

마이크로채널에서 과냉 핵비등 시발점의 비정상 수치해석

이 희 준¹

TRANSIENT SIMULATION OF SUBCOOLED ONSET OF NUCLEATE BOILING IN A MICRO-CHANNEL

H.J. Lee¹

A numerical study of subcooled onset of nucleate boiling (ONB) in a micro-channel under pulsed heating using volume of fluids (VOF) model was conducted. The VOF simulation adopting the existing experimental condition is compared to the experimental data. The time to ONB was determined when the void fraction at the microheater surface first appeared. The theoretical superheat for homogeneous nucleation relatively predicts the transient ONB results of convective flow of water well based on local temperature distribution. It was found that once heat load increases at the heater, transient flow boiling starts to occur faster.

Key Words : 비정상(Transient), 핵비등(Nucleate Boiling), 마이크로채널(Micro-channel), 유체체적방법(Volume Of Fluids, VOF), 경험상관식(Correlation)

1. 서 론

컴퓨터 CPU에 이용되는 직접회로의 성능이 증대되고 크기가 작아짐에 따라 CPU에서 큰 열유속이 발생하게 된다. 이러한 큰 열유속에서 열을 제거하기 위해 공기팬방식의 냉각에 한계가 있으며, 직접회로를 실리콘이나 Pyrex 기판에 나노소재가공(Nano fabrication)으로 제작할 때 마이크로채널을 기판에 형상화해서 대류열전달을 이용해 열을 제거하는 연구가 최근 활발히 수행되어지고 있다. 또한, 비등(Boiling)을 이용하면 현열(Sensible heat)보다는 잠열(Latent heat)로 인하여 작은 유량으로도 큰 비등 대류(convective) 열전달 효과를 얻을 수 있다. 하지만, 마이크로채널에서 비등열전달을 이용할 때 컴퓨터 작동 시 고주파 전력의 펄스 및 주기적인 신호, 즉 클럭으로 인하여 컴퓨터 직접회로는 비정상 작동모드를 가진다. 이러한 비정상 작동모드에서 마이크로채널 냉각은 기판의 열용량(thermal capacitance), 열확산 계수(thermal diffusivity), 유동흐름 조건 등에 영향을 받는다. 정상 비등 대류열전달 및 비

정상 기포(pool) 열전달에서는 많은 실험 및 이론적 연구들이 존재하지만, 마이크로채널의 마이크로히터에서 비정상 열부하가 발생할 때, 비등 대류 열전달에 관한 연구는 거의 없다.

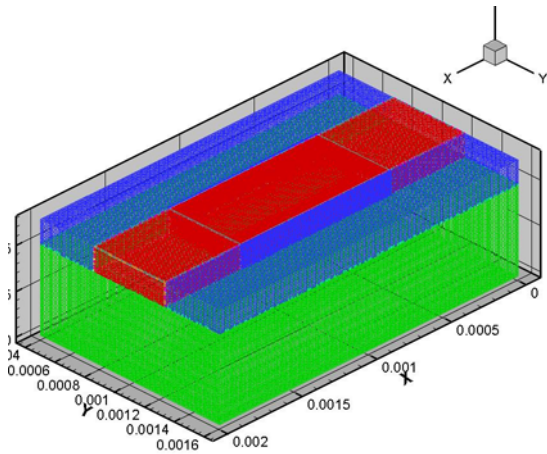
마이크로채널에서 비정상 기포 비등 열전달을 연구하기 위해 과냉 핵비등 시발점(subcooled onset of nucleate boiling)에 연구의 초점을 맞추고 있다. Chen et al. [1]은 FC-72 작동유체에 담겨진 270 $\mu\text{m} \times 270 \mu\text{m}$ 의 부드러운 표면의 마이크로 백금히터에서 과냉 핵비등 시발점을 연구하였다. 마이크로히터에서 기포생성이 폭발적이며, FC-72의 실험적 과열도가 균질핵생성(homogeneous nucleation)의 이론적 값인 80 $^{\circ}\text{C}$ 와 일치하는 것을 발견하였다. Li et al. [2]은 100 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 의 부드러운 표면의 마이크로 백금히터에서 물의 과냉 핵비등 시발점을 연구하였다. 그 결과 비정상 열부하의 펄스 주기가 짧을수록 그리고 펄스의 크기가 커질수록 물의 핵비등 시발점의 온도는 비균질핵생성(heterogeneous nucleation) 온도 231 $^{\circ}\text{C}$ 에 가까워지는 것을 발견하였다. Xu와 Zhang [3]은 메탄올에 담겨진 100 $\mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ 의 마이크로 백금히터에 펄스 열부하의 영향을 연구하였다. 그 결과 핵비등 시발점이 균질핵생성 과열도 제한치에서 이루어지는 것을 알았다. 이상 연구에서 비정상 기포 비등 열전달에서는 나노소재가공으로 인하여 히터 표면의 거칠기가 없음에 따라 핵(nucleus)의 크기가 매우

