미세관에서의 기포성장에 대한 수치적 연구

서 기 철* · 손 기 헌†

Numerical Study of Bubble Growth in a Microchannel

Kichel Seo, Gihun Son

Key Words: Bubble Growth(기포성장), Nucleate Boiling(핵비등), Microchannel(미세관), Level Set Method(Level Set 방법)

Abstract

The bubble motion during nucleate boiling in a microchannel is investigated numerically. 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. The computations are made for various channel sizes, liquid flow rates, and contact angles. Based on the numerical results, the bubble growth pattern and its effect on the flow and heat transfer are discussed.

기호설명

c_p	: 비열
g	: 중력 가속도
H	: 검사체적내의 액상의 체적비 또는 미세관의 높이
h_{ev}	: 증발 열전달계수
h_{fg}	: 증발 잠열
k	: 열전도율
L	: 미세관의 길이
p	: 압력
q	: 열유속
q_{micro}	: 마이크로 액체 층에서의 열유속
R_v	: 기체상수
T	: 온도
ΔT	: 가열벽면의 과열도, $T_w - T_{sat}$
t	: 시간
$\vec{u}$	: 속도벡터, (u, v, w)
$\vec{u}_{int}$	: 상경계면의 속도벡터
W	: 미세관의 폭
β	: 열팽창계수
Δ	: 격자 간격
δ	: 마이크로 액체층의 두께
x	: 상경계면의 곡률
μ	: 점성계수
ρ	: 밀도
σ	: 표면장력계수
ϕ	: Level Set 함수
φ	: 기포면-벽면의 접촉각

하첨자

in	: 입구조건
int	: 상경계면

† 회원, 서강대학교 기계공학과
E-mail : gihun@ccs.sogang.ac.kr
TEL : (02)705-8641 FAX : (02)712-0799
* 서강대학교 기계공학과

l : 액상
sat : 포화상태
v : 기상
w : 벽면

1. 서 론

미세관에서의 비등은 고성능의 초소형 전자장치에서 심각하게 대두되고 있는 고발열 문제를 해결하는 냉각방법으로 주목받고 있으며, 잉크젯 프린터와 같이 미세유동의 펌핑방법으로 적용하는 방안도 제시되고 있다. 미세관에서의 비등에 대한 실험적인 연구가 활발하게 진행되고 있으나, 측정 및 가시화 기술의 한계로 인해 미세관에서의 유동, 기포거동 및 열전달 특성에 대한 이해가 상당히 미흡한 실정이다.

Peng and Wang[1,2]은 단면이 0.6mm x 0.7mm인 사각채널에서의 실험을 통해 미세관에서 핵비등이 시작되면 기포의 형성이 발견되지 않는 완전히 발달된 핵비등으로 바로 전환되는 가상적인 비등이 일어난다고 주장하였다. 반면에 Lee 등[3]은 고속 비디오 카메라를 이용한 가시화 실험에서 Peng and Wang이 사용한 관보다 더 미세한 관(0.014mm x 0.12mm)에서도 기포의 생성, 성장 및 이탈이 반복되는 현상을 관찰하였다. 또한, 미세관에서는 기포의 직경이 채널의 크기를 벗어날 수 없으므로 기포의 형상은 관의 크기와 모양에 따라 구속되며, 채널의 모서리와 기포사이에 얇은 액체층이 형성됨을 관찰할 수 있었다.

Qu and Mudawar[4]는 0.231mm x 0.713mm인 관에서의 실험데이터와 기포에 작용하는 힘의 균형으로부터 이탈하는 기포의 크기와 열전달량을 예측하는 모델을 제시하였다. 하지만 그들의 연구에서는 기포의 형상이 미세관에 구속되어 변형되는 단계까지 적용되는 모델을 제시할 수 없었다.

본 연구에서는 상변화를 고려한 LS(Level Set) 방법[5,6]을 사용하는 수치해석을 통해 미세채널에서의 기포거동과 이에 따른 유동 및 열전달 특성을 규명하고자 한다.

