

## 병렬 미세관 흐름비등의 유동특성 및 열전달 향상에 대한 수치적 연구

전진호\*·이우림\*·서영호\*·손기현\*\*

### Numerical Study on Flow and Heat Transfer Enhancement during Flow Boiling in Parallel Microchannels

Jinho Jeon\*, Woorim Lee\*, Youngho Suh\* and Gihun Son\*\*

**Key Words** : Parallel Microchannel(병렬 미세관), Reverse Flow(역류), Channel Shape(관 형상),  
Flow Restriction(유동저항)

#### Abstract

Flow boiling in parallel microchannels has received attention as an effective heat sink mechanism for power-densities encountered in microelectronic equipment. the bubble dynamics coupled with boiling heat transfer in microchannels is still not well understood due to the technological difficulties in obtaining detailed measurements of microscale two-phase flows. In this study, complete numerical simulation is performed to further clarify the dynamics of flow boiling in microchannels. The level set method for tracking the liquid-vapor interface is modified to include the effects of phase change and contact angle. The method is further extended to treat the no-slip and contact angle conditions on the immersed solid. Also, the reverse flow observed during flow boiling in parallel microchannels has been investigated. Based on the numerical results, the effects of channel shape and inlet area restriction on the bubble growth, reverse flow and heat transfer are quantified.

#### 1. 서론

미세관에서의 비등은 차세대 초소형 전자장치에서의 효과적인 냉각 장치로 큰 주목을 받고 있다. 고효율의 냉각장치를 설계하기 위해서는 열전달에 직접 영향을 주는 기포거동에 대한 이해가 필수적이며, 이에 대한 많은 연구가 수행되고 있다.

Balasubramanian과 Kandlikar[1]은 병렬 미세관에서의 비등실험을 통하여 평균유동에 반대방향으로 역류가 발생하는 것을 관찰하고 기포의 성장 속도와 압력 변화에 대해서 알아보았다. Kandlikar 등[2]은 인 미세관에서 기포의 모습을 가시화하였고 유동의 불균일성을 줄이기 위해서 관 입구에 추가적인 압력 저항을 설치하여 기포의 역류를 줄이는 방안을 제시하였다.

최근에는 비등현상을 규명하는 방법으로 실험적인 방법 대신 2상유동을 지배하는 질량, 운동량과 에너지 보존의 방정식을 직접 수치적으로 해석하는 방법이 시도되고 있다. Son[3]은 LS(Level Set) 방법을 이용하고 상변화와 기포-고체의 접촉면처에 형성되는 마이크로 액체층(liquid micro-layer)에서의 증발효과를 고려하여 기포의 성장과 이탈과정을 해석하였다. LS 함수는 상경계면으로부터의 거리로 정의되는 미분이 연속적인 함수이기 때문에 마이크로 스케일 2상유동에서 중요한 표면장력의 효과를 정확하게 고려할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 상변화와 접촉각 효과를 고려한 LS 방법을 이용하여 병렬 채널 내에서 비등현상을 해석하고 채널 형상의 변화와 채널 입구에 압력저항이 기포성장, 역류 및 열전달에 미

치는 영향을 규명하고자 한다.

#### 2. 계산결과 및 검토

본 연구에서는 기포 성장 시간에 관하여 극한적인 2가지 경우를 가정하였다. 각 관에 기포 생성이 대칭적으로 동시에 되는 case A ( $\Delta t_{gen} = 0$ )와 기포 생성 시간이 상당히 커서 비대칭적인 생성이 되는 case B ( $\Delta t_{gen} = \infty$ )경우에 대한 기포 성장을 해석 하였다. Case A의 경우 각 관의 기포는 유동방향으로 일관되게 성장하는 모습을 보여준다. 이 경우 기포의 성장은 단일 관에서의 기포 성장 형태와 다르지 않으며 관 입구 부분은 유동의 속도와 같은 방향으로 움직이고 유동 반대방향으로의 기포 성장은 관찰되지 않는다. Case B의 경우 하나의 관에서만 기포가 성장되어 기포 성장이 비대칭하게 일어나는 경우이다. 계산 기간 동안 기포가 생성되는 관을 channel 1, 기포 성장을 포함하지 않는 관을 channel 2라고 할 때, channel 1에서는 유동 방향뿐만 아니라 반대되는 방향으로도 기포가 성장하는 것을 볼 수 있다. 이 현상은 case A에서는 나타나지 않는데, case A와 case B의 평균 열전달을 비교해보면 case A가 훨씬 크다[4].

