

사각 마이크로 채널 내 Taylor Flow의 기포 및 액체 슬러그 유동 특성에 대한 연구

Study on the Characteristics of Bubble and Liquid Slugs for Gas-Liquid Taylor Flow in a Rectangular Micro-channel

이준경(Jun Kyoung Lee)[†], 이관근(Kwan Geun Lee)

경남대학교 기계공학부

Department of Mechanical Engineering, Kyungnam University, Changwon-si, 51767, Korea

(Received November 4, 2014; revision received April 30, 2015; Accepted: August 27, 2015)

Abstract The characteristics of gas-liquid Taylor (Slug) flow in a square micro-channel of $600 \times 600 \mu\text{m}$ were investigated experimentally in this paper. The test fluids were nitrogen and water. The liquid and gas superficial velocities were $0.01 \sim 3 \text{ m/s}$ and $0.1 \sim 3 \text{ m/s}$, respectively. Bubble and liquid slug length, bubble velocity, and frequency were measured by analyzing optical images using a high speed camera. Bubble length decreased with higher liquid flow rate, which increased dramatically with higher gas flow rate. However, slug length did not vary with changes in inlet liquid conditions. Additionally, bubble velocities and frequencies increased with higher liquid and gas flow rates. It was found that measured bubble lengths were in good agreement with the empirical models in the existing literature, but slug lengths were not.

Key words Micro-channel(미세관), Two-phase flow(2상 유동), Taylor flow(Taylor 유동), Bubble(기포), Slug(슬러그)

[†] Corresponding author, E-mail: jkleee99@kyungnam.ac.kr

기호설명

D_h	: 채널 내 수력직경, 4A/P [μm]
L_B	: 기포 길이 [μm]
L_S	: 슬러그 길이 [μm]
L_{UC}	: 단위 셀 길이 [μm]
j_g	: 기체 겉보기 속도 [m/s]
j_l	: 액체 겉보기 속도 [m/s]
U_B	: 기포 속도 [m/s]
f_{UC}	: 생성 주파수 [1/s]

1. 서 론

마이크로 시스템은 MEMS(micro-electro mechanical system)의 제작 기술 발전과 함께 꾸준히 발전을 하였고, 현재는 마이크로 크기의 다양한 적용분야에 기초가 되는 구성 요소로 자리 잡았다. 이에 따라, 마이크로 채널 내의 2상 유동에 대한 연구도 유동패턴, 압력강하, 상변화 열전달 등 다양한 분야에서 진행이 되어 왔다.⁽¹⁾

특히 Lap on a chip 등 마이크로 기기에서 액체시료 자체나 시료 내 물질의 성분 분석에 대해 기체를 이용

하여 액체의 슬러그를 만들어 적은 양의 시료로도 분석이 가능하게끔 만드는 기술이 요구되고 있고, 이에 액체와 기체를 혼합기를 통해 동시에 주입하여 원하는 만큼의 액체 슬러그(기포 크기)를 만들어내는 것이 매우 중요하다. 2상 유동에 있어, 기포와 액체 슬러그로 이루어지는 유동을 슬러그(Slug) 유동 또는 Taylor 유동이라고 정의하고, Fig. 1에 실제 마이크로 크기에서 나타나는 모습을 보여주고 있다. 액체의 슬러그와 채널 크기의 수 배에 해당하는 크기의 기포(elongated bubble)로 이루어지며, 기포와 채널 벽 사이는 두께가 작은 액체 필름으로 뒤덮혀 있다. 기포의 양끝 길이를 L_B (Bubble Length), 액체 슬러그 양끝 길이를 L_S (Slug Length), 기포와 액체 슬러그를 합하여 단위 셀이라 하며 $L_{UC}(= L_B + L_S)$ 로 나타낸다(Fig. 1).

기존의 Taylor 유동과 관련한 많은 연구들이 Taylor 기포의 길이를 측정하고 여러 가지 입구조건에 대해 길이를 예측하는 데에 집중되어 있는데, 유로에서의 압력강하와 물질전달 등을 결정하는데 중요한 인자가 되기 때문이다. 기포 길이에 대한 기존 연구에 대해, 기포가 유로를 대부분 채워서 흐르는 Taylor flow가 주로 발생하는 Ca 수($Ca = \mu V/\sigma$)가 작은 경우에 대해(sq-

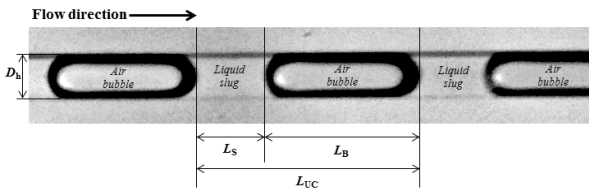


Fig. 1 Schematic plot of unit cell geometry.

ueezing regime), 기포의 길이는 기체와 액체의 속도비와 입구 형상에 대한 영향이 큼을 보고하였다(Garstecki et al.,⁽²⁾ van Steijn et al.,⁽³⁾ Fu et al.,⁽⁴⁾ Chaoqun et al.,⁽⁵⁾ Qian and Lawal⁽⁶⁾). 그에 반해 Ca 수가 큰 경우는 액상에 의한 전단응력과 표면장력이 상대적으로 큰 영역(dripping regime)으로 대부분 유로보다 작은 크기의 기포가 생성되는 것이 특징이다(Fu et al.⁽⁴⁾).