2. 수치 해석

2.1 지배방정식

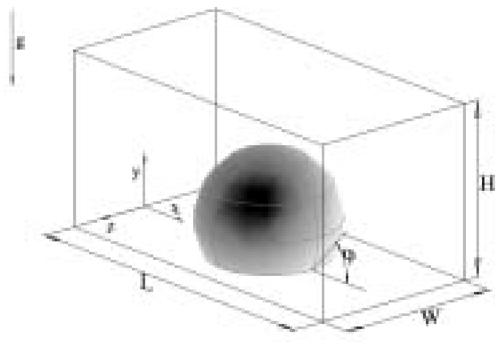

Fig. 1 Computational domain

본 연구에서는 미세채널에서의 기포거동에 동반되는 유동을 비압축성과 층류로 가정하여 해석하였다. 또한, 기체의 열전도율은 작기 때문에 기포 내부에서의 열전달을 고려하지 않았다. Fig. 1은 기포성장의 계산에 사용된 계산영역을 나타내며, 기포면은 기상에서 음의 값, 액상에서 양의 값을 가지는 상경계면으로부터 거리로 정의된 LS (Level Set) 함수(ϕ)에 의해 추적되었다.

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

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \nabla \cdot k \nabla T \quad \text{if} \quad H > 0$$
$$T = T_{sat} \qquad \text{if} \quad H = 0 \tag{1}$$

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\nabla p + \rho \vec{g} - \rho\beta(T - T_{sat})\vec{g} - \sigma\kappa\nabla H + \nabla \cdot \mu[\nabla\vec{u} + (\nabla\vec{u})^T] \tag{2}$$

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

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

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

$$\kappa = \nabla \cdot \frac{\nabla\phi}{|\nabla\phi|} \tag{5}$$

$$\rho = \rho_v + (\rho_l - \rho_v)H \tag{6}$$

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

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

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.[6]

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

여기서, δ는 접촉선에 수직방향으로의 기울기는 $\tan\varphi$로 가정할 수 있다는 조건으로부터 결정되었다.[6] $1/h_{ev}$ 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 이류된다.

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

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

$$\frac{\partial\phi}{\partial\tau} = \frac{\phi_o}{\sqrt{\phi_o^2 + \Delta^2}}\,(1 - |\nabla\phi|) \quad (13)$$

여기서, ϕ_o은 식 (12)의 해이며, τ는 식 (13)의 우변이 상경계면 주위에서 영이 될 때까지 계산하는 반복단계를 의미한다. 상경계면($\phi = 0$)은 식 (12)에 의해 결정되지만, H와 κ을 정확하게 계산하기 위해 LS 함수를 거리함수가 되도록 식 (13)을 사용하여 보정하였다.

2.2 경계조건

· 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 ($y = H$):

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

· 채널의 대칭면 ($z = 0$):

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

· 채널의 측면 ($z = W/2$):

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

입구조건에서의 유속(u_{in})는 완전히 발달된 유속의 분포를 사용하였다.

3. 계산결과 및 검토

본 연구에서는 높이(H)와 폭(W)이 같은 단면적을 가지며 길이(L)는 20mm로 일정한 사각 미세관에 대해 과열도($\Delta T = T_w - T_\infty$)가 $5^o C$인 조건에서 계산을 수행하였다. Fig. 2는 H=3mm, $\varphi = 40^o$, 평균 입구속도($\overline{u_{in}}$)가 0.16m/s인 경우의 미세관에서 성장 및 이탈하는 기포의 거동을 나타낸다. 초기에는 기포가 가열되는 밑면을 따라 미끄러지면서 성장하다가 기포의 체적과 함께 증가되는 부력이 표면장력보다 커지게 되면 기포는 밑면으로부터 이탈하게 된다. 이탈된 기포는 성장에 필요한 열을 밑면으로부터 직접 공급 받지 못하기 때문에 성장속도는 현저히 둔화되고 유동과 함께 흐르면서 상승하여 윗면에 부딪히게 된다. 계산은 기포가 관의 출구에 도달하는 시점까

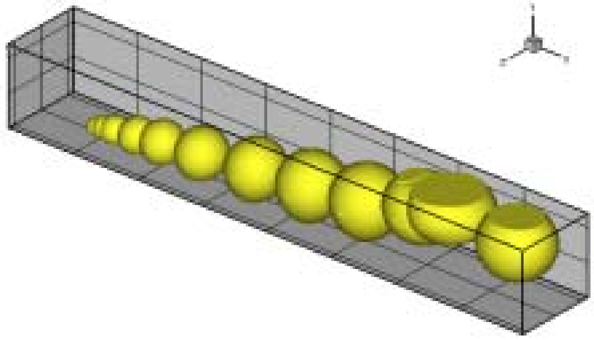

Fig. 2 Bubble growth in a channel with H=3mm, $\varphi = 40^o$ and $\overline{u_{in}} = 0.16 m/s$

