

마이크로 복수 분지관에서의 버블거동에 관한 연구

김경천[†] · 류건호^{*}

Bubble Behavior in a Micro-Multi-Branched-Channel

Kyung Chun Kim[†] and Geon-Ho Ryu^{*}

Abstract. Recently there are many researches about single flow and two-phase flow phenomena in the mini and microchannel. But from this result the principle in the microchannel was not explained clearly. In this paper two-phase flow pattern was visualized in the micro-muti-branched-channel using a high speed camera. Microchannel was fabricated with PDMS and glass slide. The velocity profile was obtained by a Micro PIV. Then flow boiling at the near inlet area was occurred and vapor was moved in the micro-multi-branched-channel.

Key Words : Micro PIV(마이크로 입자영상유속계), Micro-multi-branched-channel(마이크로 복수 분지관), Two-phase flow(이상유동), Boiling and condensation(비등 및 응축)

기호설명

- x : 유동방향
- u : x방향으로의 평균속도(mm/sec)
- U : x방향으로의 최대 평균속도(mm/sec)
- y : 채널 중심에서 폭방향 길이(μm)
- Y : 채널 중심에서 폭방향 벽면까지 거리(μm)

1. 서 론

마이크로채널 내 비등현상이 주요 관심대상이 되면서 단일 및 복수채널을 사용하여 열 유속에 따른 압력강하(Pressure drop), 온도분포 및 이상유동양식(Two-phase flow pattern)에 대해 연구가 많이 이루어져 왔다. Kandlikar¹⁾는 채널의 수력직경이 200 μm ~3 mm 이면 미니채널로, 10~200 μm 이면 마이크로채널로 나누고 이에 따른 이상유동 연구를 정리하고 마이크로 채널 내에서 열전달계수 상관식을 제시하기도 하였다. Lee²⁾는 수평 사각 유로에서 유로 높이를 0.4, 1, 2 mm로

변화시켜가며, R-113을 작동유체로 한 이상유동에 따른 마찰 압력강하의 실험적 연구를 수행하였으며, 이상유동 마찰 압력강하 상관식을 실험을 통해 검증하였다. Deng 등³⁾은 두 종류의 백금(Pt) 마이크로히터(Micro heater)를 사용하여 증기 버블의 생성되는 현상을 연구하였다. Steinker⁴⁾는 마이크로채널 내 강제 대류 비등(Flow boiling)시 초순수에 녹아 있는 기체의 영향에 대해서 연구하였는데, 액체에 녹아 있는 공기의 양이 많아질수록 마이크로채널 내에서 비등온도는 일반적인 비등 온도보다 낮게 나타난다고 하였다. Li⁵⁾은 유리웨이퍼(Glass wafer)위에 마이크로히터(1500Å Pt+200Å TiW, 100 μm ×100 μm ×45 μm)를 증착하여 열전달 및 액체 핵비등이 마이크로히터의 크기에 따라 다르게 나타나는 것을 연구하였으며, Zhang 등⁶⁾은 수력직경이 50 μm 보다 큰 경우에는 비등현상이 어떻게 일어나는지에 대해 연구하였는데, 핵비등(Nucleation Boiling)이 채널 벽면에서 일어나고 일반적인 비등곡선을 나타내지만, 수력직경이 50 μm 보다 더 작을 경우에는 핵비등은 관찰되어지지 않고 환상형태의 증기(Eruption)가 나타난다고 하였다. 또한 증기가 발생하면서 압력의 작은 요동(Fluctuation)을 가져오며, 핵비등이 발생하는 곳은 마이크로채널에서의 작은 공동(Cavity)에서 이루어진다고 하였다.