기존의 기포 길이에 대한 연구는 비교적 많이 수행된 것에 비해, 슬러그 길이에 대한 연구는 상대적으로 매우 적은 수준이다. 그러나 액체 슬러그를 이용하는 Micro 기기의 경우는 원하는 크기의 액체 슬러그를 만들어 내는 것이 중요하므로 이에 대한 연구가 중요하다. Phorecki and Kula⁽⁷⁾는 액체와 기체가 변갈아가며 채널의 한 부분을 채워야 Taylor 유동이 형성되는 것에 대해 스위칭 메커니즘(switching mechanism)을 제시하며, 기포 속도에 대한 기체 걸보기 속도의 비를 활용하여 슬러그 길이를 예측할 수 있다는 가능성을 제안하였고, Yun et al.,⁽⁸⁾ Chaoqun et al.⁽⁵⁾은 그와 같은 개념을 기반으로 예측식을 제안하였다.

본 연구에서는 마이크로 Mixer 개발을 위한 기초연구로서 $600\ \mu\text{m}$ 의 수력직경을 가지는 사각 유로를 제

작하고, 작동유체로서 액체는 물을, 기체는 질소를 사용하여 마이크로 채널에서의 기-액 슬러그 유동(Taylor flow)에 대한 기포 및 액체 슬러그 유동특성을 살펴보았다. 특히 다양한 조건에 대한 액체 슬러그 길이의 변화와 유동 가시화를 통한 유동 특성 파악을 수행하였다. 또한 기포 길이 및 액체 슬러그 길이와 기포속도를 예측할 수 있는 기존 모델을 정리하여, 그것을 실험결과와 비교하고 모델 적용성을 검토하고 향후 개발에 활용하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

T자형 혼합기에 대한 기포생성을 살펴보기 위하여 Fig. 2와 같은 실험 장치를 구성하였다. 실험부에 대해 유동가시화를 위해서 PMMA로 제작하였으며, 유로는 $600\ \mu\text{m} \times 600\ \mu\text{m}$ 크기의 사각 형태이며, Mixer의 형태는 가장 일반적으로 사용하는 T type으로 설정하였다(Fig. 3). 작동유체로서 액체는 이온이 없는 용존기체가 제거된 물(degassed water)을, 기체는 질소를 사용하였다. 질소는 정압기(Pressure Regulator)와 질량 유량계(Mass Flow Controller, Aalborg)를 거쳐 혼합부(Mixer)로 유입되고, 액체는 가압이 된 저장탱크로부터 유량계(Flow meter, Dwyer)를 거쳐 혼합부로 각각 유입된다. 혼합된 2상 유체는 마이크로 채널을 흐르게 되며, 유동가시화는 고속카메라(MotionPro Y3, IDT Co.)와 스트로보를 활용한 디지털 카메라를 활용하여 유동가시화를 수행하였다. 고속카메라를 이용하여 10,000 frame/s의 속도로 1초간 Image 데이터를 획득하였고, 각 기포 및 액체 슬러그 길이, 속도, 주기를 Image Processing을 통하

