

다른 세장비의 사각 마이크로채널 내의 기포 거동에 관한 연구

최치웅*† · 유동인* · 김무환*

* 포항공과대학교 기계공학과

Investigation of Bubble Behavior in Rectangular Microchannels for Different Aspect Ratios

Chi-woong CHOI*†, Dong In Yu* and Moo Hwan Kim*

* Dept. of Mechanical Engineering, Pohang university of Science and Technology

(Received August 18, 2009 ; Revised December 30, 2009 ; Accepted March 4, 2010)

Key Words: Microchannel(마이크로채널), Aspect Ratio(세장비), Bubble(기포)

초록: 다른 세장비에 따른 단일 사각 마이크로 채널 내의 이상유동연구를 수행하였다. 본 연구에서는 대략 넓이가 500 μm 이며 수력직경이 각각 490, 322, 143 μm 인 사각 마이크로채널 내에서의 물-질소 유동에 대한 실험이 수행되었다. 또한, 고속카메라와 장거리 현미경을 통해 이상유동양식을 가시화하였다. 본 연구는 이상유동 중 기포류에 중점을 두었으며 가시화 결과를 통해 기포의 속도, 기포의 길이, 관 내 기포의 개수, 기공률을 산출하였고 단위 셀 모델을 기반으로 늘어진 단일 기포의 압력강하를 해석하였다. 실험을 통해 기포의 속도, 기공률, 단일 기포의 압력강하가 각각 겉보기 속도와 체적건도, 세장비와 연관이 있음을 확인하였으며, 사각 마이크로 채널 내 늘어진 단일 기포의 압력강하에 대한 상관식을 개발하였다.

Abstract: The adiabatic two-phase flow in single rectangular microchannels was studied for different aspect ratios. The working fluids were liquid water and nitrogen gas. The hydraulic diameters of the rectangular microchannels were 490, 322, and 143 μm, and the widths of the microchannels were around 500 μm. The two-phase flow pattern was visualized using a high-speed camera and a long-distance microscope. This study was focused on bubble flow regimes. From the visualized images, the bubble velocity, bubble length, number of bubbles, and void fraction were evaluated. Further, the pressure drop in a single bubble was evaluated by using a unit cell model. The bubble velocity is proportional to the superficial velocity. Further, the relationship between the void fraction and the volumetric quality is linear. The pressure drop in a single elongated bubble is strongly related to the aspect ratio. Finally, the new correlation about the pressure drop of a single elongated bubble in the rectangular microchannel was proposed.

- 기호설명 -

A_{ch} : 마이크로 채널의 단면적	[m ²]	j : 전체 겉보기 속도	[m/s]
A_B : 기포의 단면적	[m ²]	j_L : 액체상의 겉보기 속도	[m/s]
A_{film} : 액막의 단면적	[m ²]	j_G : 기체상의 겉보기 속도	[m/s]
AR : 세장비		$L_{S,eff}$: 실제액상 슬러그 길이	[m]
Ca_B : 기포속도의 미세관수 ($= \frac{\mu_L u_B}{\sigma}$)		N_{UC} : 단위 셀의 수	
D_h : 수력직경	[m]	ΔP_{EXP} : 측정된 전체 압력 강하	[Pa]
H_{ch} : 마이크로채널 높이	[m]	ΔP_S : 액상 슬러그의 압력 강하	[Pa]
Re : 레이놀즈 수		ΔP_B : 기포의 압력 강하	[Pa]
W_{ch} : 마이크로채널 폭	[m]	ΔP_{EB} : 늘어진 기포의 압력강하	[Pa]
f : 마찰 계수		u_{film} : 액막의 속도	[m/s]
G_L : 액체상의 질량 유속	[kg/m ² s]	u_B : 기포의 속도	[m/s]
G_G : 기체상의 질량 유속	[kg/m ² s]	α : 기공률	
		β : 부피적 건도	
		σ : 표면장력 계수	[N/m]
		μ_L : 점성 계수	[kg/ms]
		ρ_L : 액상 밀도	[kg/m ³]

† Corresponding Author, chiwoong@postech.ac.kr

1. 서론

마이크로채널은 MEMS(micro-electro mechanical system)의 제작 기술 발전과 함께 꾸준히 발전을 하였고, 현재는 마이크로 사이즈의 다양한 적용분야에 기초가 되는 구성 요소로 자리잡았다. 이에 따라, 마이크로채널 내의 2 상 유동에 대한 연구도 압력강하, 유동패턴, 상변화 열전달 등 다양한 분야에서 진행이 되어왔다.^(1,2) 그러나, 대부분의 기존 연구들은 원형 단일 마이크로/미니튜브나 사각형의 멀티 마이크로채널을 사용하였다. 이는 작은 사이즈의 제작상의 어려움과 연관이 있으며, 미세 원형관이 주로 Tefron 이나 유리로 제작되기 때문에 가시화의 이점을 필요로 하는 경우에 사용되어 왔다. 그러나, 이러한 상용관은 MEMS 제작 기술을 이용한 방식으로 제작이 되지 않았기 때문에 내경 사이즈가 불균일한 문제를 가지고 있다. 그리고, 사각형의 멀티 마이크로채널의 경우는 실제 응용의 상황과 가까운 형태를 취하고는 있지만, Mal-distribution 의 영향으로 인해 각 채널간의 불균일이 존재하며, 또한 채널간의 상호작용이 존재하게 된다. 그러므로, 하나의 채널에서의 물리적인 현상을 해석하기에 부적합하다고 할 수 있다.