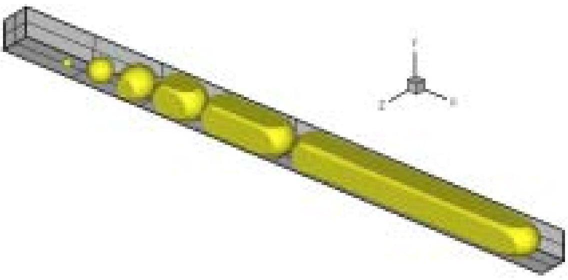

Fig. 3 Bubble growth in a channel with H=1mm, $\varphi = 40^o$ and $\overline{u_{in}} = 0.16 m/s$

성장은 밑면과 분리가 이루어지지 않은 상태에서 미세관의 윗면과 만나게 됨으로 기포의 이탈은 이루어지지 않으며, 밑면과 윗면에 닿아있는 상태로 유속방향으로 기포성장이 이루어지게 된다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 기포는 채널의 모서리부분을 완전히 채우지 않으며, 이 구간에서는 얇은 액체층이 형성된다. 이와 같은 기포의 형상은 액체-기포-벽면의 접촉각 조건에 의해 결정된다.

Figs. 4와 5는 기포의 성장에 따른 온도의 분포를 나타낸다. 기포의 밑면이 열경계층에 닿아있는 동안에는 가열벽면의 열전달량이 크며, 이로 인해 기포의 성장 또한 빠르게 진행됨을 볼 수 있다. Fig. 4의 경우처럼 기포가 밑면으로부터 이탈하여 상승함에 따라 열경계층이 두꺼워지면 가열벽면의 열전달량이 감소하며, 기포가 열경계층을 벗어나게 되면 기포로 유입되는 열량이 줄어들게 되어 기포성장이 둔화됨을 알 수 있다. 반면에 관의 크기가 작은 경우에는 기포의 분리가 이루어지지 않은 상태에서 기포는 유속방향으로 성장을 하게 된다. 기포와 채널 모서리 부분에 형성된 액체층의 면적이 증가함에 따라 열전달량과 기포의 성장속도가 지속적으로 증가하게 된다. 채널의 크기에 따라 기포의 성장이 열전달량에 미치는 영향은 Fig. 6과 같다. H=3mm의 경우, 기포의 이탈이 일어나는 60msec 부근에서 열전달이 다소 감소하는 것을 볼 수 있다. 채널의 크기가 3mm에서 1mm로 감소함에 따라 열전달량은 기포의 성장과 함께 상당히 증가함을 볼 수 있다. 이는 기포와 채널의 모서리에 형성되는 액체층의 면적이 기포의 성장과 함께 증가하기 때문이다.

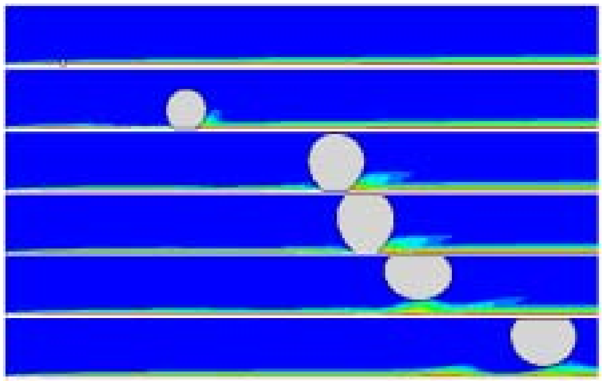

Fig. 4 Liquid temperature contours in a channel with H=3mm, $\varphi = 40^o$ and $\overline{u_{in}} = 0.16 m/s$

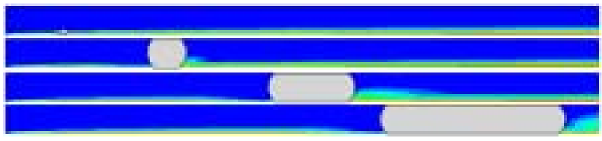

Fig. 5 Liquid temperature contours in a channel with H=1mm, $\varphi = 40^o$ and $\overline{u_{in}} = 0.16 m/s$