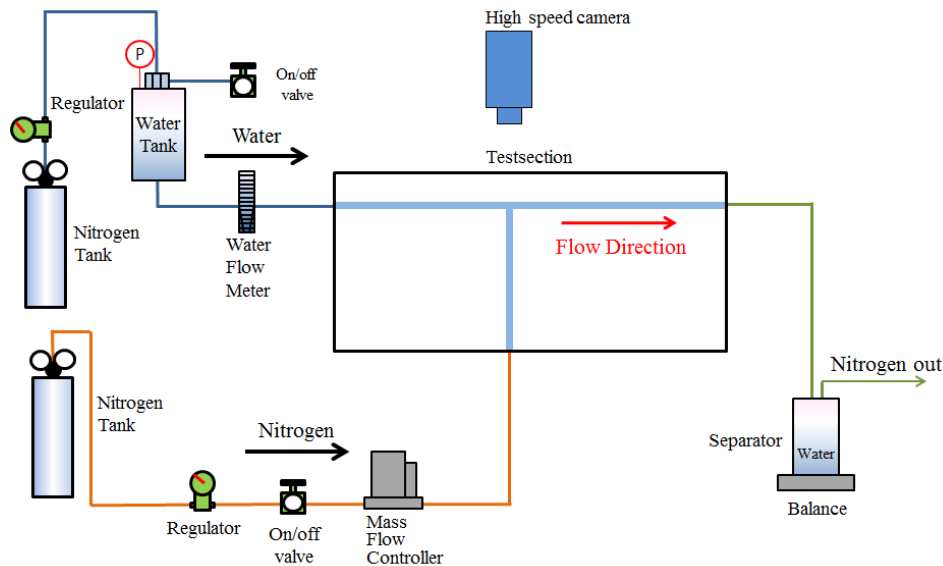


Fig. 2 Experimental setup.

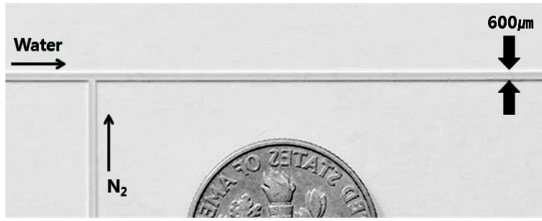


Fig. 3 Photographs of T-type test section.

여 평균 값을 측정하였다. 기포의 길이와 액체 슬러그 길이에 대한 불확실성은 각각 $\pm 5\%$, $\pm 7\%$ 의 오차를 가지며, 생성주파수는 $\pm 0.5\%$ 이내로 측정이 되었다. 마이크로 채널을 나온 2상 유체는 하류에 설치된 기/액 분리기(separator)로 유입된다. 액체유량은 전자저울(balance)을 사용하여 일정시간 동안 질량을 측정함으로써 획득할 수 있었다. 액체와 기체의 겉보기 속도(superficial velocity) $0.01 \sim 10 \text{ m/s}(j_l)$ 및 $0.1 \sim 100 \text{ m/s}(j_g)$ 의 영역에서 실험을 수행하였으며 Taylor flow(Slug flow)가 형성 되는 영역에서의 데이터만 얻었다⁽¹⁰⁾(Fig. 4). 기체와 액체 겉보기 속도 불확실성의 경우, 각각 $\pm 5\%$, $\pm 4\%$ 의 오차 범위를 가진다.

3. 실험 결과

3.1 기포 길이

본 연구의 실험을 통해 얻어진 기포의 길이를 입구의 겉보기 속도(j_g, j_l)의 변화에 대해 그래프로 나타내었다(Fig. 5).

일정한 기체 유량에 대해 액체 유량이 증가 할수록 기포의 길이는 줄어드는 것을 볼 수 있고, 액체 유량이 일정하면 기체 유량이 증가 할수록 기포의 길이가 증가함을 알 수 있다. 이에 대한 원인은 슬러그 길이에 대한 특성 분석과 함께 제 3.2절에 자세히 서술하였다.

3.2 슬러그 길이

여러 입구 조건에 대한 액체 슬러그 길이를 Fig. 6에 나타내었다. 기체 유량을 증가시키면 슬러그 길이가 줄어드는 반면, 액체 유량에 대해서는 크게 영향이 없음을 확인할 수 있었다. 따라서 기포의 길이는 기체 및 액체 입구 조건에 대해 영향이 큰 반면, 슬러그의 길이의 경우는 에 기체 입구 조건에 대한 영향이 크다고 정리할 수 있다.

입구조건 변화가 기포와 액체 슬러그의 크기변화에 미치는 영향을 보다 자세히 살펴보기 위해 가시화를 수행하였고, Fig. 7과 Fig. 8에 각각 나타내었다. Fig. 7(a)는 입구 기체 유량이 일정할 때 입구 액체 유량이

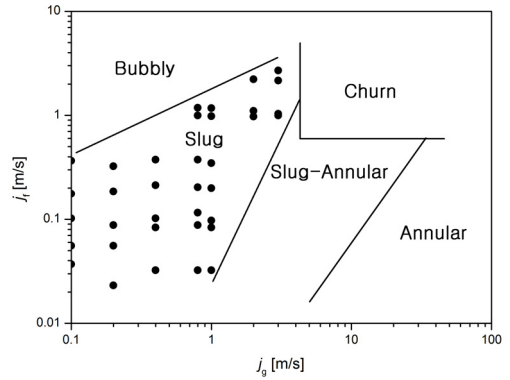


Fig. 4 Inlet conditions with flow pattern map.⁽¹⁰⁾

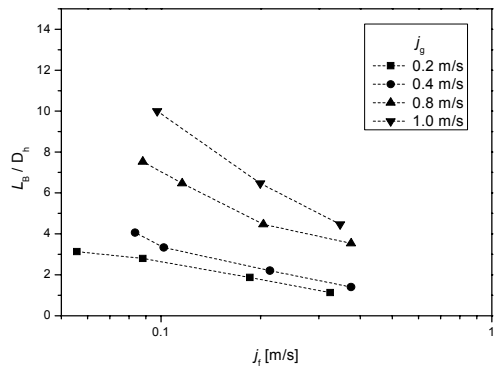


Fig. 5 Effect of gas and liquid superficial velocity on bubble length.