[†]부산대학교 기계공학부
E-mail: kckim@pusan.ac.kr

^{*}부산대학교 기계공학과 대학원

이와 같이 많은 사람들이 마이크로채널에서 일어나는 비등 및 응축 현상을 연구하고 산업적으로 응용하는데 노력을 기울이지만 명확하게 설명하지 못하고 있다. 그러므로 본 실험은 실험적인 접근방법을 통해 마이크로채널에서 일어나는 이상유동을 관찰하고 이에 따른 증발 및 응축의 특성을 파악하고자 한다.

2. 실험장치 및 조건

2.1 Micro PIV & Micro Flow Boiling

Fig. 1(a)는 Micro PIV System 구성도이다. 형광현미경(BX51, 20×Objective Lens, Olympus), 10bit High Speed Camera(1200hs, PCO), Syringe pump, Software로 이루어지며 광원은 현미경 하부에 장착된 할로겐 램프를 사용하며 입자는 지름이 1μm인 Polystyrene (R0100, Duke Scientific)가 DI Water와 희석하여, Syringe pump로 마이크로 채널 주입구 채널에 유속을 2 mm/sec으로 일정하게 주입한다. $\theta=90^\circ$ 분지채널인 경우 측정영역은 Fig. 2(a)와 같이 A, A(2+, 1+, 0, 1-, 2-)로 나

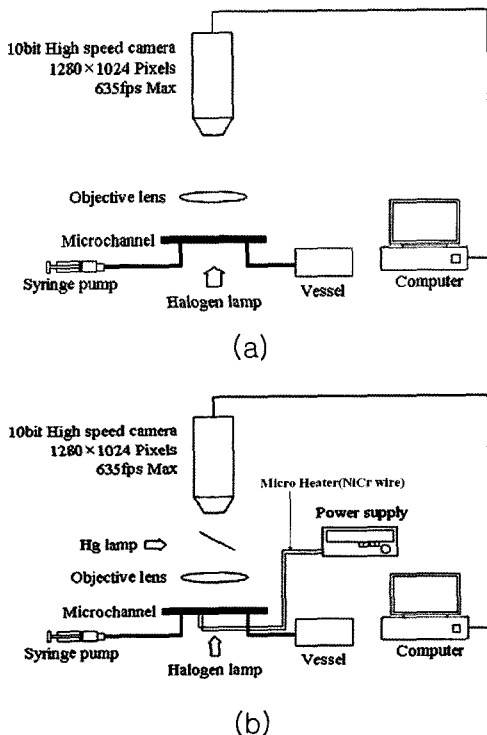


Fig. 1. Experimental setup (a) Micro PIV and (b) Boiling and condensation.

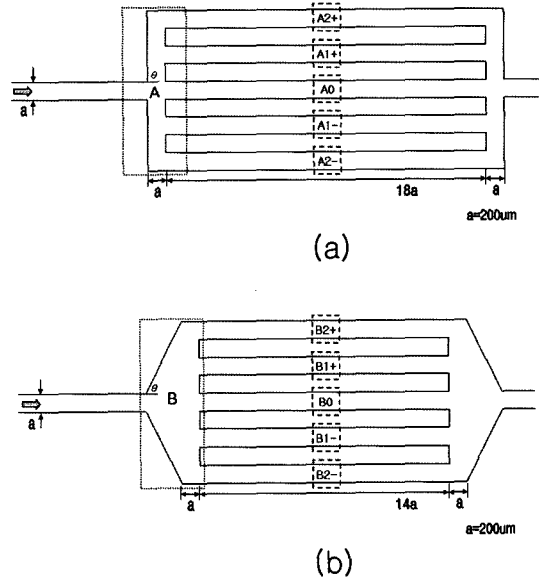


Fig. 2. Microchannel and measurement area (a) $\theta=90^\circ$ and (b) $\theta=60^\circ$ sudden expansion angle channel.