접수일: 2011년 3월 12일, 심사완료일: 2011년 5월 3일,

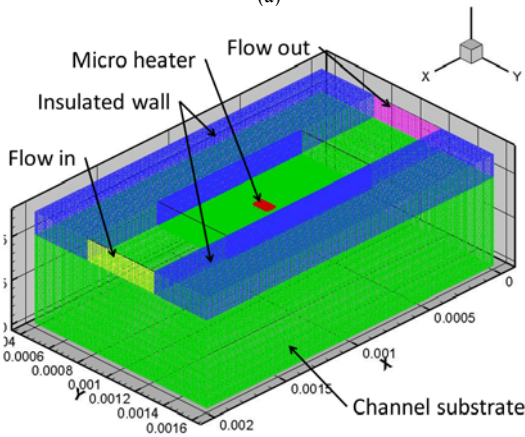
게재확정일: 2011년 5월 6일.

¹ 정회원, 국민대학교 기계시스템공학부

E-mail: joellee@kookmin.ac.kr



(a)



(b)

Fig. 1 Grid of single micro-channel heat sink geometry with a micro-heater

작으므로 탄화수소 계열의 작동유체에서는 균질핵생성이 발생하고, 물을 이용할 경우 펄스의 크기 및 주기에 따라 비균질핵생성에 가까워지는 것을 알 수 있다. 하지만 마이크로채널에서 비정상 대류 비등 열전달에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

최근 Chen and Cheng[4]은 마이크로채널에 $60 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 의 마이크로 백금히터가 있을 때 마이크로 비등의 열 및 물질전달 현상을 연구하였다. 마이크로채널에 물을 주입하고 마이크로히터의 열유속을 증가시킬 때 마이크로히터에서 핵비등 및 막비등(film boiling)이 존재하는 것을 실험적으로 규명하였다.

본 연구에서는 마이크로채널에 물의 흐름이 있고, 열싱크에 펄스 열부하가 가해질 때 핵비등 시발점을 예측하기 위한

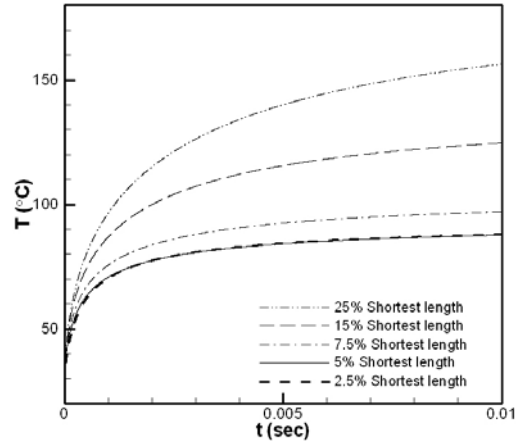


Fig. 2 Grid independence validation of the simulated transient heater temperature using Fig. 1 geometry

비정상 수치해석을 ANSYS FLUENT (ver.6.3.26)를 이용하여 수행하였다. Pyrex기판에 유동이 흐를 수 있는 한 개의 마이크로채널을 만들고 기판과 채널 사이에 얇은 백금 마이크로히터를 생성하여 복합열전달(conjugate heat transfer) 문제를 해석하였다. Becker-Doring 핵생성 이론[5]을 이용하여 계산된 핵생성 시발점의 온도를 비교하며, 실험적으로 존재하는 경험상관식을 이용하여 수치해석 결과와 비교하였다.