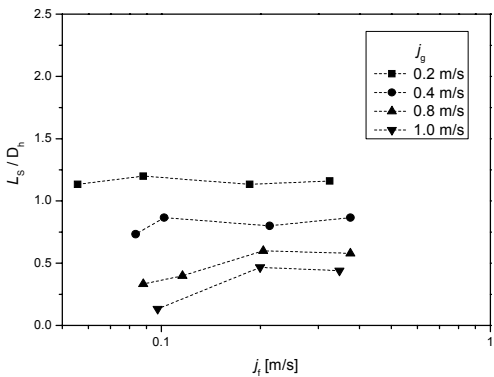


Fig. 6 Effect of gas and liquid superficial velocity on slug length.

증가하는 경우를 나타내었고, 전술한 바와 같이 액체 유량이 증가 할수록 기포의 길이가 줄어들음을 확인할 수 있다. Fig. 7(b)는 입구 액체 유량이 유사할 때, 기체 유량이 증가하는 경우를 나타내었고, 기체 유량이 증가할수록 기포의 길이도 확연히 증가하는 것을 알 수 있다. 반면 액체 슬러그의 경우, 기포 길이 변화에 비

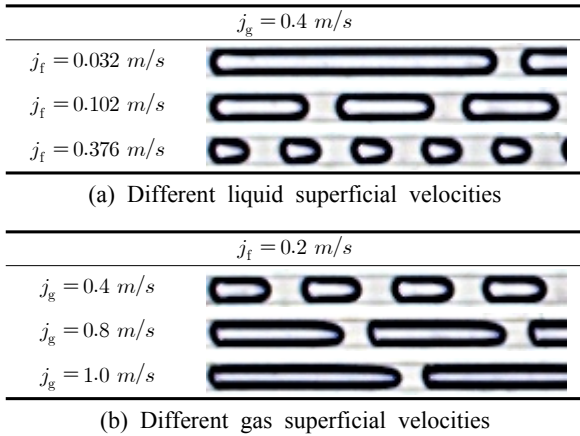


Fig. 7 Images of Taylor flow for different gas/liquid superficial velocities.

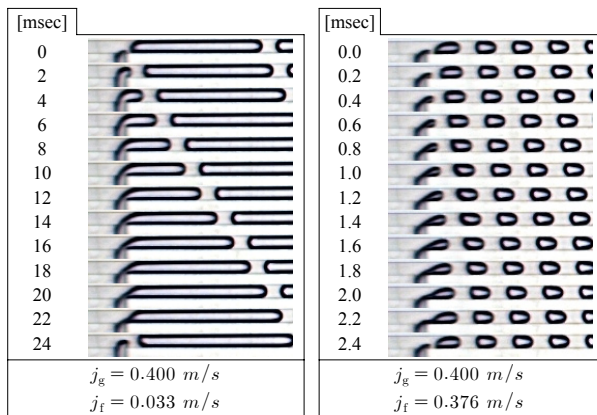


Fig. 8 Successive images of bubble generation for different liquid superficial velocities.

해 그 길이가 거의 차이가 나지 않음을 확인할 수 있다. 이러한 현상에 대한 이해를 위해 기포가 생성되는 모습을 가시화하였고, 입구 기체유량이 일정한 경우 액체 유량이 작은 경우와 큰 경우에 대해 시간의 흐름에 따라 Fig. 8에 나타내었다. 기포가 생성이 될 때 기상과 액상에 대해 작용하는 힘은 표면장력, 전단응력, 두 상간의 압력차와 관성력의 관계에 의해 기포와 액체 슬러그 크기가 결정이 된다.⁽²⁻⁴⁾ 특히 기포의 크기가 비교적 큰 Taylor flow에 대해서는 관성력이 작고, 액상의 압력이 기상을 밀어내면서 기포를 생성시키게 된다.^(3, 4) 입구 액체 유량이 작은 경우 액상의 압력이 기상을 원활하게 밀어내지 못해 기포의 길이가 길어지는 반면, 액체 유량이 큰 경우 액상의 압력이 충분히 커서 기상을 잘 밀어내게 되고 따라서 기포의 생성이 활발하게 된다. 많은 기포 생성에 의해 액체슬러그도 쉽게 나누어지게 되어, 액체슬러그 길이가 입구 액체