사각 마이크로채널의 중요성은 마이크로 시스템의 응용분야에 필수적이라고 할 수 있다. 이는 마이크로 사이즈의 구조물 제작이 재료와 큰 상관관계를 가지기 때문이다.⁽³⁾ 원형 관과 사각 관의 가장 큰 차이점은 사각형의 모서리에 있다. 특히, 2 상 유동의 기포류의 경우 원형 관에서는 기포를 감싸고 있는 액막이, 중력을 무시할 수 있을 만큼 작은 관인 경우, 관 내에서 일정한 두께를 가지게 된다. 그러나, 사각 관의 경우 모서리에 더 두꺼운 액막 두께를 형성하여, 유동 방향에 대해서 비대칭의 액막 두께를 이루게 된다. 또한, 이러한 차이는 사각 관의 세장비에 영향을 받을 것으로 판단된다. 이에 따라, 본 연구에서는 가시화가 가능하도록 유리로 제작된 다른 세장비의 사각 마이크로채널을 제작하였다. 액상의 물과 기상의 질소를 사용하여, 단일조건에서의 사각 마이크로채널 내의 2 상 유동에 대한 실험을 수행하였다. 고속 카메라와 원거리 현미경을 이용하여 사각 마이크로채널 내의 2 상 유동의 패턴을 가시화하였다. 또한 마이크로채널 내의 2 상 유동 압력 강하를 채널 내에서 직접 측정하였다. 가시화 정보로부터 사각 마이크로채널내의 기포 유동 패턴에 대한 정보를 획득하였고, 세장비에 따른 영향을 분석하였다.

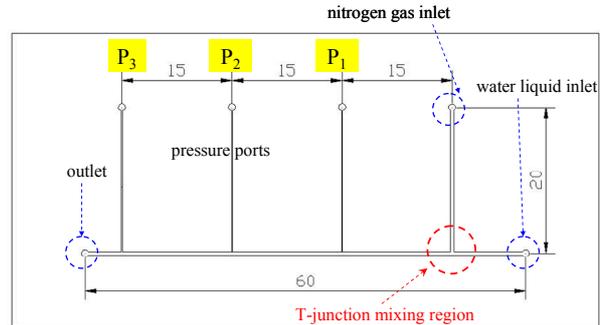


Fig. 1 Mask image of test section [unit: mm] (top view).

그리고 단위 셀 모델에 기초하여 기포 하나가 만드는 압력강하에 대해서 분석하였다.

2. 실험 장치 및 조건

2.1 시험부

사각 마이크로채널은 감광유리(photosensitive glass)를 사용하여 MEMS 제작 기술을 통해 제작을 할 수 있었다. 제작 공정에 대한 자세한 사항은 선행 연구⁽⁴⁾에 자세히 기술 하였다. 다만, 최종 바닥면은 선행연구에서와 달리 전극이 없는 감광유리로 직접 접합하였다. 감광유리를 사용하여 마이크로채널 폭은 대략 500 μm 를 유지하면서 높이를 CMP(Chemical Mechanical polishing) 공정을 사용하여 조절함으로써 다른 세장비의 사각 마이크로채널을 제작하였다. Fig. 1 은 사각 마이크로채널의 시험부의 마스크(Mask) 이미지이다. 두 개의 입구부를 통해 액상의 물과 기상의 질소를 주입할 수 있도록 하였고, T-junction 형태의 Mixer 부를 통해 2 상 유동을 형성하였다. 채널 내에 3 개의 압력 포트를 제작하여, 사각 마이크로채널 내에서 압력을 직접 측정할 수 있도록 하였다. 사각 마이크로 채널의 전체 길이는 60 mm 이고 압력 포트 간의 거리는 15 mm 이다.

2.2 실험장치

물과 질소의 유량은 공압 펌프(pneumatic pump)에 의해서 조절하였다. 출구단은 대기로 개방하였기 때문에 결과적으로 각 상의 입구의 압력을 정공 레귤레이터(regulator)로 조절함으로써 유량을 조절할 수 있었다. 물과 질소에 대해서 압력을 가하는 기체로는 각각 헬륨 가스와 질소 가스를 사용하였다. Fig. 2 는 실험 루프 및 실험 장치들의 개략도이다. 각 상의 유량은 유량계들(OMEGA-FLR1602A, FLR1603A, FMA1604A, FMA1619A)로 계측하였고, 유량 영역에 따라서 다른 유량계를 사용하였다. 오염을 방지하기 위하여,

Table 1 Experimental conditions

Variables	Ranges
Hydraulic diameter, $D_h (W_{ch} \times H_{ch}) [\mu m]$	490 (510 × 470) 322 (501 × 237) 143 (503 × 85)
Liquid mass flux, $G_L [kg/m^2s]$	66 - 600
Gas mass flux, $G_G [kg/m^2s]$	0.075 - 36
Liquid Reynolds number, Re_L	9 - 477
Gas Reynolds number, Re_G	0.6 - 1021
Liquid superficial velocity, $j_L [m/s]$	0.06 - 1.0
Gas superficial velocity, $j_G [m/s]$	0.06 - 3

Table 2 Experimental uncertainties

variables	uncertainty
Diameter [μm]	± 17 (4.5 %)
Area [μm^2]	± 6311 (3.8 %)
Pressure [kPa]	$\pm 0.01, \pm 0.005,$ $\pm 0.034, \pm 0.085$
Temperature [$^{\circ}C$]	$\pm 0.1 - 0.5$
Mass flux, $G [kg/m^2s]$	$\pm 0.1 - 2$ %
Friction factor	± 9 %
Superficial velocities [m/s]	± 10 %
Bubble and Slug length [μm]	11 - 13