누어 각 채널에서 이미지를 얻는다. $\theta=60^\circ$ 분지채널에서도 $\theta=90^\circ$ 분지채널과 동일한 측정영역을 가지며 B, B(2+, 1+, 0, 1-, 2-)로 표시한다. 측정은 채널 상하 중심단면에서 이루지며, $\theta=90^\circ$ 채널에서는 100장, $\theta=60^\circ$ 분지채널에서는 200장의 이미지를 얻는다. 속도벡터 추출은 Two-frame cross correlation 기법을 적용하였으며, 속도추적 구간 크기는 32×32 픽셀 (50% Overlap)이다.

마이크로채널 내 비등 및 응축을 관찰하기 위한 기본적인 실험장치는 마이크로 입자영상유속계(Micro PIV)와 동일하며 Fig. 1(b)와 같이 Micro Heater로 전열선(Ni80%Cr20% Dia.=200 μm)을 Glass와 PDMS 몰딩시 채널 바닥면에 삽입하고 PDMS 경화된 뒤 전원공급장치(Power Supply)로 전열선을 가열하여 국부적인 비등을 발생시킨다.

2.2 Microchannel 제작

음성감광제 SU-8을 스피너(Spin coater)로 적절히 회전수를 조절하면서 두께가 100 μm가 되도록 4-inch 웨이퍼 전면에 도포하며, 자외선(UV)을 이용하여 감광제를 노광시키고 현상액에 담궈서 빛을 받지 않은 부분을 제거하고 빛을 받은 부분을 구조물로 사용한다. 고형제가 첨가된 폴리디메틸실록산(PDMS)를 구

조물이 형성된 웨이퍼 위에 붓고 진공오븐에 넣어서 PDMS 용액 내부의 기포를 제거한 다음, 100 °C로 가열된 진공오븐 챔버에 90분 동안 넣고 고형화 시킨다. 고형화된 PDMS를 웨이퍼에서 떼어내고 플라즈마 표면처리를 통해 유리와 PDMS 서로 접합한 다음 진공 오븐(120 °C)에 넣고 30시간 이상 열처리를 하여 PDMS 채널의 소수성을 회복하였다. Fig. 2는 제작된 마이크로 복수 분지관을 보여주고 있다. Fig. 2(a)는 채널의 급확대각 $\theta=90^\circ$ 이며 Fig. 2(b)는 $\theta=60^\circ$ 이다. 채널의 단면적은 크기 폭 $200 \mu\text{m} \times$ 깊이 $100 \mu\text{m}$ 으로 급확대각 $\theta=90^\circ$ 및 $\theta=60^\circ$ 채널 모두 단면적이 동일하다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Micro PIV

Fig. 3(a)는 $\theta=90^\circ$ 인 채널의 각 분지관의 속도를 나타내고 Fig. 3(b)는 $\theta=60^\circ$ 채널의 분지관 속도를 서

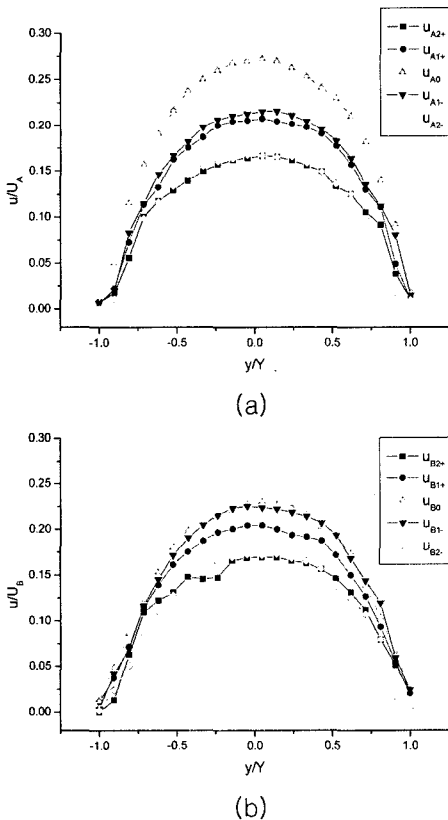


Fig. 3. Velocity profiles in the branched channels (a) $\theta=90^\circ$ and (b) $\theta=60^\circ$.