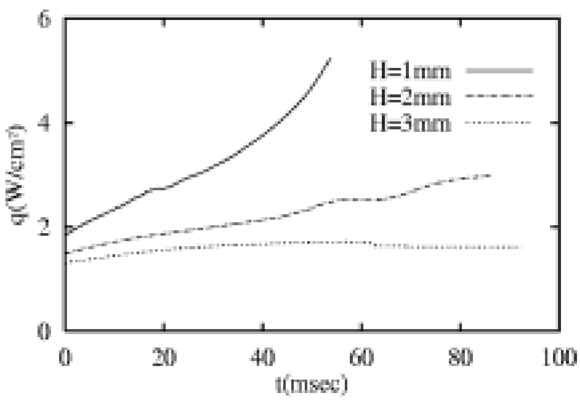

Fig. 6 Effect channel size on heat transfer for $\varphi = 40^o$ and $\overline{u_{in}} = 0.16 m/s$

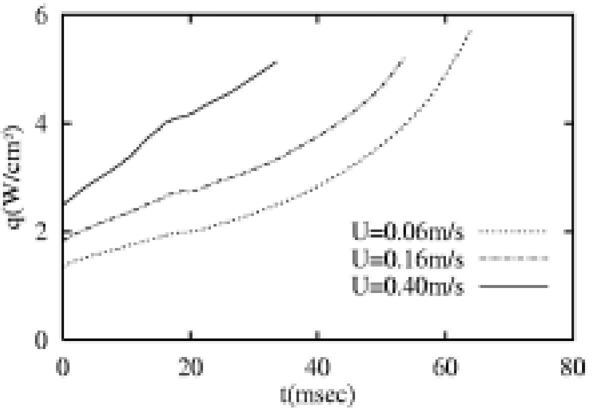

Fig. 7 Effect of inlet velocity on heat transfer for H=1mm and $\varphi = 40^o$

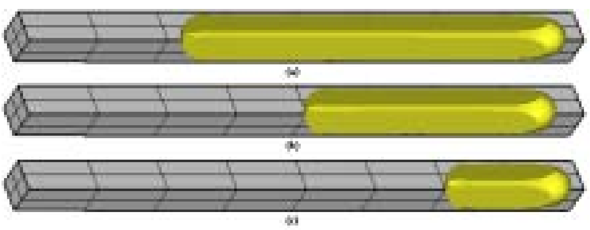

Fig. 8 Effect of inlet velocity on bubble growth for H=1mm and $\varphi = 40^o$: (a) 0.06m/s (b) 0.16m/s and (c) 0.40m/s

지 수행하였다. 미세관의 높이를 1mm까지 감소시켰을 때의 기포거동은 Fig. 3과 같다. 기포의

Fig. 7은 H=1mm인 미세관에서 입구 유속이 열전달에 미치는 영향을 보여준다. 기포성장의 초기에는 유속의 증가와 함께 열전달이 증가하지만 기포성장의 후반기에서는 유속이 작은 경우에 시간에 따른 열전달량의 가속화가 두드러진다. 이는 기포-액체-벽면의 접촉선 길이의 증가에 의한 열전달 증가의 효과가 유속에 의한 영향보다 높게 나타남을 의미한다. 기포가 채널의 출구에 도달했을 때의 형상을 비교한 Fig. 8을 보면, 유속이 느린 경우에 기포가 출구에 도달하는데 걸리는 시간이 크기 때문에 채널에서 기포가 차지하는 부분이 증가하며, 이로 인해 채널의 모서리와 기포사이에 형성된 액체층이 차지하는 면적 또한 증가하기 때문에 열전달량의 증가가 현저하게 나타내게 된다. 그러나 Fig. 7에서 보는 바와 같이 기포성장 전체 기간동안 평균한 열전달량은 유속이 큰 경우에 더 크게 된다.

Figs. 9와 10은 H=1mm인 미세관에서 접촉각이 열전달과 기포성장에 미치는 영향을 나타낸다.