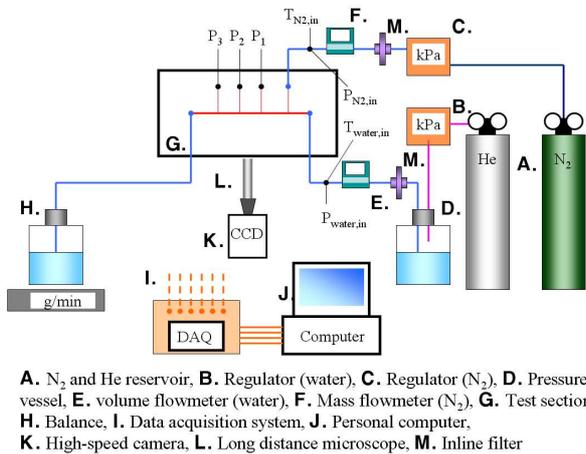


Fig. 2 Experimental apparatus

0.5 μm 기공 사이즈를 가지는 필터(HyLok-F1SE)를 각 상의 루프의 입구에 설치하였다. 압력 포트들 통해 차압계 및 압력계 (Druck-LPM900 과 Setra-230, 270)를 사용하여 압력을 측정하였다. 본 실험을 실행하기 전에, USP 방법⁽⁵⁾을 사용하여 이온이 없는 물의 용존 가스를 제거하였다. 그리고 전체 연결 튜브들 사이에 존재하는 용존를 제거하기 위해서 약 30 분 가량 물을 빼내었다. 모든 계측

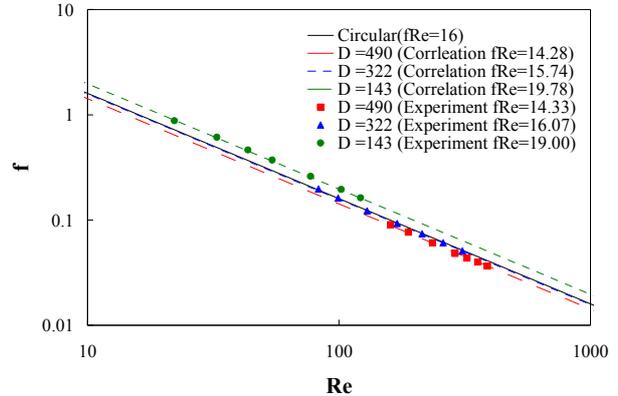


Fig. 3 Friction factor and Reynolds number for the rectangular microchannels

기의 데이터는 2 초마다 데이터 획득 장치(Agilent 34970A)를 통해서 PC 에 저장하였다. 또한, 고속 카메라(Redlake MotionXtra HG-100K)와 장거리 현미경(Infinity InFocusTM Model KC) 을 사용하여 마이크로채널 내의 2 상 유동을 가시화 하였다.

2.3 실험조건

물과 질소의 유량을 Table 1 에 표시한 범위에서 조절을 하였다. 즉, 사각 마이크로채널 전체의 면적을 기준으로 물의 겉보기 속도(j_L)를 0.06 - 1.0 m/s, 질소의 겉보기 속도(j_G)를 0.06 - 3 m/s 의 영역에서 실험을 수행하였다. 물의 유량을 일정하게 한 상태에서 질소의 유량을 증가시키면서 실험 조건을 변경하였다. 물성치는 www.matweb.com에서 제시된 자료를 사용하였다. Table 2 에 본 실험의 불확실성에 대해서 정리하였다.

3. 결과

3.1 단상 압력강하

2 상 유동 실험을 수행하기 이전에, 단상 압력강하에 대한 실험을 물을 사용하여 수행하였다. 단상 압력강하는 층류의 경우 fRe 의 값이 일정한 값을 가진다. 원형 관의 경우 16 의 값을 가지며, 사각관인 경우 Shih⁽⁶⁾가 제시한 식 (1)과 같은 상관식으로 나타낼 수 있고 세장비(AR)의 함수로 표현된다. 본 연구에 사용된 사각 마이크로채널의 세장비는 각각 0.92, 0.47, 0.17 으로 수력직경(D_h)은 490, 322, 143 μm 이다. Fig. 3 에 마찰 계수와 레이놀즈 수의 결과를 나타내었다. Shih 의 상관식에 의하면 fRe 의 값이 각각 14.28, 15.74, 19.78 로 예측되며, 본 실험 결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 이로부터 본 실험 장치와 시험부의 설

계가 잘되었음을 알 수 있으며, 마이크로채널에서도 기존의 단상 압력강하 상관식의 적용이 가능함을 다시 한번 확인하였다

$$f Re = 24 \left(\begin{array}{l} 1 - 1.3553AR + 1.9467AR^2 \\ -1.7012AR^3 + 0.9564AR^4 - 0.2537AR^5 \end{array} \right) \quad (1)$$

3.2.2 상 유동 패턴

Fig. 4, 5 는 각각 액상의 겉보기 속도(j_L)와 기상의 겉보기 속도(j_G) 변화에 따른 2 상 유동 패턴의 양상을 나타낸다. j_L 이 0.06 m/s 로 일정할 때, j_G 를 증가시키에 따라 기포의 길이가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 반면에, j_G 가 0.13 m/s 로 일정할