로 비교한 그래프이다. $\theta=90^\circ$ 인 채널에서는 중심 분지관이 다른 분지관에 비해 유량이 많이 흐르고 전체적으로 u_{A0} , $u_{A1\pm}$, $u_{A2\pm}$ 순으로 중심에서 멀어질수록 유속의 크기가 작아지고 있다.

Fig. 3(b)에서는 속도 차이가 많이 나지 않으며 급확대(분지) 각도가 작을 때 유동은 채널 전체적으로 속도크기가 상대적으로 작아지며 균일하게 흐르는 면에서 $\theta=90^\circ$ 분지채널의 속도 분포보다 개선된 모습을 보여주고 있다. 여기서 U_A 는 $\theta=90^\circ$ 분지채널 입구채널의 최대속도이며, U_B 는 $\theta=60^\circ$ 분지채널 입구채널의 최대속도이다.

Fig. 3에서 얻어진 데이터를 이용해서 각 채널의 평균유속 \bar{u} 을 구하여보면 Table 1과 같이 나타낼 수 있다. $\theta=90^\circ$ 분지채널 각 평균속도의 합은 $\bar{u}_{\theta=90^\circ} = 2.09 \text{ mm/sec}$ 이며, $\theta=60^\circ$ 분지채널 평균속도의 합은 $\bar{u}_{\theta=60^\circ} = 1.94 \text{ mm/sec}$ 이다. $\theta=60^\circ$ 분지채널에서는 전체적으로 분지관 중심채널 속도크기 비율이 줄어들고 양 끝단의 분지채널 속도크기의 비율은 증가함을 볼 수 있다. $\theta=90^\circ$ 분지채널의 Simulation (CFD-ACE+) 결과는 실험결과와 유사하지만, $\theta=60^\circ$ 분지채널인 경우에 다섯개의 분지채널이 모두 균일한 속도 분포를 보이는 Simulation 결과와는 차이가 난다. 이에 대한 정확한 결과를 얻기 위해서는 차후 계속적인 실험을 통해 확인해야 할 사항이다.

Table 1. Averaged velocity(mm/sec)
(a) $\theta=90^\circ$

Meas. Area	Simulation	Experiment Result
2+	16.6%	16.3%
1+	19.9%	20.1%
\bar{u} 0	27.0%	26.7%
1-	19.9%	21.1%
2-	16.6%	15.8%
STB of \bar{u}	3.8%	3.94%

(b) $\theta=90^\circ$

Meas. Area	Simulation	Experiment Result
2+	19.0%	17.0%
1+	20.4%	20.6%
\bar{u} 0	21.2%	23.2%
1-	20.4%	22.7%
2-	19.0%	16.5%
STB of \bar{u}	0.87%	2.8%

3.2 친수성 및 소수성 표면에서 증기 응축

유리 및 PDMS 표면은 산소플라즈마 영향으로 표면이 모두 친수성으로 되어 있다. 시간이 흐르면 자연적으로 소수성으로 회복되지만 그 속도가 느리며 소수성 회복되는 비율도 높지 않다. 하지만 친수성 표면을 열처리를 하면 회복되는 소수성의 비율을 더 높일 수 있다. 이렇게 소수성 및 친수성 채널로 만들어진 표면에 증기 슬러그를 흘려 보았을 때 나타나는 증기의 거동 및 응축되는 과정을 살펴보았다. 먼저 플라즈마 처리 후 5시간이 지난 친수성 채널을 사용하였을 때 나타나는 증기의 모습은 Fig. 4(a)와 같이 나타난다. 메탄올의 증기는 핵비등으로 벽면까지 성장을 이룬 다음 친수성 유리면과 닿으면서 응축이 일어나면서 서서히 움직인다. 응축의 형태는 일정한 얇은 막형태를 보이고 있는데 기존의 연구와 유사한 결과를 보여주고 있다.