2. VOF 수치해석

2.1 접근방법

수치해석에 이용된 형상과 격자는 그림 1과 같다. 그림 1(a)에서 알 수 있듯이 Pyrex 기판에 마이크로채널과 벽면이 있다. 그림 1(b)에서 Pyrex 기판과 마이크로채널 사이에 250 nm의 백금 마이크로히터가 놓여있다. 마이크로히터의 두께가 너무 작아 두께에 대한 격자는 없으며, 가상 거울(mirror) 형상으로 FLUENT에서 가상 두께를 설정하였다.

마이크로채널에서는 비정상 Navier-Stokes식과 에너지식을 풀며, 기판에서는 전도 열전달식만을 이용한다 따라서, 기판의 격자는 마이크로채널의 격자보다 상대적으로 적게 만들었다. 또한, 계산 시간을 줄이기 위해 정렬격자를 이용하였다.

격자 크기를 마이크로히터의 가장 작은 길이 기준으로 2.5%에서 25%까지 증가시키면서 격자 민감도를 계산하였다. 그림 2는 물의 Reynolds수가 500이고 마이크로히터에 열부하가 0.3W로 가해질 때 시간에 따른 마이크로히터의 평균온도 분포를 나타낸다. 격자 크기가 5%이하(10^{-5} m이하)일 때 마이크로히터의 평균 온도 값은 변하지 않았다. 따라서 격자의 크기는 마이크로히터의 가장 작은 길이 기준으로 5%로 정하였

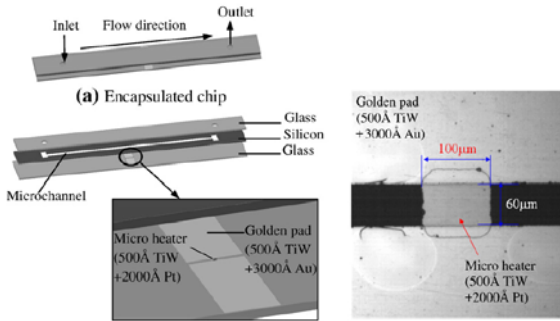


Fig. 3 The experimental setup of Chen and Cheng [4]

다. 그 결과 총 격자수는 약 1,300,000개이며, 마이크로채널의 마이크로히터 영역에서 정확도를 유지하기 위해 약 250,000개의 격자를 adaption 방법으로 추가하였다. 비정상 Navier-Stokes 식은 시간과 공간에 따라 2차 정확도로 설정하였다.

이상유체 핵비등 시발점 수치해석을 위하여 유체 체적방법 (the Volume Of Fluids, VOF)을 적용하였다. VOF방법은 Navier-Stokes식이 액체와 기체의 상을 같이 풀며, 각 격자에서 유체의 각 상의 부피비율을 추적하는 방법이다. 나노소재 가공으로 인하여 마이크로히터의 표면은 부드러우며, 본 수치 해석에서 백금 마이크로히터는 완전 부드러운 표면, 즉 거칠기가 없다. 계산에서는 물과의 접촉각(contact angle)이 90°임을 가정하였다. 히터 윗면에서 기포율(void fraction)과 온도를 추적하였으며, 핵비등 시발점은 히터 윗면에서 처음 기포율이 존재하는 시점을 결정한다. 히터 열유속, 온도 및 기포율은 0.1 µm의 시간간격으로 적분되었다. 히터에 펄스 열부하는 FLUENT의 UDF(User Defined Function)을 이용하여 변화시켰다.