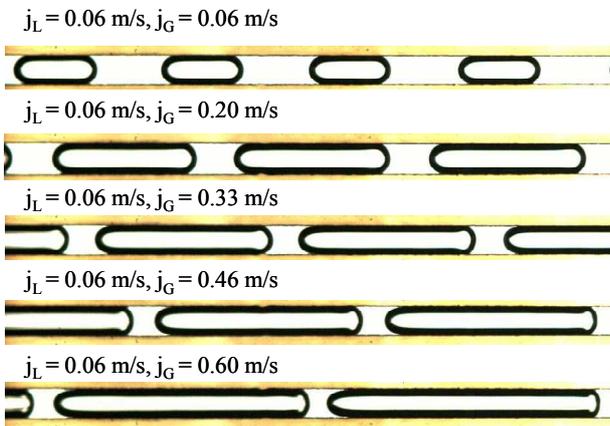


Fig. 4 Bubble development for different j_G at $j_L = 0.06$ m/s

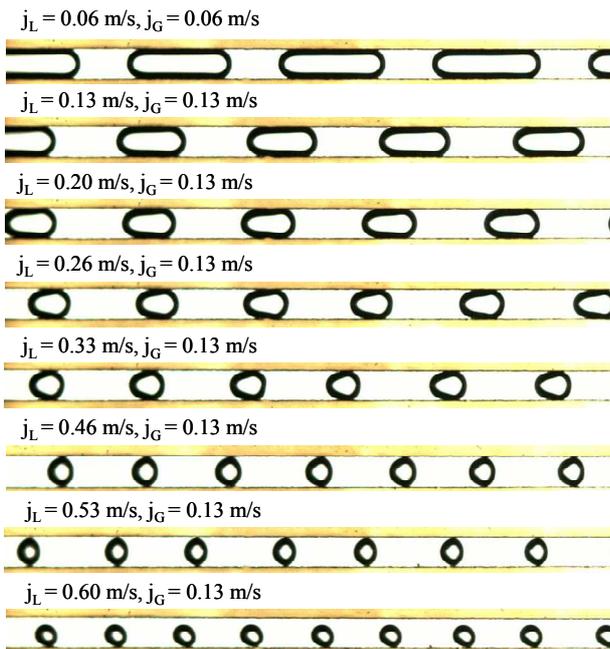


Fig. 5 Bubble development for different j_L at $j_G = 0.13$ m/s

때, j_L 이 증가함에 따라 기포의 길이는 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 기포의 크기에 따라 가시화 결과로부터 기포류에서의 2 상 유동의 양식을 Fig. 6 와 같이 분류하였다.

- (1) 기포류(bubbly flow): 채널의 폭보다 기포 길이가 작은 경우.
- (2) 슬러그 기포류(slug bubble flow): 채널의 폭보다 기포 길이가 크지만, 채널폭의 1.5 배보다 작은 경우.
- (3) 늘어진 기포류(elongated bubble flow): 기포의 길이가 채널 폭의 1.5 배보다 큰 경우

또한, 가시화 결과에서 알 수 있듯이, 기포의 위쪽과 아래쪽에 어두운 부분이 있음을 알 수 있으며, 이는 사각 채널에서의 모서리 부분에 상 경계의 곡률이 존재하고, 이에 따라 굴절률의 차이에 의해서 어렵게 나타나는 것으로 판단된다. Wong 등⁽⁷⁾은 원형 세관 및 다각형의 단면을 가지는 세관에서의 긴 기포에 대한 수치적 연구를 수행하였

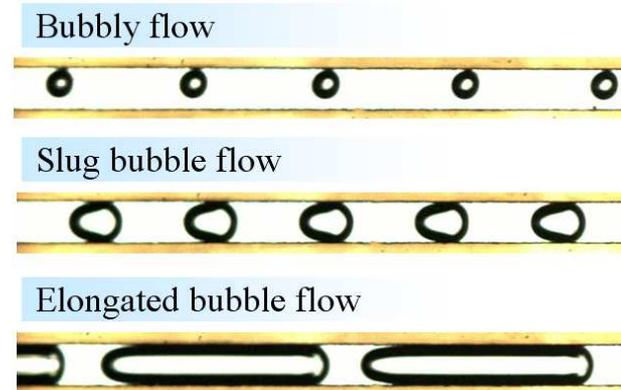


Fig. 6 Classification of bubble flow regime in the rectangular microchannel

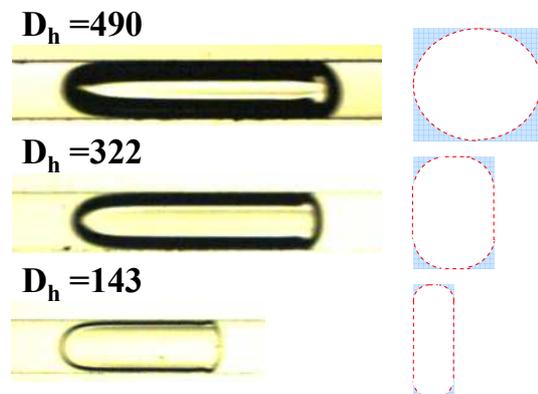


Fig. 7 Visualization of the elongated bubble in the rectangular microchannels with different aspect ratios at $j_L = 0.2$ m/s and $j_G = 0.6$ m/s

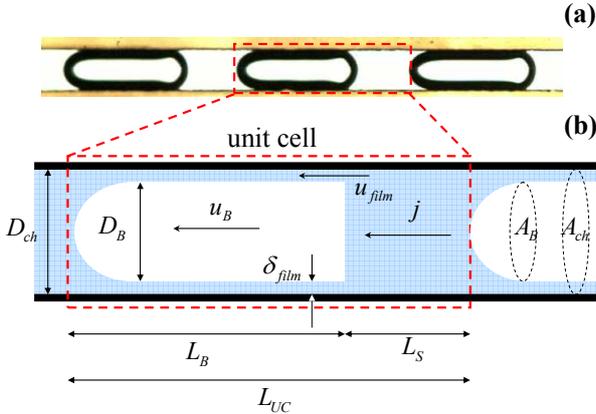


Fig. 8 Unit cell model: (a) visualization of elongated bubble, (b) variables in unit cell concept

다. 그들의 결과에 따르면, 세장비가 감소함에 따라 모서리 부분의 곡률이 감소함을 나타내었다. 본 연구에서의 다른 세장비의 사각 마이크로채널 내의 기포의 가시화 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 세장비가 감소함에 따라, 즉 수력 직경이 감소함에 따라 어두운 부분의 영역이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 이는 Fig. 7에 오른쪽의 단면도에 나타난 것처럼 모서리 부분의 액막의 양이 감소함에 따른 결과로 판단된다.