Fig. 5에서는 120°C 오븐(Oven)에 30시간 동안 열처리를 한 다음 공기 중에 5시간동안 놓아둔 다음 비등 및 응축실험을 한 결과이다. 표면에서 적응축에 의한 영향이 두드러지게 나타나며 증기 유동방향으로 이동하면서 수 마이크로 크기의 적응축이 생성된다. 이들은 서로 뭉치면서 점점 커지게 되는데 일정한 크기가 되면 응축된 액막에서 작동 유체쪽으로 완전히

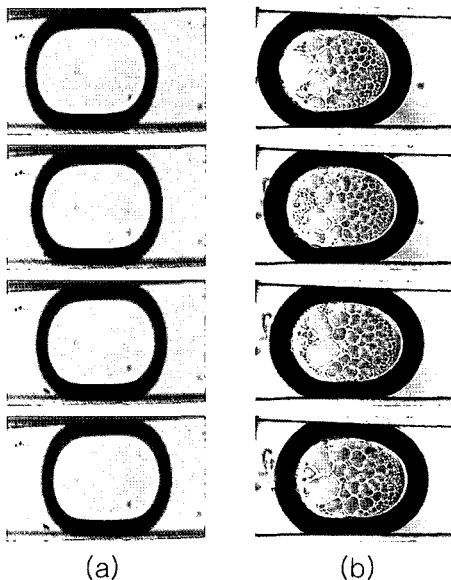


Fig. 4. Methanol vapor condensation (a) hydrophilic (b) hydrophobic surface.

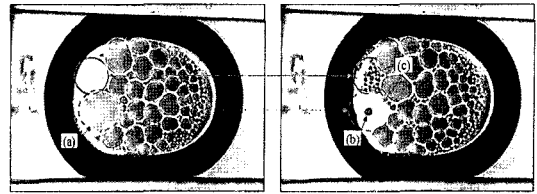


Fig. 5. Droplet behavior on the hydrophobic surface. (a) Liquid droplet draw back into the forced liquid (b) In the center of droplet position smaller droplet remain (c) At the other area of circle condensation occur and grow.

빠져나간다. 다소 큰 액적이 빠져나간 영역은 중심부분에 작은 액적이 남고 나머지 부분은 다시 아주 작은 크기의 적응축이 시작되고 작은 액적들은 점점 커져나가는 모습을 보이고 있는 것을 알 수 있다.

3.3 마이크로 복수 분지관에서의 이상유동

Fig. 6에서 복수 분지관에 유입되는 증기의 형태는 크게 버블, 슬러그 그리고 플러딩(Flooding)로 볼 수 있다. 본 실험에서는 마지막 경우에는 구현하기 어려우므로 10초단위로 주사기펌프(Syringe Pump)에서 메탄올 유량을 10 $\mu\text{l}/\text{min}$ 으로 증가시키면서 슬러그 형태로 복수 분지관에 유입되도록 하였다.

3.3.1 정체 및 성장영역($Re < 0.5$)

유량이 5 $\mu\text{l}/\text{min}$ 일 때 복수 분지관 두 가지 경우 모

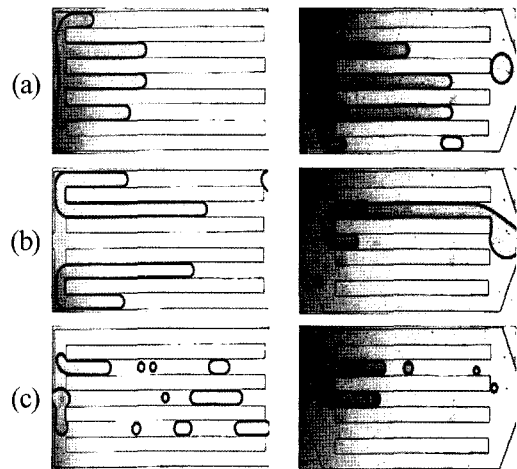


Fig. 6. Two-phase flow pattern in the micro-multi-branched-channel (a) Vapor slowly grow (b) Vapor Slug (c) Bubble and Vapor Slug.

