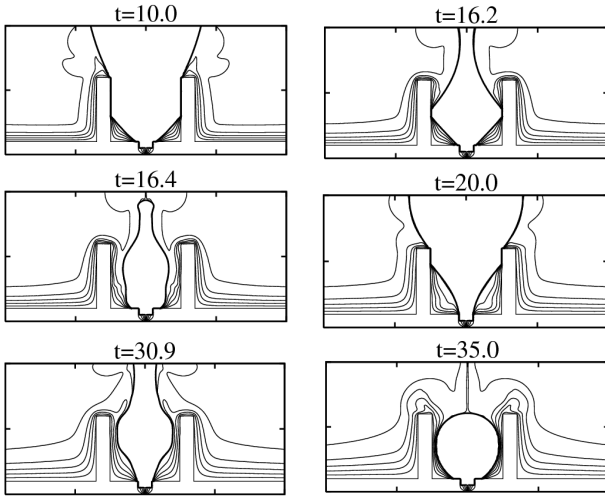


Fig. 9 Bubble growth and the associated temperature field on a micro-finned surface with $d_{rs}=d_{ls}=0.2$ and $Sp=0.5$

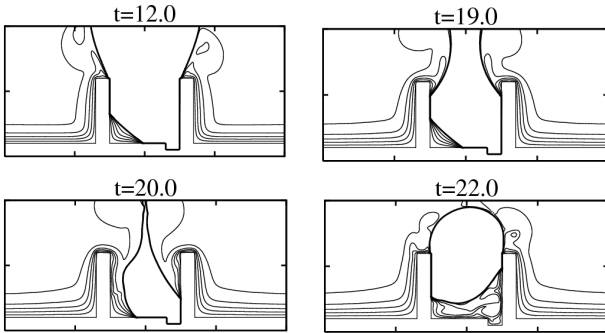


Fig.10 Bubble growth and the associated temperature field on a micro-finned surface with $d_{rs}=0$, $d_{ls}=0.4$ and $Sp=0.5$

캐비티가 한 쪽 핀에 붙어 있는 경우($d_{rs}=0$, $d_{ls}=0.4$)에 기포거동은 Fig. 10 과 같다. 캐비티에서 성장한 기포가 바닥면과 오른쪽 핀을 따라 성장하기 때문에 좌측 모서리에만 액체가 남는다. 기포 성장이 계속 진행되어 핀 상단에서 기포이탈이 일어나면 복원력에 의해 핀과 접촉면이 적은 좌측핀에서 기포가 떨어진다($t=20.0$). 좌측에서 대칭되는 장력이 사라지므로 우측에서 핀을 따라 유입되던 액체는 내려오던 관성으로 쉽게 바닥 캐비티까지 흘러 들어간다. 이와 같은 비대칭적인 행동으로 기포가 캐비티에서 모두 이탈되어 캐비티는 더 이상 기포를 발생하지 않게 된다.

핀 간격 S 가 0.3 으로 좁아질 때 기포의 거동은 Fig. 11 과 같다. 기포는 핀과 핀의 사이를 채우며 성장한 후 핀의 상단에서 이탈하는데, 간격이 0.5 일 때와 달리 액체가 핀 내부로 유입되지 않음을 볼 수 있다. 이는 액체가 핀 내부로 들어오기 전

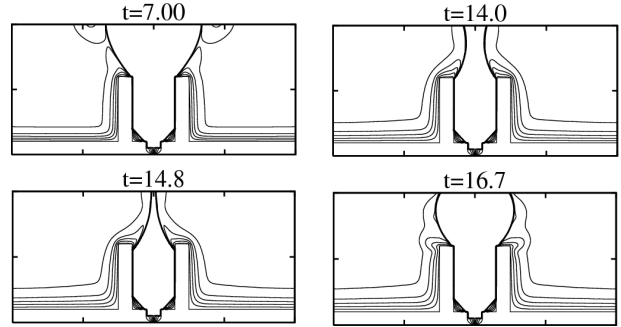


Fig. 11 Bubble growth and the associated temperature field on a micro-finned surface with $d_{rs}=d_{ls}=0.1$ and $Sp=0.3$

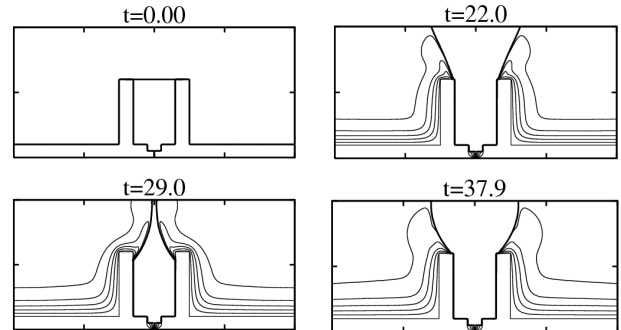


Fig. 12 Bubble growth and the associated temperature field on a micro-finned surface with $d_{rs}=d_{ls}=0.1$ and $Sp=0.3$ when the fin gap is initially occupied by vapor

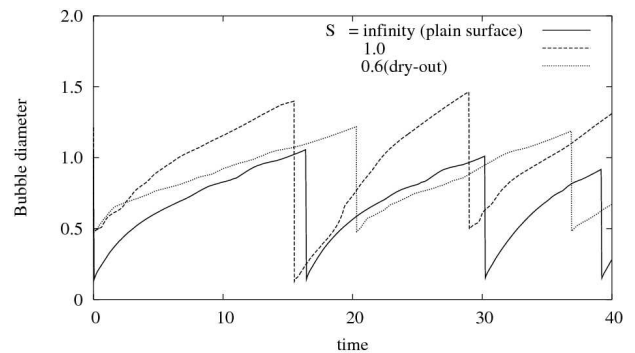


Fig. 13 Effect of fin spacing on the temporal variation of bubble diameter on a micro-finned surface