2.2 검증

FLUENT VOF로 핵비등 시발점을 수치해석하기 위해 그림 3과 같이 Chen과 Cheng[4]의 실험데이터 및 조건을 이용하여 검증을 수행하였다. Chen과 Cheng은 Pyrex 기판에 197 µm의 수력학적 지름(hydraulic diameter)을 가지는 사다리꼴 형상의 마이크로채널을 나노소재가공 하였으며, 백금 마이크로히터는 60 µm × 100 µm의 직사각형 형태이며 두께는 250 nm이다. 실험에서 마이크로채널에 53.3 kg/m²s의 질량유속으로 물이 공급되었고, 마이크로히터에서는 25.1 MW/m²의 열유속이 2 ms의 펄스 주기로 적용되었다. 총 열부하는 0.15 W였으며, 상온의 온도는 20°C였다. 핵비등 시발점은 초고속 카메라를 이용하여 기포가 생성되는 시점을 육안으로 결정하였다. Chen과 Cheng은 Pyrex 기판의 열전도계수가 1.35 W/m/K으로 매우 낮아 실험에서 모든 열이 물의 대류에 의해 전달된다고 가정

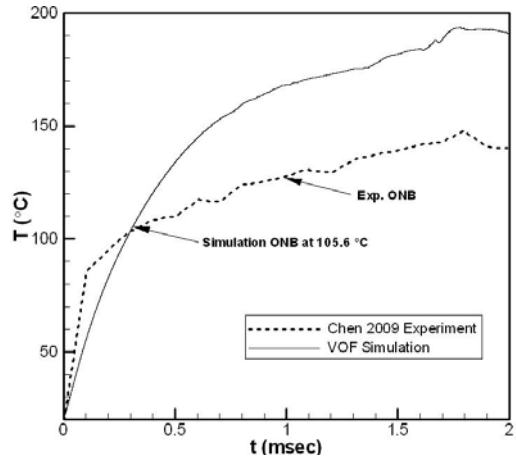


Fig. 4 Comparison of the transient simulated heater temperature and the experimental data of Chen and Cheng [4]

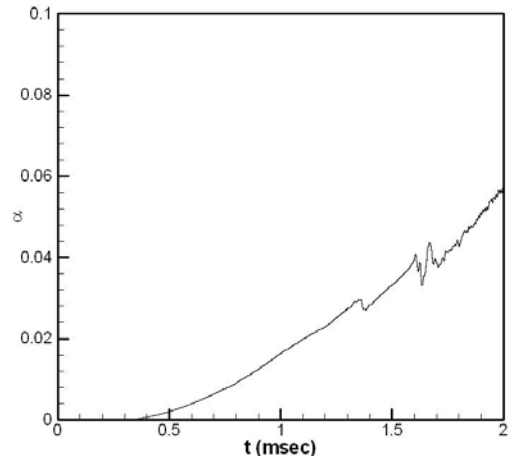


Fig. 5 The transient simulated void fraction

하였다.

그림 4는 Chen과 Cheng의 실험 결과와 FLUENT VOF 모델을 이용한 비정상 히터 온도 비교 결과를 보여준다. 실험에서는 처음 100 µs까지 온도가 급격히 상승하다 대략 1 ms에서 기포생성이 되기 전까지 온도의 상승이 둔화되는 경향을 보여준다. 그러나, 수치해석 결과 온도의 증가의 경향은 실험 데이터와 같지만 증가율이 실험 결과와 차이가 있다. 또한, 수치해석의 히터 온도 계산 결과가 실험 결과 보다 약간 높은 양상을 보여준다. 그 이유는 실험에서는 Pyrex 기판 및 히터에서 열손실이 존재하지만, 수치해석에서는 모든 계산 영역을 단열로 가정했기 때문에 발생한 오차로 분석된다. 또한 그림 3에서 알 수 있듯이 Chen과 Cheng의 실험장치는 히터에 전력을 공급하기 위해 금(Au)과 텅스텐티타늄(TiW) 층들이

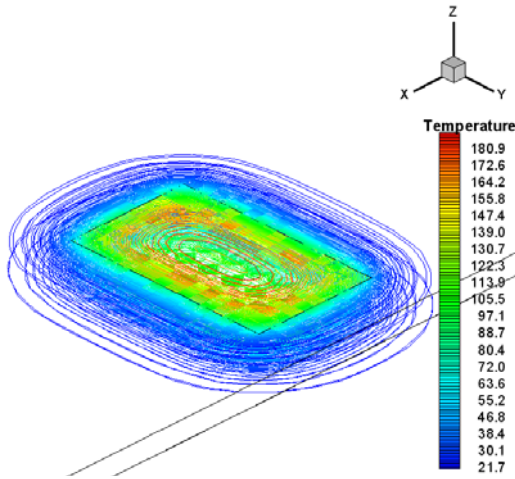


Fig. 6 The local heater temperature of the VOF simulation at 0.35 ms (ONB)

Pyrex 기판에 추가가 되어 있지만, 수치해석에서는 이 층들을 무시했기 때문에 온도 분포의 오차가 존재할 수 있다.