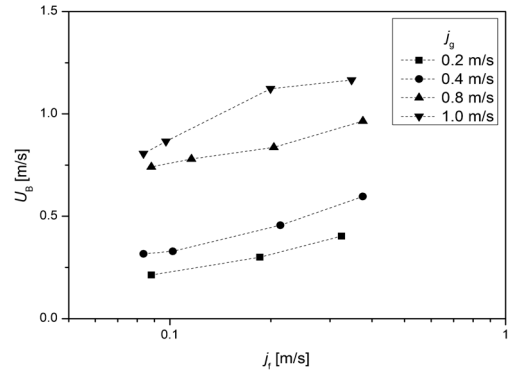


Fig. 9 Effect of gas and liquid superficial velocity on bubble velocity.

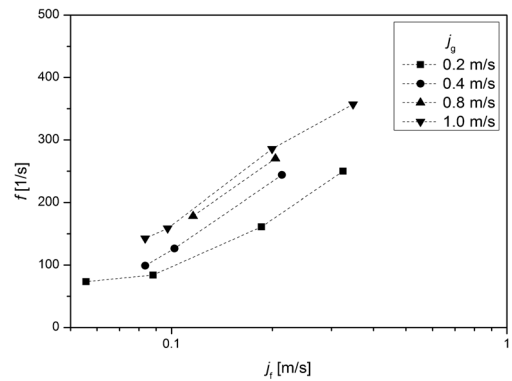


Fig. 10 Effect of gas and liquid superficial velocity on bubble generation frequency.

유량에 크게 영향을 받지 않게 됨을 알 수 있다.

3.3 기포 속도

실험을 통해 측정된 기포(액체 슬러그)의 속도를 액체의 겉보기 속도에 대해 Fig. 9에 나타내었다. 일정한 기체 유량에 대해 액체 유량이 증가할수록 기포 속도가 증가하며, 또한 액체 유량이 일정하고 기체 유량이 증가할수록 기포 속도가 증가함을 알 수 있다. 따라서 기포 속도는 액체 또는 기체의 유량이 증가할수록 모두 증가하는 것을 알 수 있다.

3.4 기포 생성 주파수

실험을 통해 측정된 기포의 생성 주파수를 액체의 겉보기 속도에 대해 Fig. 10에 나타내었다. 일정한 기체 유량에 대해 액체의 유량이 커지면, 기체의 가로막음이 적어짐에 의해 기포의 길이가 커지지 못하여 분리가 쉽게 되고, 그에 의해 기포의 개수가 늘어나면서 기

포 생성 주파수가 증가하게 된다(Fig. 8 참조). 그와 더불어 액체의 속도 증가에 의한 기포 속도 증가에 의해 생성 주파수가 더욱 커짐을 확인할 수 있다.

반면에 기체의 유량이 커지면 기포 속도가 증가함으로 주파수가 증가하지만, 기체의 가로막음 또한 활발하게 되어 기포의 길이가 증가하게 되어 기체 유량 증가에 대한 기포 생성 주파수 증가는 액체 유량의 영향보다는 작게 나타나게 됨을 알 수 있다.

4. 기존 모델 적용

4.1 기포 길이 모델 적용 결과

기포 길이에 대한 기존 연구에 대해, Garstecki et al.⁽²⁾은 T자형 혼합부에 대해 기체가 액체를 가로막으면서 액체에 의한 기체의 압착(squeezing)이 발생하고, 액체

의 속도로 기체 덩어리(thread)를 붕괴(collapse)시켜 기포를 만들어내는 원리를 기반으로 다음과 같이 간단한 형태의 식을 제안하였다.

$$\frac{L_B}{D_h} = \alpha_1 + \alpha_2 \frac{j_g}{j_f} \quad (\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 1) \quad (1)$$

식(1)과 유사하지만, Van Steijn et al.⁽³⁾은 마이크로 PIV를 통해 기포의 생성을 연구하여 기체의 걸보기 속도가 비교적 적은 영역에서는 식(1)의 계수(α_1, α_2)들이 커짐을 보고하였고 수정식을 제안하였다(Table 1의 식(3)). Fu et al.⁽⁴⁾은 높이가 40 μm 이고 너비가 120 μm 인 채널에 대해, 종횡비를 고려해 계수를 조정($\alpha_2 = h/w = 40/120 = 0.33$)한 식을 제안하였다(식(4)). Chaoqun et al.⁽⁵⁾은 기포의 관성을 고려하여 We 수 ($We = \mu V^2 D/\sigma$)를 도입하고, 기체와 액체의 속도비를 이용하여 경험식을