3.3 단위 셀 모델

가시화 결과에서 알 수 있듯이, 본 실험에서의 기포류는 일정한 기포와 액체 슬러그의 균일한 분포를 나타내고 있다. 이로부터, 일정하게 반복되는 구간을 단위 셀(unit cell)로 정의함으로써 기포류의 거동의 해석을 보다 간단히 할 수 있다. 이러한 접근 방식을 단위셀 모델이라 부른다. Fig. 8은 단위 셀 모델의 개략도이다.

Garimella 등^(8,9)은 단위 셀 모델을 마이크로채널 내의 응축에서 생기는 기포류에 대한 압력강하 모델에 적용하였다. 단위 셀은 크게 기포영역과 액체 슬러그 영역으로 구분되며, 기포와 액체 슬러그의 속도, 기포를 감싸고 있는 액막의 속도, 각 영역의 길이 등을 Fig. 8(b)에서처럼 정의할 수 있다. 본 연구에서는 기포의 속도 및 기포가 만드는 압력을 단위 셀 모델에 기초하여 해석하였다.

3.4 기포속도

기포의 속도는 기포류의 해석에서 중요한 인자 중에 하나이다. 기포의 속도에 상관식들은 드리프트 플럭스(drift flux)에 기초한 모델을 사용하여왔다. 수평 관에 대해서는 drift flux의 영향이 무시될 수 있으므로, 간단히 전체 겉보기 속도에 비례하는 식으로 다음과 같이 제시되어왔다.⁽¹⁰⁾

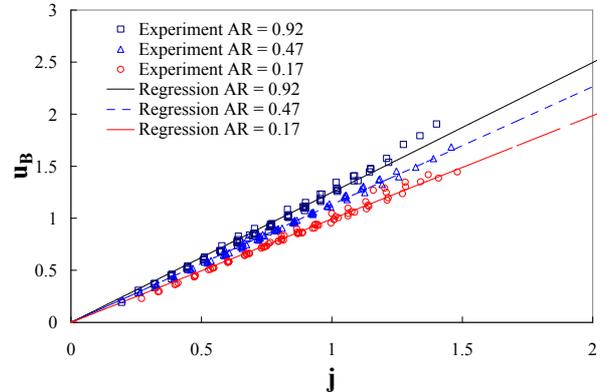


Fig. 9 Bubble velocities for rectangular microchannel with different aspect ratio

$$u_B = C_1 j \quad (2)$$

식 (2)의 계수 C_1 은 분포 인자(distribution factor)이다. 상용관에 대해서는 C_1 이 1.2의 값으로 잘 일치하는 결과들을 나타내고 있다.⁽¹⁰⁾ Fukano와 Kariyasaki⁽¹¹⁾는 1, 2.4, 4.9 mm의 원형 튜브를 사용하여 단열상태에서 기포의 거동에 대한 실험을 수행하였고, 기포 속도에 대해서 다음과 같은 상관식을 제시하였다.

$$u_B = C_1 j^{1.05} \quad (3)$$

그리고, 분포 인자를 다른 직경에 대해서 1.09, 1.17, 1.21의 값을 각각 제시하였다. 튜브의 직경이 감소함에 따라 C_1 의 값이 증가함을 나타내었다. 사각 채널 내의 기포에 대한 유량의 보존식을 세워보면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$jA_{ch} = u_B A_B + u_{film} A_{film} \quad (4)$$

A_{ch} , A_B , A_{film} 은 각각 채널, 기포, 액막의 면적에 해당한다. u_{film} 은 액막의 속도이다.

식 (4)를 기포의 속도에 대해 정리해보면, 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u_B = \frac{A_{ch}}{A_B} j - \frac{A_{film}}{A_B} u_{film} \quad (5)$$

Wong 등의 결과에 따르면, 액막의 속도는 실제로 기포속도에 최대 5% 정도에 해당하는 크기로 무시할 만 하다. 그러므로, 본 연구에서는 식 (5)의 두 번째 항을 무시하였다. 그러므로, 식 (2)와 식 (5)를 비교하면, C_1 은 채널과 기포의 면적 비를 나타냄을 알 수 있다.

기포의 속도는 가시화 이미지 처리를 통해서 계산하였다. 기포의 앞쪽 상 경계의 이동 거리와 이미지 획득 시간의 관계를 통해서 기포의 속도를 얻을 수 있었다. Fig. 9는 다른 세장비의 사각