그림 5는 시간에 따른 기포율의 계산 결과를 보여주며, 핵비등은 0.35 ms에서 처음 수치적으로 관찰된다. 이후 기포의 크기가 점점 커지며, 기포율의 값이 증가하게 된다. 실험에서는 초고속 카메라를 이용하여 핵비등 시발점을 1 ms로 결정하였지만, 육안으로 관찰할 수 있는 기포 크기의 한계가 있으므로 수치해석의 0.35 ms의 조건에서는 아주 작은 기포가 발생했다하더라도 구별해내지 못했을 가능성이 있다.

수치해석 결과로 핵비등이 시작되었을 때 마이크로히터의 평균온도는 105.6°C이지만, 핵비등이 일어나는 국부적인 최고 온도는 그림 6과 같이 대략 190°C가 된다. 그림 4에서 수치해석에 의한 히터의 평균 온도는 190°C로 수렴하는 양상을 나타내는 데 반해, 그림 5에서 평균 기포율은 선형적으로 증가하는 추세이다. 히터의 평균 온도가 190°C로 수렴하는 것은 국부적으로 190°C 이상이 되는 부분이 점점 넓어지므로 기포가 생성될 확률이 커진다. 또한, 한 번 기포가 생성이 되었으면 히터에 의해 기포의 크기가 커지므로 평균 기포율은 선형적으로 증가한다.

그림 7은 비정상 펄스 열부하에서 1 ms 및 2 ms에서 마이크로히터의 기포율에 대하여 Chen과 Cheng의 초고속 카메라 실험 이미지와 VOF 수치해석으로 계산한 기포율과의 비교 결과를 보여준다. 마이크로히터의 국부적인 온도 분포의 차이로 핵비등이 시작되는 위치 및 온도가 차이가 날 수 있으나, 대략적인 기포의 크기와 형상은 수치해석 결과와 유사하다. Chen과 Cheng은 마이크로히터의 국부적인 온도 계산 측정값이 없기 때문에 수치해석과 국부 온도를 비교하는 것에 의한

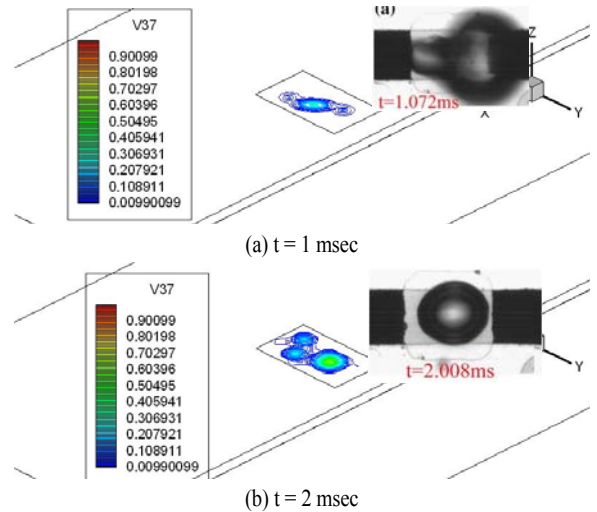


Fig. 7 The simulated void fraction on the microheater comparing to Chen and Cheng [4] visualization

기포 생성 및 크기를 정량적으로 비교하기에는 본 연구에서 한계가 있다.