Table 1 Previous correlations on the bubble length in Taylor flow through T-type micro-channels

Authors	Microchannel Shape	Hydraulic Diameter (μm)	Operating conditions	Correlation	Eq.
Garstecki et al. ⁽²⁾	Rectangular	$w : 50, 100, 200$ $h : 33$	$j_g/j_f = 0.5 \sim 3$ $Ca < 0.01$	$\frac{L_B}{D_h} = 1 + \alpha \frac{j_g}{j_f} \quad (\alpha \approx 1)$	(2)
Van Steijn et al. ⁽³⁾	Square	$w(h) : 800$	$j_g/j_f = 0.6 \sim 5$	$\frac{L_B}{D_h} = 1.5 + 1.5 \frac{j_g}{j_f}$	(3)
Fu et al. ⁽⁴⁾	Rectangular	$w : 120$ $h : 80$	$Ca : 10^{-4} \sim 5.8 \times 10^{-3}$	$\frac{L_B}{D_h} = 0.64 + 0.33 \frac{j_g}{j_f}$	(4)
Chaoqun et al. ⁽⁵⁾	Rectangular	$w : 750$ $h : 280$	$j_g = 0.02 \sim 0.95 \text{ m/s}$ $j_f = 0.04 \sim 0.57 \text{ m/s}$	$\frac{L_B}{W} = (1 + 1.37 We^{-0.349}) j_g/j_f$	(5)
Qian and Lawal ⁽⁶⁾	Rectangular	$D_h = 250 \sim 3,000$	$j_g = 0.01 \sim 0.25 \text{ m/s}$ $j_f = 0.01 \sim 0.25 \text{ m/s}$	$\frac{L_B}{D_h} = 1.637 \varepsilon_g^{0.107} (1 - \varepsilon_g)^{-1.05} Re^{-0.075} Ca^{-0.0678}$	(6)

Table 2 Previous correlations on the liquid slug length in Taylor flow through T-type micro-channels

Authors	Microchannel Shape	Hydraulic Diameter(μm)	Correlation	Eq.
Yun et al. ⁽⁸⁾	Rectangular	$w : 630$ $h : 200$	$\frac{L_S}{D_h} = 1.06(\varepsilon_g)^{-1.28} \quad (\varepsilon_g = \frac{j_g}{j_f + j_g})$	(7)
Chaoqun et al. ⁽⁵⁾	Rectangular	$w : 750$ $h : 280$	$\frac{L_S}{D_h} = 1.157(\varepsilon_g)^{-0.365} (1 - \varepsilon_g)^{-0.373} (We)^{-0.208}$	(8)

Table 3 Previous correlations on the bubble velocity in Taylor flow through T-type micro-channels

Authors	Microchannel Shape	Hydraulic Diameter(μm)	Correlation	Eq.
Chaoqun et al. ⁽⁵⁾	Rectangular	$w : 750$ $h : 280$	$U_B = 1.12(j_g + j_f)$	(9)
Yue et al. ⁽⁹⁾	Rectangular	$D_h = 200 \text{ or } 400$	$U_B = (j_g + j_f) \text{ for } 400 \mu\text{m}$ $U_B = 1.2(j_g + j_f) \text{ for } 200 \mu\text{m}$	(10)

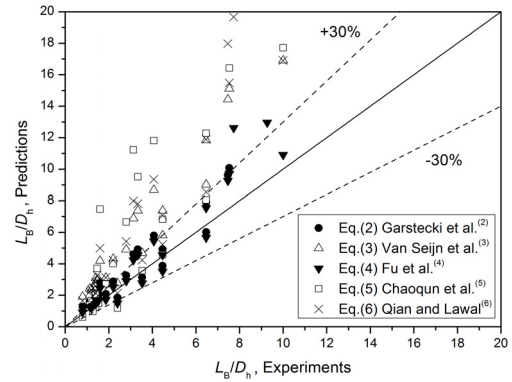
제안하였고(식(5)), Qian and Lawal⁽⁶⁾은 전산유체역학(CFD)을 활용하여 마이크로 채널에서의 Taylor flow에 대한 연구를 수행하였고, Ca 수($Ca = \mu V/\sigma$)와 Re 수 등을 고려하여 기포 크기를 예측하는 경험식을 제안하였다(식(6)).