두 입구채널로부터 주입되는 슬러그 증기는 분지채널로 분지되는 영역에서 더 이상 이동하지 못하고 멈추게 된다. 여기에 계속 슬러그 증기가 뭉쳐지면서 증기 뒷 부분은 분지채널에서 서서히 증가한다.

3.3.2 슬러그 영역($0.5 < Re < 3.5$)

유량이 $10 \sim 30 \mu\text{l}/\text{min}$ 에서는 슬러그가 보다 빠르게 생성되고 역시 분지되는 영역에서 슬러그가 정지되었다가 뒤에 오는 증기와 합쳐진다. 하지만 큰 단일 슬러그 형태로 지속되지 않고 슬러그 형태로 복수 분지관을 지나간다.

3.3.3 버블 및 슬러그 영역($Re > 3.5$)

유량이 $30 \mu\text{l}/\text{min}$ 이상에서 복수 분지관에서는 증기정체현상을 찾아 볼 수 없으며 증기가 발생하는 곳에서 증기 슬러그들이 빠르게 생성되면 채널에서 슬러그 형태로 빠르게 지나가거나 채널폭보다 작은 버블이 발생하여 분지관을 지나게 된다.

4. 결 론

Micro PIV의 결과를 보면 시뮬레이션 결과와 유사한 것을 확인 할 수 있는데, 마이크로 채널에서는 층류가 지배적인 현상이라고 가정을 했을 때 유동의 변화를 주기 위해서는 유체 및 고체표면의 성질을 변화시키거나 이번 실험에서와 같이 채널 형상에 변화를 줌으로써 유동에 영향을 줄 수 있음을 확인 할 수 있다. 또 입구 영역에서 증기를 발생시켜 복수 분지관에서 유동을 관찰한 결과는 슬러그 형태의 증기가 복수 분지관으로 유입될 때 메탄올 증기는 유량에 따라 분지영역에서 정체 되어있거나 슬러그 형태로 채널을 빠져나가는 모습을 보이고 있으며, $Re > 3.5$ 인 경우는 버블 및 슬러그 형태를 보여주고 있다. 이와같이 마이크로 복수 분지관에서의 유동을 Micro PIV를 통해

속도장을 구할 수 있었으며 마이크로히터를 이용한 비등 및 응축실험을 통해서 복수 분지관내 유량에 따른 정체, 슬러그, 버블 및 슬러그 유형의 내부유동을 나타남을 확인 할 수 있었다.

후기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2006-000-10742-0)의 지원과 보건복지부 보건의료기술진흥사업(과제고유번호: A020605)의 지원에 의해 수행되었음.

참고문헌

- 1) S. G. Kandlikar, "Fundamental issues related to flow boiling in microchannels and microchannels", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 26, pp. 389-407, 2002.
- 2) 이한주, 이상용, "수평 사각 유로 내에서의 비등 유동 압력강하에 관한 실험적 연구", *대한기계학회 논문집 B권*, 제25권 제9호, pp. 1219-1226, 2001.
- 3) P. Deng, Y. K. Lee, P. Cheng, "The growth and collapse of a micro-bubble under pulse heating", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 4041-4050, 2003.
- 4) M. E. Steinke, S. G. Kandlikar, "Control and effect of dissolved air in water during flow boiling in microchannels", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 1925-1935, 2004.
- 5) J. Li, G. P. Peterson, "Boiling and two phase flow patterns in forced liquid flow in microchannels", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005.
- 6) L. Zhang, E. N. Wang, K. E. Goodson, T. W. Kenny, "Phase change phenomena in silicon microchannels", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 1572-1582, 2005.