하지만, 수치해석의 국부적인 히터 온도 값은 기포 생성이론과 비교가 가능하다. Chen et al.[1]은 마이크로채널에서 실험적으로 FC-72의 기포생성 과열도를 80°C로 측정하였다. 이는 이론적으로 마이크로채널에서 균질핵생성물이 10¹² m³s⁻¹에 해당하는 수치이다. 본 VOF 수치해석에 이용된 물의 이론적인 핵비등 시발점의 온도는 마이크로채널에서 Chen et al.이 측정된 J = 10¹² m³s⁻¹의 균질핵생성률을 Becker-Doring 핵생성이론[5] 식 (1)로 계산할 수 있다.

$$J = Z4\pi r^{*2} \frac{p_g}{\sqrt{2\pi M k_b T_i}} \frac{p_g}{k_b T_i} \exp\left(-\frac{4\pi \sigma r^{*2}}{3 k_b T}\right) \quad (1)$$

여기서 Z: Zeldovich 상수, r*: 핵지름, p_g: 기포 내부의 압력, M: 분자량, k_b: 볼츠만상수, T_i: 기포생성온도, σ: 표면장력이다. 그 결과 마이크로채널에서 물이 작동유체일 때 마이크로히터의 핵비등 시발점 국부 온도는 이론적으로 310.6°C이다. 그림 6은 핵비등이 일어날 때 히터 표면의 국부적인 온도 분포를 보여준다. 최고 온도는 190°C로 마이크로채널에서 실험적으로 측정된 균질핵생성율을 바탕으로 이론적으로 계산한 핵비등 히터 온도와 120°C 정도 차이가 나는 것을 알 수 있다. 일반적으로 물에 대한 균질핵비등 시발점 온도는 메타스태이블 상태로 인해 기포 생성에 대한 실험치를 과도 예측하는 것으로 알려져 있다[6]. 같은 양상이 본 연구에서도 존재함을 확인하였다. 물에 대한 이론적인 핵비등 시발점 온도에

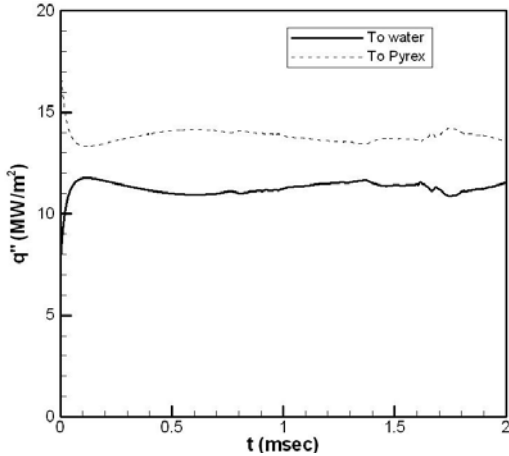


Fig. 8 The simulated heat flux on the top and bottom of the heater

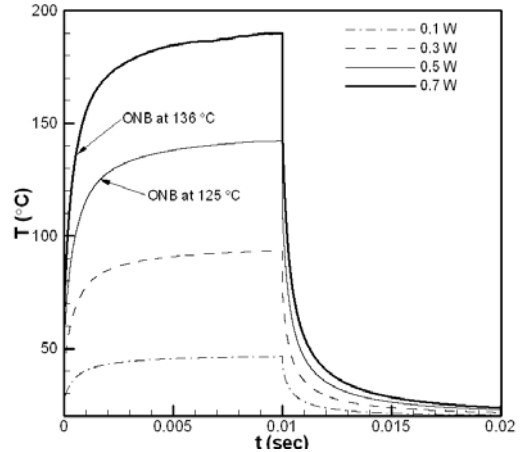


Fig. 9 The simulated transient heater temperature of the 200 μm × 200 μm heater on Pyrex substrate in a 200 μm micro-channel

대한 연구가 더 필요하다.