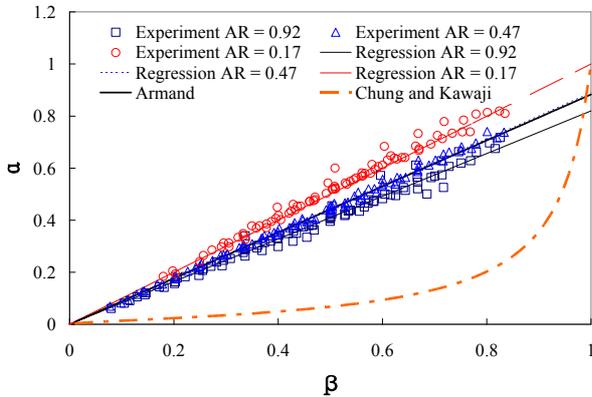


Fig. 10 Void fraction for rectangular microchannel with different aspect ratio

마이크로채널 내의 기포의 속도를 나타낸다. 수력 직경이 감소함에 따라 C_1 값이 감소함을 알 수 있다. 본 결과는 Fukano 와 Kariyasaki 의 결과와 반대의 결과를 나타내고 있다. 그러나, C_1 의 의미가 기포와 채널의 면적비라고 생각할 때, 본 결과는 Fig. 7 에 나타난 결과와 일치하는 경향을 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 채널의 세장비가 감소함에 따라 마이크로채널의 수력 직경도 같이 감소한다. 그러므로, 지배적인 인자가 세장비인지 수력직경인지 확인할 수 없는 결과라 할 수 있다. 그러나, 유사한 물리적 힘이 작용하는 채널의 크기 내에서 기포와 채널의 면적비는 사이즈에 독립적인 변수라 할 수 있으므로, 본 결과는 세장비에 의한 결과라 할 수 있다.

3.4 기공률

마이크로채널 내에서의 2 상 유동의 기공률(α)에 대한 상관식은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. Armand⁽¹²⁾에 의해 제시된 부피적 건도(β)에 선형적인 관계를 가지는 상관식과 Chung 과 Kawaji⁽¹³⁾에 의해 제시된 부피적 건도에 비선형적인 관계를 가지는 상관식이 그것이다. 각각의 상관식은 각각 식 (6), 식 (7)과 같이 정의 된다.

$$\alpha = C_A \beta, \quad C_A = 0.883 \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{0.03\beta^{0.5}}{1 - 0.97\beta^{0.5}} \quad (7)$$

본 연구에서는 기포류에서의 기공률을 2 상 유동의 기본 관계식(식 (8))을 이용하여 구하였다.⁽¹⁰⁾

$$\alpha = \frac{j_G}{u_B} \quad (8)$$

Fig. 10 은 기공률과 부피적 건도의 관계를 나타낸다. Armand 상관식과 같이 부피적 건도에 선형적인 관계를 나타낼 수 있다. 또한, 세장비가 감소함에 따라 기공률이 증가함을 알 수 있다. 이는 가시화 결과와 같이 기포가 차지하는 면적이 증가하기 때문으로 판단된다. 다시 말해서, 세장비가 감소함에 따라 C_A 값이 0.82, 0.89, 1.0로 증가함을 나타냈고, 이는 2 상 유동이 균질유동에 가까워짐을 나타낸다.

3.4 기포에 의한 압력강하

단위 셀 모델에 기초하여, 기포류가 만드는 압력강하는 크게 액막을 포함한 기포 영역과 기포의 코와 꼬리 영역, 그리고 액상 슬러그 영역으로 구분할 수 있다.⁽¹⁴⁾ 그러나 기포영역에서의 압력강하는 낮은 밀도에 의해 무시할 만하다.^(8,9) 그러므로, 본 연구에서는 기포류가 만드는 압력 강하를 크게 두 개의 영역으로 구분하였다. 하나는 액상 슬러그에 의한 압력강하 나머지는 기포의 코와 꼬리에서의 압력강하가 그것이다. 그러므로 측정된 압력강하는 식 (9)와 같이 정의할 수 있다.

$$\Delta p_{EXP} = N_{UC,p} (\Delta p_S + \Delta p_B) \quad (9)$$

여기서, $N_{UC,p}$ 는 압력 측정 구간에서의 단위 셀의 개수이다. 하나의 단위 셀에서 만드는 압력 강하는 단위 셀의 개수에 의해 증폭 될 것이다. 단위 셀의 개수는 단위 셀의 길이와 전체 압력 포트의 길이로부터 계산하였다. 액상 슬러그 영역은 단상의 영역으로 볼 수 있으므로, 식 (10)와 같은 단상 단상 압력강하의 이론식을 적용할 수 있다. 그러나, 기포류에서 액체 슬러그의 유동에는 양끝단에 회전 유동(circulation)이 존재하게 되고, 이에 따라 단상 압력강하 식을 만족하는 액체 슬러그의 길이가 상대적으로 작아지게 된다. 이 길이를 본 논문에서는 $L_{S,eff}$ 로 정의하였다. 이 영역의 길이는 기포의 코와 꼬리 부분에서의 압력 강하가 영향을 미치는 영역과도 깊은 관련이 있다. 몇몇 연구자들은 상사의 원리를 적용하여 기포가 액체 슬러그에 영향을 미치는 영역의 길이는 튜브의 직경과 같은 차수를 가짐을 밝혔다.^(15,16) 그러므로, $L_{S,eff}$ 를 본 연구에서는 가시화로부터 얻은 액체 슬러그의 길이에서 사각 마이크로채널의 수력 직경을 뺀 값으로 정의하였다.

$$\Delta P_S = \frac{2f\rho_L j^2}{D_h} \cdot L_{S,eff} \quad (10)$$

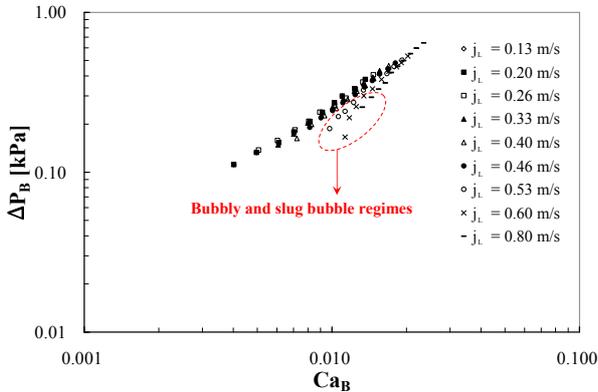


Fig. 11 Pressure drop of a single bubble in rectangular microchannel with $D_h = 322 \mu\text{m}$