Figure 1은 채널 입구에 유동저항의 효과를 보여준다. 가열은 관 입구 유동저항에 의해 일어날 수 있는 온도장의 변화를 줄이기 위해서 입구로부터  $x > 3.75$  지점의 바닥만 가열조건으로 제한하였다. Figure 2는 열전달에 미치는 유동저항의 효과를 나타낸다. 유동 반대 방향으로 기포성장을 줄이는 유동저항을 가진 기포 성장을 포함한 channel 1의 열전달량은 증가함을 볼 수 있다.

\* 서강대학교 대학원, jeonjho@sogang.ac.kr

\*\* 서강대학교 기계공학과, gihun@sogang.ac.kr

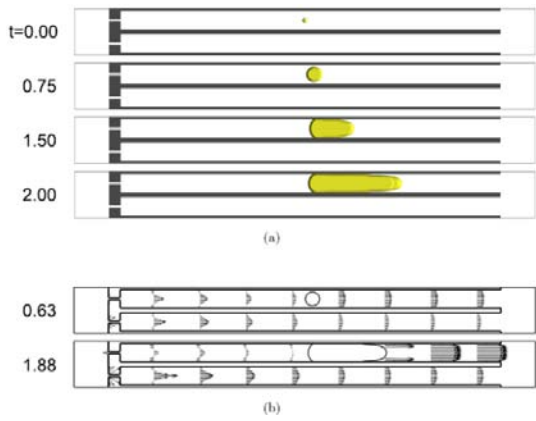


Figure 1 Flow boiling in microchannels with restriction at  $\Delta T = 5K$  and  $\phi = 40^\circ$  □ (a) bubble growth pattern, (b) the velocity field at  $y = 0.1$

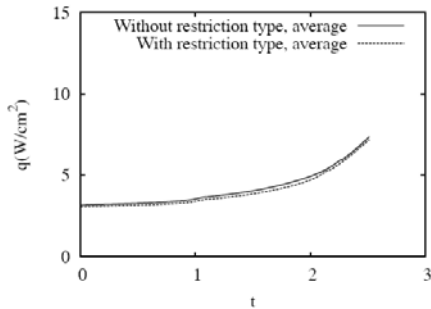


Figure 2 Effect of inlet flow restriction on wall heat flux averaged over the heating surface of both channels.

그러나 역류의 감소가 channel 2의 유동량을 감소시켰기 때문에, channel 2의 열전달량은 줄어들었다. 전체 면적에 대한 평균을 비교해보면, 관 입구에 유동저항은 열전달량의 큰 상승을 보이지 않는다.

Figure 3과 4는 관의 형상을 수렴되는 형상과 발산되는 형상으로 변화시켰을 경우의 결과를 보여준다. 발산 되는 관이 수렴되는 관보다 열전달율과 관련 있는 기포 성장률이 더 크다. 또한, 유동 반대방향으로 기포성장도 수렴되는 관보다 더 작음을 볼 수 있다. Figure 5는 각 경우별로 기포 성장이 일어나는 channel 1에서의 평균 열전달량을 비교한 것이며, 발산되는 형상의 관이 비등 열전달 향상에 크게 기여하는 것을 볼 수 있다.