그림 8은 Chen과 Cheng이 마이크로히터에 적용한 0.15 W의 열부하가 Pyrex 기판과 물이 흐르는 마이크로채널로 열전달되는 열유속을 계산한 결과이다. Pyrex의 열전도계수가 매우 작다 하더라도, 마이크로히터에서 생성된 열은 대부분 기판에서 전도열전달로 냉각된다. 따라서, Chen과 Cheng[4]이 실험에서 Pyrex의 열전도계수가 매우 작으므로 모든 열이 물의 대류열전달에 의해서 냉각된다는 실험적 가정은 틀린 것이다. 핵비등이 시작될 때 물에 의한 대류열전달에 의해 냉각된 열유속은 11.5 MW/m²이며, 한편 Pyrex에 의한 전도열전달에 의해 냉각된 열유속은 13.6 MW/m²이다. Lee et al.[7]은 마이크로채널에서 물이 흐를 때 핵비등 시발점을 연구하였고, 마이크로채널 핵비등 시발점 이론 모델을 기존에 존재하는 경험상관식으로 비교하였다. 그 결과 Davis와 Anderson[6]와 Bergles와 Rohsenow[6] 핵비등 시발점 경험상관식과 일치하는 것으로 결론지었다. 그러나, 표 1에서 본 수치해석의 결과로 비등이 시작될 때 현재 존재하는 그 어떤 경험상관식도 기포

생성 열유속값을 예측하지 못하는 것으로 나타났다. 그 이유는 현재 존재하는 거의 모든 핵비등 시발점 열유속 경험상관식이 매크로채널을 기준으로 만들어졌다. 또한, 핵비등이 일어날 때 국부적인 온도를 측정할 수 있는 실험적 한계가 있다.

Ghiaasiaan과 Chedester[8]가 마이크로채널용 핵비등 시발점 열유속 경험상관식을 제시하긴 하였지만, Lee et al.[5]과 마찬가지로 기존에 존재하는 매크로채널용 핵비등 시발점 열유속 경험상관식보다 정확도가 떨어진다. 따라서, 마이크로채널에서 비정상 대류비등열전달을 연구하기 위해 핵비등 시발점 경험상관식에 대한 체계적인 실험 연구가 필요하다.

Table. 1 Comparison of the existing ONB correlations and the simulating data of Chen and Cheng [4] at 200°C local heater temperature

ONB Correlation	Incipient q'' (MW/m ²)
Current simulation	11.5
Hsu (1962) [7]	32.4
Sato and Matsumara (1963) [7]	51.8
Bergles and Rohsenow (1964) [7]	81.4
Kandlikar et al. (1997) [7]	45.1
Ghiaasiaan and Chedester (2002) [8]	1.93

3. 펄스 크기에 따른 민감도

2장에서 FLUENT VOF 모델을 Chen과 Cheng[4]의 실험데이터와 비교하여 이상유체 핵비등 시발점을 계산 및 검증을 수행하였다. 본 절에서는 펄스의 열부하 크기에 따른 민감도 계산을 수행하였다. 마이크로채널의 수력학적 지름은 200 μm이며 백금 마이크로히터는 200 μm × 200 μm의 정사각형 형태 및 두께는 250 nm이다. 물의 Reynolds수는 500 그리고 마이크로히터의 열부하를 0.1 W에서 0.2 W크기로 0.7 W까지 증가시켰다. 펄스의 작동시간은 10 ms이며 10ms 후에 마이크로히터의 열공급을 중단하였다.

그림 9는 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 W일 때 마이크로히터의 평균 온도 값을 보여준다. 열부하가 0.1 W와 0.3 W일 때는 물의 온도 및 마이크로히터의 온도가 포화온도(100°C)에 도달하지 않았으므로 단상유동이다. 그러나, 펄스 열부하가 0.5 W에 도달

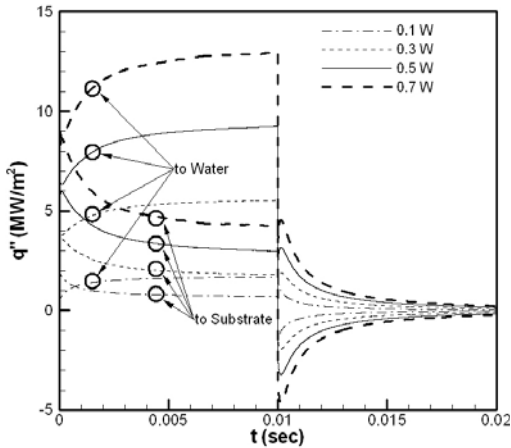


Fig. 10 The simulated transient heat flux to water and Pyrex substrate of the 200 μm × 200 μm heater in a 200 μm micro-channel