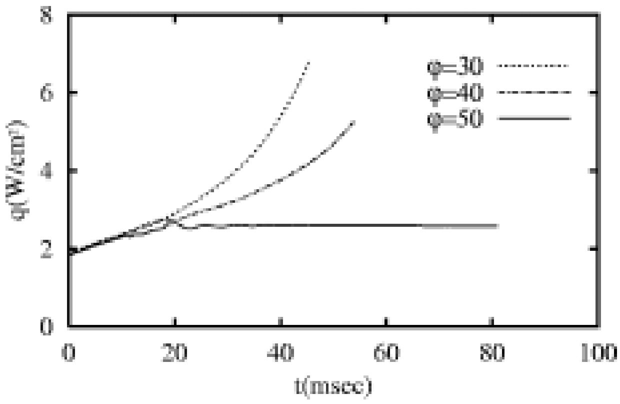

Fig. 9 Effect of contact angle on heat transfer for H=1mm and $\overline{u_{in}} = 0.16m/s$

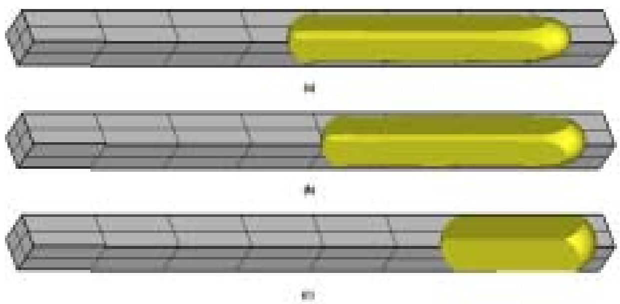

Fig. 10 Effect of contact angle on bubble shape for H=1mm and $\overline{u_{in}} = 0.16m/s$: (a) 30^0, (b) 40^0 and (c) 50^0

접촉각이 작은 경우에 열전달량 및 기포의 성장속도가 보다 큼을 발견할 수 있다. 특히, 접촉각이 50^o 이상에서는 열전달량이 초기에 약간 증가한 후에 거의 일정하게 유지된다. 이러한 현상은 Fig. 10에서 나타난 채널의 모서리 근처에서의 기포의 형상으로부터 설명할 수 있다. 접촉각이 증가함에 따라 기포의 채널의 모서리 방향으로의 성장이 보다 용이하게 되며, 50^o 이상에서는 기포의 선단과 후단을 제외한 부분이 채널의 단면을 가득 채우게 된다. 즉 채널의 단면에서 액체층이 차지하는 면적이 없어지게 된다. 기포가 성장하더라도 액체-기체 상변화가 일어나는 구간이 기포의 선단과 후단에 제한되기 때문에 열전달량 및 기포의 성장속도가 시간에 따라 가속화하는 현상이 일어나지 않게 된다. 그러므로 미세관에서의 비등을 냉각에 이용하는 경우에 접촉각이 작은 액체-고체의 선택이 바람직하며 접촉각이 50^o 이상인 액체-고체의 조합은 피해야할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 상변화를 고려한 Level Set 방법을 이용하여 미세관에서의 비등에 동반된 유동, 기포성장 및 열전달에 관한 해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 크기가 2mm 이하의 채널에서 기포는 벽면으로부터 이탈하지 않고 채널의 밑면과 윗면에 접촉한 상태에서 유속방향으로 성장하는 거동을 나타낸다.

(2) 채널의 모서리와 기포사이에 액체층이 존재하며, 이는 미세관의 열전달량 및 기포의 성장속도에 중요한 역할을 한다.

(3) 입구 유속이 증가하면 열전달량은 증가한다. 기포성장과 함께 채널의 모서리와 기포사이에 형성되는 액체층의 면적이 증가하면 열전달이 시간에 따라 급속히 증가하는 구간이 나타난다.

(4) 접촉각이 작을수록 열전달량 및 기포의 성장속도는 증가한다. 접촉각이 50^o 이상에서는 기포가 채널 단면을 가득 채우는 영역이 나타나며 열전달량은 시간에 대해 거의 일정하게 된다.

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. and Wang, B. X., 1998, "Forced Convection and Boiling Characteristics in Microchannels," *Proc. 11th Int. Heat Transfer Conf.*, Vol. 1, pp. 371-390.

(3) 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.

(4) Qu, W. and Mudawar, I., 2002 "Prediction and Measurement of Inicipient Boiling Heat Flux in Micro-Channel Heat Sinks," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 3933-3945.

(5) 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.

(6) Son, G. 2001, "Numerical Simulation of Bubble Motion During Nucleate Boiling" *KSME Int. J.* Vol. 25, No.3, pp. 389-396.