본 실험의 기포 길이 결과에 대해 기존 예측 모델(식(2)~식(6))을 적용하여 Fig. 11(a)에 그 결과를 나타내었다. 가로축은 기포 길이에서 수력직경을 나눈 실험값이고, 세로축은 예측 값을 나타내었다. 3가지 모델 중 Garstecki et al.⁽²⁾이 제안한 모델이 $\pm 30\%$ 의 예측 범위에서 가장 우수한 예측결과를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. Fu et al.⁽⁴⁾의 식도 α_2 를 1로 두고($\alpha_2 = 600/600$) 대입하여 결과가 유사함을 알 수 있다. Van Steijn et al.⁽³⁾의 식도 기포의 길이가 비교적 적은 영역에서는 예측오차가 적으나, 큰 영역에서는 오차가 많이 커짐을 확인할 수 있다. 그 이외의 2개식들은 모두 회귀분석을 통한 경험식으로 기포 생성의 메커니즘을 바탕으로 유도한 Garstecki et al.⁽²⁾의 식에 비해 예측 오차가 커짐을 확인할 수 있다.

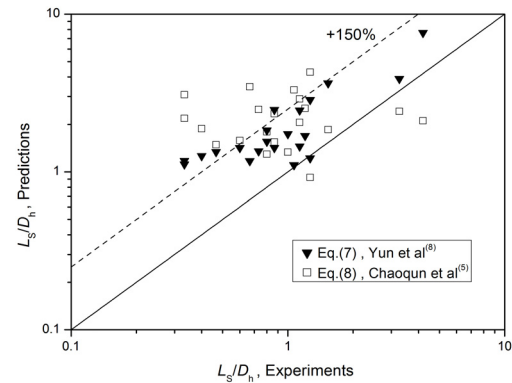
4.2 액체 슬러그 길이 모델 적용 결과

액체 슬러그 길이는 기체의 Re 수와 Ca 수 등으로 식을 만들 수 있지만, Phorecki and Kula⁽⁷⁾는 Taylor 유동에 대해 액체와 기체가 번갈아가며 채널의 한 부분을 채워야 만들어지는 것에 대해 스위칭 메커니즘(switching mechanism)을 제시하며, 기포 길이는 액체속도에 반비례하고, 액체 슬러그 길이는 기체속도에 반비례함을 개념적으로 제안하였다. Yun et al.⁽⁸⁾은 그러한 개념을 기반으로 기체 holdup($\epsilon_g = j_g / (j_f + j_g)$, 기포 속도에 대한 기체 겹보기 속도의 비)을 이용하여 Table 2의 식(7)와 같이 비교적 간단하게 표현된 슬러그 길이 예측식을 만들어 비교적 예측이 잘됨을 확인하였다. Chaoqun et al.⁽⁵⁾도 그와 유사하지만 We 수를 추가하여 슬러그 길이를 예측할 수 있는 식을 제안하였다(식(8)).

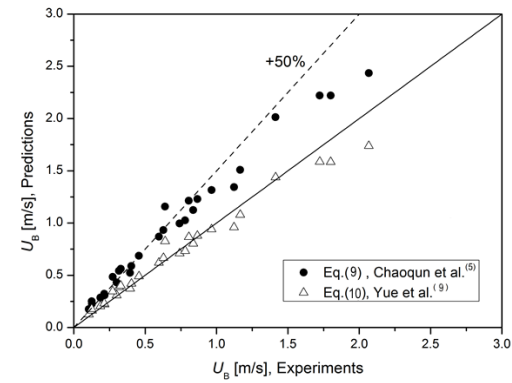
본 실험의 액체 슬러그 길이 결과에 대해 기존 예측 모델을 적용하여 Fig. 11(b)에 그 결과를 나타내었다. 가로축은 액체 슬러그 길이에서 수력직경을 나눈 실험값이고, 세로축은 예측 값을 나타내었다. 2가지 모델의 예측 오차가 모두 큼을 확인할 수 있으며, Yun et al.⁽⁸⁾의 예측 결과가 조금 나음을 확인할 수 있다. 이는 실험에서 살펴보았듯이 액체 슬러그 길이는 기체의 속도에 비해 액체 속도에 크게 영향을 받지 않음(Fig. 6)과 관계가 있으며, 기체 holdup(ϵ_g)을 이용하면 액체의 유량이 예측에 크게 영향을 미치게 되어 오차가 커지는 것으로 사료된다. 향후에 이를 고려한 액체 슬러그 길이의 예측식에 대한 개선이 이루어져야 한다.



(a) Bubble length



(b) Slug length



(c) Bubble Velocity

Fig. 11 Comparisons between experimental results and previous correlations.