에 기포가 성장하여 액체의 유입을 막기 때문이다. 핀의 내부에 고립되어 있는 액체는 시간이 지나면 모두 증발하여 핀과 핀 사이에 열전도율이 낮은 기포만 존재하는 드라이아웃 상태에 도달하게 된다. 계산 시간을 줄이기 위해 초기에 핀 간 간격을 모두 기포로 채운 상태로 계산을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 12 와 같다. 핀 내부는 액체가 유입되지 못하고 기체로만 가득하여 채워진 드라이아웃 상태가 유지되는 것을 볼 수 있다. 이와 같은

현상은 핀의 간격이 기포의 이탈 반경에 비하여 매우 좁은 경우 드라이아웃을 보고한 실험 연구 결과와 일치한다.⁽⁴⁾

Fig. 13 은 서로 다른 핀-핀 간격(Sp)에서 시간에 따라 캐비티와 접촉하고 있는 기포 직경의 변화를 나타낸다. 결과는 첫 번째 기포의 이탈이 일어난 직후부터 표시하였다. Sp=0.5 인 핀에서 비등이 발생하는 경우 평면(Sp=infinity)에 비해 기포의 이탈 주기가 짧고 이탈 직경이 커지는 것을 알 수 있다. 반면에 간격이 0.3 으로 작고, 내부에 드라이아웃이 생기는 경우는 기포의 이탈 시간이 다른 경우에 비하여 길다. 구한 직경을 이용하여 3 차원이라 생각하고 각 경우에서 부피를 계산하면 기포에 전달되는 열량에 비례하는 기포의 성장률($\Delta V/\Delta t$)을 얻을 수 있다. 이를 비교하면, Sp=0.5 인 경우 기포의 성장률은 핀이 없는 평판에 비해 약 145% 증가하지만, 드라이아웃이 일어난 Sp=0.3 인 경우 기포의 성장률은 평판에 비해 단지 11%만 증가하였다. 이는 핀의 간격이 기포의 이탈직경에 비해 매우 작아서 드라이아웃이 일어나게 되면 핀은 비등 향상에 도움이 되지 않음을 의미한다.

4. 결론

본 연구에서는 수정된 sharp-interface 레벨셋(level-set) 방법을 이용하여 마이크로 핀과 캐비티를 포함하는 면에서 기포의 생성, 성장, 이탈에 대한 수치해석을 수행하였다.

수치해석을 통해 핀이 캐비티의 비활성화에 영향을 주는 것을 발견하였다. 단일 핀의 경우 핀-캐비티의 거리가 기포 이탈 직경의 30%정도에서 핀과 가까운 상경계면이 고정되어 기포가 이탈되는 캐비티 비활성화 과정이 일어남을 볼 수 있었다. 다중 핀의 경우 캐비티가 한쪽 핀에 있을 때 기포의 비대칭적인 성장으로 인해 캐비티가 비활성화 되는 것을 볼 수 있었다.

기포의 성장률을 비교한 결과 핀 간격이 이탈 직경의 50%일 때 기포의 성장률은 평판인 경우보다 약 145% 증가하였으나 핀의 간격이 30%로 줄어들면 내부에서 드라이아웃(dry-out)이 발생하여 기포 성장률의 증가는 11%로 낮음을 볼 수 있었다.

후 기

이 논문은 2009 년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2009-0076171).

참고문헌

- (1) Khan, N. and Toh, K. C., 2004, "Pool Boiling Heat Transfer Enhancement by Surface Modification/Micro Structures for Electronics Cooling: a Review," *Proc. 6th Electronics Packaging Technology Conference*, Toh, K. C. eds., pp. 273~280.
- (2) Wei, J. J., Zhao, J., Yuan, M. and Xue, Y., 2009, "Boiling Heat Transfer Enhancement by Using Micro-Pin-Finned Surface for Electronics Cooling," *Microgravity Sci. Technol.*, Vol. 21(Suppl 1), pp. S159~S173.
- (3) Klien, G. J. and Westwater, J. W., 1971, "Heat Transfer from multiple spines to boiling liquids," *AIChE J.*, Vol. 17(5), pp. 1050~1056.
- (4) Guliellini, G., Misale, M. and Schenone, C., 1996, "Experiments on Pool Boiling of a Dielectric Fluid on Extended Surfaces," *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 23, pp.451~462.
- (5) Yu., C. and Lu, D., "Pool Boiling Heat Transfer on Horizontal Rectangular Fin Array in Saturated FC-72," 2007, *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 50, pp.3624~3637.
- (6) 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.
- (7) Welch, S. W. J., 1998, "Direct Simulation of Vapor Bubble Growth," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 41, pp. 1655~1666.
- (8) 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.
- (9) Lee, W. and Son, G., 2010, "Numerical Analysis of Bubble Growth and Departure from a Microcavity," *Numer. Heat Transfer B*, Vol. 58, pp. 323~342.
- (10) Lee, W. and Son, G., 2011, "Numerical Simulation of Boiling Enhancement on a Microstructured Surface," *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 168~173.