최종 하나의 기포가 만드는 압력 강하는 식 (9), 식 (10)으로부터 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$\Delta P_B = \frac{\Delta P_{EXP}}{N_{UC}} - \Delta P_S \quad (11)$$

Bretherton 은 기포가 만드는 압력 강하가 기포의 속도에 기초한 Capillary number (Ca_B)에 대해 상관관계가 있음을 수치해석을 통해 확인하였고, 지수가 2/3 승을 나타내었다.⁽¹⁷⁾ 또한 Wong 등⁽⁷⁾은 Bretherton 의 상관식이 다른 세장비의 사각 채널에서도 적용이 가능하며, 압력강하 계수가 세장비의 감소에 따라 증가함을 나타내었다. 즉, 본 연구에서 관심을 가지고 있는 기포의 압력강하는 기포의 형상과 기포를 감싸고 있는 액막의 두께에 의해 결정된다고 볼 수 있다. 선행연구에서 알 수 있듯이, 액막의 두께는 Ca_B 의 함수로 결정될 수 있고,⁽¹⁷⁾ 그러므로, 액체상의 점도, 표면장력, 그리고 기포의 속도가 주요한 인자로 작용할 수 있다. Fig. 11 은 단일 기포에서의 압력강하를 Ca_B 에 대해서 나타낸 결과이다. 전체적으로 Ca_B 가 증가함에 따라 즉, 기포의 속도가 증가함에 따라 높은 압력강하를 나타내었으며, 로그 선형의 관계를 나타내었다. 그러나 높은 j_L 의 낮은 Ca_B 영역에서는 상대적으로 낮은 값을 나타내어 로그선형 관계에서 벗어나는 것을 확인할 수 있었다. 그리고, 이 영역은 모두 기포류나 슬러그 기포류에 해당하는 값을 확인하였다. 이 결과로부터, 기포의 압력강하에 액막의 두께가 중요한 영향을 미침을 알 수 있었다. 다시 말해서, 기포 유동들에서는 액막이 두꺼운 경우 상대적은 낮은 유동 저항을 가지게 된다. 그리고 기포의 길이가 길어져 늘어난 기포(elongated bubble)를 이루는 경우 기포의 두께 변화의 영향은 무시할 만 함을 말한다.

Table 3 Coefficients in Eq. (12)

$D_h [\mu\text{m}]$	AR	M	m
490	0.92	31.68	1.151
322	0.47	28.09	1.014
143	0.16	30.86	0.88

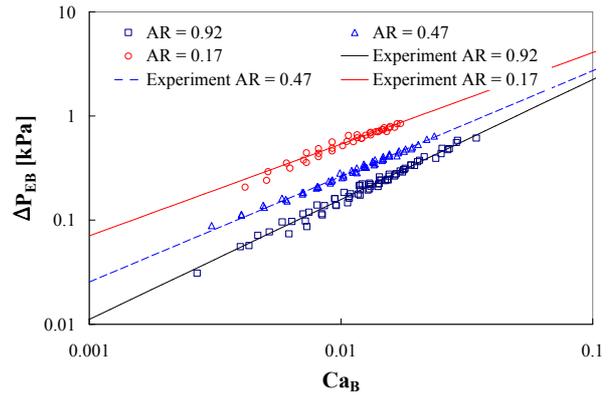


Fig. 12 Pressure drop of single elongated bubble in rectangular microchannel with different aspect ratios

본 연구에서는 기포(bubbly)류와 슬러그 기포(slug bubble)류 영역의 값을 제외한 늘어난 기포(elongated bubble)류에 대한 하나의 기포가 가지는 압력 강하만을 추출하였다. Fig. 12 는 다른 세장비에 대한 기포 하나에서의 압력강하를 나타낸다. 다른 세장비에 따라 다른 기울기의 결과를 나타내었다. 다음 식은 실험 결과의 상관식을 나타내고, Table 3 은 각 계수를 나타낸다.

$$\Delta P_{EB} = M \left(\frac{\mu_L u_B}{\sigma} \right)^m \quad (12)$$

세장비가 감소함에 따라 압력 강하가 증가하는 결과를 나타내었고, 이는 Wong 등의 결과와 같은 결과이다. 그러나, 그들의 결과와 달리, 세장비가 작아짐에 따라 지수 값도 작아지는 결과를 나타내었다. 앞서 언급하였듯이, 본 연구에서는 마이크로채널이 세장비와 함께 수력 직경도 변하는 결과이다. Choi 등⁽¹⁸⁾의 수력직경이 490 μm 에 AR 가 0.67 인 사각 마이크로채널에서 실험 결과로부터 지수 m 이 1.07 의 값을 얻을 수 있었다. 이로부터 지배적인 변수는 수력 직경이 아닌 세장비임을 유추할 수 있었다. 그러나, 보다 정확한 상관식의 개발을 위해서는 수력 직경과 세장비가 독립적인 실험 결과가 필요할 것으로 사료된다.

4. 결론

마이크로채널내의 기포 유동에 대한 연구를 위해서, 감광 유리로 제작된 사각 마이크로채널을 다른 세장비로 제작하였다. 액체 물과 질소 기체를 사용하여 단열 상태에서의 사각 마이크로채널 내의 2 상 유동의 실험을 수행하였고, 가시화 정보와 압력강하 정보를 획득하였다. 단위 셀 모델에 기초하여, 기포유동에 특성을 분석하였다. 본 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다

(1) 가시화 결과로부터, 사각 마이크로채널 내의 기포의 2 상 유동패턴으로 기포류, 슬러그 기포류, 늘어진 기포류를 관찰할 수 있었다. 사각 채널내의 모서리의 액체의 양은 세장비가 감소함에 따라 감소함을 알 수 있었다.