### 3. 결론

본 연구에서는 상변화와 접촉각 효과를 고려한 Level Set 방법을 이용하여 병렬 미세관에서의 비등에 연관된 기포거동이 열전달에 미치는 영향에 대한 해석을 수행하였다. 총 질량 유량을 일정하게 유지하면서 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다. 단일 미세관과 비교하여 병렬 미세관에서는 유동 반대 방향으로의 기포 성장 경향은 비등 열전달율을 감소시킨다. 또 미세관 형상 변화를 통하여 비등 열전달이 크게 향상되는 것도 관찰 되었다. 채널 형상을 변화시키면 열전달율의 큰 향상을 볼 수 있었다. 입구 부분에 유동 저항은 유동 반대 방향 기포 성장을 감소시키지만, 비등 열전달의 향상에는 큰 효과를 보이지 않는다.

### Reference

[1] Balasubramanian, P., and Kandlikar, S. G., "Experimental Study

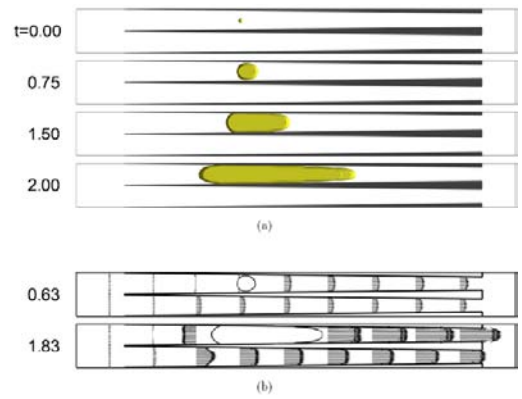


Figure 3 Numerical results for flow boiling in a converging channel with  $\Delta T = 5K$  and  $\phi = 40^\circ$  □ (a) bubble growth pattern, (b) the velocity field at  $y = 0.1$

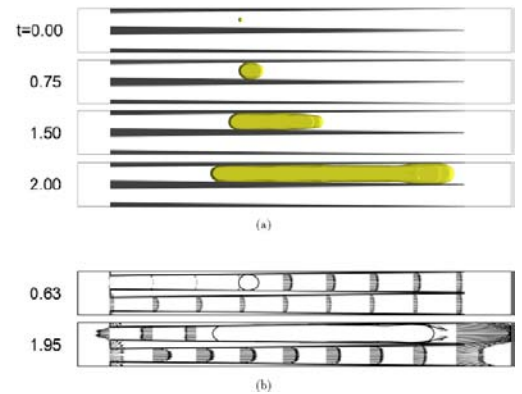


Figure 4 Numerical results for flow boiling in a diverging channel with  $\Delta T = 5K$  and  $\phi = 40^\circ$  □ (a) bubble growth pattern, (b) the velocity field at  $y = 0.1$

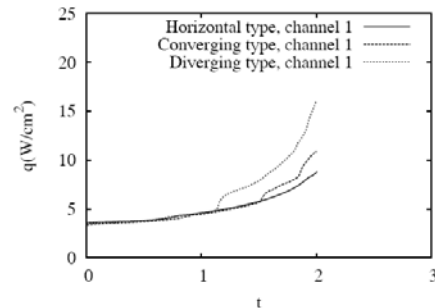


Figure 5 Effect of channel shape on wall heat flux averaged over the heating surface of channel 1 with  $\Delta T = 5K$  and  $\phi = 40^\circ$  □

of Flow Patterns Pressure Drop, and Flow Instabilities in Parallel Rectangular Minichannels," Heat Transfer Engineering, Vol. 26 (2005), pp. 20~27

[2] Kandlikar, S. G., Kuan, W. K., Willistein, D. A., and Borrelli, J., "Stabilization for Flow Boiling in Microchannels Using Pressure Drop Elements and Fabricated Nucleation Sites," J. Heat Transfer, Vol. 128 (2006), pp. 389~396

[3] Son, G., Dhir, V. K., and Ramanujapu, N., "Dynamics and Heat Transfer Associated with a Single Bubble During Nucleate Boiling on a Horizontal Surface," J. Heat Transfer, Vol. 121 (1999), pp. 623-631

[4] Lee, W., and Son, G., "Numerical Study of Bubble Growth and Reversible Flow in Parallel Microchannels," KSME Vol. 32, 2 (2008), pp. 125~132.