하면 물의 온도가 포화온도에 도달하여 핵비등이 일어나기 시작한다. 핵비등 시발점은 0.5 W 일 때 1.63 ms이며, 0.7 W 일 때 0.55 ms이다. 각각 상응하는 평균 마이크로히터의 온도는 각각 125°C와 136°C이다. 핵비등이 발생하는 국부온도 및 위치가 따라 핵비등 시발점의 평균 히터 온도 차이가 존재한다. 더 많은 열부하가 걸릴 때 마이크로히터의 온도는 더 빨리 상승하게 되므로, 0.7 W에서 0.5 W일 때 보다 핵비등이 더 빨리 일어나게 된다.

그림 10은 마이크로히터에서 물과 Pyrex 기판으로 냉각되는 열유속을 나타낸다. 대부분의 열이 물에 의한 대류열전달에 의해 냉각된다. 또한, 열부하가 증가함에 따라 물에 의한 대류열전달과 기판에 의한 전도열전달의 상대적인 값이 감소하게 된다. 마이크로히터에 열공급이 중단되면, 기판에 의한 열유속이 급격히 음의 값을 가진다. 즉, 열원이 없어지면서 물리적으로 기판에 저장되어 있던 에너지가 물에 의해 냉각되기 때문에 음의 값이 존재한다. 열부하가 클수록 기판에 저장된 에너지가 커지게 되어 물에 의해 냉각되는 열에너지의 음의 값이 더 커지게 된다.

4. 결 론

비정상 대류비등열전달 문제로 마이크로채널과 기판 사이에 놓여있는 마이크로히터에서 핵비등 시발점을 FLUENT VOF를 이용하여 비정상 수치해석을 성공적으로 수행하였고 Chen과 Cheng[4]의 실험데이터와 비교 검증을 수행하였다.

그 결과 VOF 수치해석을 이용한 핵비등 시발점 계산은 실험 데이터를 비교적 근사하게 예측하는 것을 알 수 있었다.

또한, 존재하는 마이크로채널에서 핵비등 시발점 경험상관식은 수치해석 결과와 큰 오차를 보여준다. 따라서, 마이크로채널에서 비정상 대류 비등 열전달을 연구하기 위해 핵비등 시발점 경험상관식에 대한 체계적인 실험 연구가 필요하다.

수치해석에서 핵비등 시발점은 마이크로히터에 기포율이 처음 존재하는 시간으로 결정하였다. 마이크로히터의 열부하가 커지게 되면, 핵비등은 더 빨리 발생한다.

후 기

이 논문은 2011년도 국민대학교 신진교수 연구지원금으로 수행된 연구임. 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2011-0012700).

참고문헌

- [1] 2006, Chen, T., Klausner, J.F., Garimella, S.V. and Chung, J.N., "Subcooled boiling incipience on a highly smooth microheater," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.49, pp.4399-4406.
- [2] 2008, Li, J., Peterson, G.P. and Cheng, P., "Dynamic characteristics of transient boiling on a square platinum microheater under millisecond pulsed heating," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.51, pp.273-282.
- [3] 2008, Xu, J. and Zhang, W., "Effect of pulse heating parameters on the microscale bubble dynamics at microheater surface," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.51, pp.389-396.
- [4] 2009, Chen, G. and Cheng, P., "Nucleate and film boiling on a microheater under pulse heating in a microchannel," *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol.36, pp.391-396.
- [5] 1979, Kotake, S. and Glass, I.I., "Flows with nucleation and condensation," *Prog. Aerospace Sci.*, Vol.19, pp.129-196.
- [6] 1994, Collier, J.G. and Thome, J.R., *Convective Boiling and Condensation*, 3rd Edition, Oxford University Press Inc., New York.
- [7] 2005, Lee, D., Lee, P.-S. and Garimella, S. V., "Prediction of the onset of nucleate boiling in microchannel flow," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.48, pp.5134-5149.
- [8] 2002, Ghiaasiaan, S.M. and Chedester, R.C., "Boiling incipience in microchannels," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.45, pp.4599-4606.