(2) 기포의 속도는 기존 상관식과 유사하게 전체 길보기 속도에 비례함을 알 수 있었다. 그리고, 그 계수는 세장비가 감소함에 따라 감소함을 알 수 있었고, 이는 사각 마이크로채널 내의 기포의 면적이 증가하기 때문이다.

(3) 기공률은 Armand 의 상관식과 같이 부피적 건도에 선형적인 관계를 나타내었다. 상관 계수는 세장비가 감소함에 따라 증가함을 알 수 있었고, 역시 기포의 면적이 증가함에 그 이유가 있다고 하겠다. 이로써 세장비가 증가함에 따라 2 상유동 패턴은 균질유동 패턴과 가까워짐을 알 수 있었다.

(3) 단위 셀 모델에 기초하여, 기포만의 압력 강하를 계산하였고, 기포의 압력에 액막의 두께가 중요한 인자로 작용함을 알 수 있었다. 액막의 두께의 변화가 적은 늘어진 기포류에서의 압력은 기포의 속도에 기초한 미세관 수(Ca_B)에 로그-비례하는 결과를 나타내었다. 그리고 세장비가 감소함에 따라 압력은 증가하였고, 그 지수 값은 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나, 보다 정확한 상관식의 개발을 위해서는 수력 직경과 세장비에 각각 독립적인 실험 결과가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

(1) Thome, J. R., 2004, "Boiling in Microchannels: A Review of Experiment and Theory," *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 25, pp. 128~139.
 (2) Cheng, P., Wu, H. Y. and Hong, F. J., 2007, "Phase-Change Heat Transfer in Microsystems," *J. Heat Transfer*, Vol. 129, pp. 101~107.
 (3) Kandlikar S. G. and Grande W. J., 2003, "Evolution of Microchannel Flow Passages – Thermo-Hydraulic Performance and Fabrication Technology," *Heat*

Transfer Engineering, Vol. 24, pp. 3~17.
 (4) Choi, C. W. and Kim, M. H., 2008, "The Fabrication of a Single Glass Microchannel to Study the Hydrophobicity Effect on Two-Phase Flow Boiling of Water," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 18, 105016.
 (5) Curley, T., Forsyth, R., Sun, S., Fliszar, K., Colletto, M. and Martin, G. P., 2004, "Measurement of Dissolved Oxygen as a Determination of Media Equilibrium During Dissolution Testing," *Dissolution Technologies*, Vol. 10, pp. 6~13.
 (6) Shih, F. S., 1967, "Laminar Flow in Axisymmetric Conduits by a Rational Approach," *Can. J. Chem. Eng.*, Vol. 45, pp. 285~294.
 (7) Wong, H., Radke, C. J. and Morris, S., 1995, "The Motion of Long Bubbles in Polygonal Capillaries: Part2. Drag, Fluid Pressure and Fluid Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 292, pp. 95~110.
 (8) Garimella, S., Killion, J. D. and Coleman, J. W., 2002, "An Experimentally Validated Model for Two-Phase Pressure Drop in the Intermittent Flow Regime for Circular Microchannels," *J. Fluid Engineering*, Vol. 124, pp. 205~214.
 (9) Garimella, S., Killion, J. D. and Coleman, J. W., 2003, "An Experimentally Validated Model for Two-Phase Pressure Drop in the Intermittent Flow Regime for Noncircular Microchannels," *J. Fluid Engineering*, Vol. 125, pp. 887~894.
 (10) Carey, V. P., 1992, *Liquid-Vapor Phase Change Phenomena*, Taylor & Francis.
 (11) Fukano, T. and Kariyasaki, A., 1993, "Characteristics of Gas-Liquid Two-Phase Flow in a Capillary Tube," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 141, pp. 59~68.
 (12) Armand A. A., 1946, "The Resistance During the Movement of the Two-Phase System in Horizontal Pipes," *Izv. Vses. Teplotekh. Inst.*, Vol. 1, pp. 16~23.
 (13) Chung, P. M. -Y. and Kawaji, M., 2004, "The Effect of Channel Diameter on Adiabatic Two-Phase Flow Characteristics in Microchannels," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 30, pp. 735~761.
 (14) Fuerstman, M. J., Lai, A., Thurlow, M. E., Shevkopyas, S. S., Stone, H. A. and Whitesides, G. M., 2007, "The Pressure Drop Along Rectangular Microchannels Containing Bubbles," *Lab Chip*, Vol. 7, pp. 1479~1489.
 (15) He, Q. and Kasagi, N., 2008, "Numerical Investigation on Flow Pattern and Pressure Drop Characteristics of Slug Flow in a Micro Tube," *International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels*, Darmstadt, Germany.
 (16) Thulasidas, T. C., Abraham, M. A. and Cerro, R. L., 1995, "Bubble-Train Flow in Capillaries of Circular and Square Cross Section," *Chemical Engineering Science*, Vol. 50, pp. 183~199.

- (17) Bretherton, F. P., 1961, "The Motion of Long Bubbles in Tubes," *J. Fluid Mech.*, Vol. 10, pp. 166~188.
- (18) Choi, C. W., Yu, D. I. and Kim, M. H., 2009, "Bubble Dynamics and Pressure Drop of an Elongated Single Bubble in a Rectangular Microchannel," *International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels*, Pohang, Korea, ICNMM2009-82104.