4.3 기포 속도 모델 적용 결과

기포속도를 예측하는 식은 다음의 Zuber and Findlay⁽¹¹⁾가 제안한 드리프트 플러스 모델이 가장 많이 사용된다.

$$U_B = C_o(j_g + j_f) \quad (11)$$

Chaoqun et al.⁽⁵⁾과 Yue et al.⁽⁹⁾의 경우도 사각 채널에 대해 기체의 속도를 예측할 수 있는 식을 제안하였다 (식(9), 식(10)). 기포 속도에 대해 식(9)와 식(10)을 본 실험결과와 비교하여 Fig. 11(c)에 나타내었다. Chaoqun et al.⁽⁵⁾의 경우는 속도가 높게 예측이 되었고, Yue et al.⁽⁹⁾의 경우는 수력직경이 600 μm 인 경우에 대해 식(11)의 C_0 의 값을 0.8로 두고 적용하여 비교적 잘 예측이 됨을 확인하였다. Chaoqun et al.⁽⁵⁾의 경우 수력직경이 약 400 μm 로 본 연구에서 사용한 유로보다 작으며, 유로의 직경이 감소함(Yue et al.⁽⁹⁾과 Fukano and Kariyasaki⁽¹²⁾)에 따라 C_0 의 값이 증가하는 경향에 의해 예측의 오차가 발생한 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 600 μm 크기의 수력직경을 가지는 사각 마이크로 채널에서의 Taylor flow에 대해 기포 및 액체 슬러그의 유동 특성을 실험적으로 파악하였고, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 기포 길이에 대해, 액체 유량이 증가 할수록 기포 길이는 감소하는 반면에, 기체 유량이 증가 할수록 기포 길이가 증가함을 알 수 있었다.
- (2) 슬러그 길이에 대해, 기체 유량이 증가하면 슬러그 길이가 줄어드는 반면, 액체 유량에 대해서는 크게 영향이 없음을 확인할 수 있었다. 즉, 기포의 길이는 액체 및 기체의 모든 조건에 대해 영향이 큰 반면, 슬러그 길이는 기체 유량에 대한 영향만 크다고 정리할 수 있다.
- (3) 기포 속도에 대해, 액체와 기체의 유량이 증가할수록 속도가 증가함을 알 수 있었다.
- (4) 기포 생성 주파수에 대해, 액체와 기체의 유량이 증가할수록 생성 주파수도 커짐을 확인할 수 있었다. 또한 액체 속도의 증가에 대한 주파수 증가가 매우 큼을 알 수 있었다.
- (5) 기포 길이 예측에 대해 기존의 예측 모델을 적용하였을 경우, Garstecki et al.⁽²⁾의 모델 예측 결과가 가장 우수하였다. 그러나 액체 슬러그 길이 예측 모델의 적용결과, 예측 결과가 좋지 않아 추후 모델에 대한 개선이 필요하다. 기포 속도의 경우 Yue et al.⁽⁹⁾의 모델 예측 결과가 가장 우수하였다. 향후 연구에서는 슬러그 길이 예측 모델에 대한 개선을 포함하여, 생성 주파수를 예측할 수 있는 모델을 개발하여 Taylor flow 2상 유동 특성을 모두 나타낼 수 있는 각각의 예측 식을 제안할 계획이다.

후 기

본 연구는 지식경제부 우수제조기술연구 센터(ATC) 사업으로 수행된 연구결과이며, 이에 감사드립니다.

References

1. Shui, L., Eijkel, J., and Berg, A., 2007, Multiphase flow in micro- and nanochannels, *Sensors and Actuators B*, Vol. 121, pp. 263-276.
2. Garstecki, P., Fuerstman, M. J., Stone, H. A., and Whitesides, G. M., 2006, Formation of droplets and bubbles in a microfluidic T-junction-scaling and mechanism of break-up, *Lab Chip*, Vol. 6, pp. 437-446.
3. Steijn, V., Kreutzer, M. T., and Kleijn, C. R., 2007, Mu-PIV study of the formation of segmented flow in microfluidic T-junctions, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 62, pp. 7505-7514.
4. Fu, T., Ma, Y., Funfschilling, D., Zhu, C., and Li, H. Z., 2010, Squeezing-to-dripping transition for bubble formation in a microfluidic T-junction, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 65, pp. 3739-3748.
5. Chaoqun, Y., Yuchao, Z., Chunbo, Y., Minhui, D., Zhengya, D., and Guangwen, C., 2013, Characteristics of slug flow with inertial effects in a rectangular microchannel, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 95, pp. 246-256.
6. Qian, D. and Lawal, A., 2006, Numerical study on gas and liquid slugs for Taylor flow in a T-junction microchannel, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 61, pp. 7609-7625.
7. Pohorecki, R. and Kula, K., 2008, A simple mechanism of bubble and slug formation in Taylor flow in microchannels, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 65, pp. 5256-5263.
8. Yun, J., Lei, Q., Zhang, S., Shen, S., and Yao, K., 2010, Slug flow characteristics of gas-miscible liquids in a rectangular microchannel with cross and T-shaped junctions, *Chem. Eng. Research and Design*, Vol. 86, pp. 997-1001.
9. Yue, J., Luo, L., Gonthier, Y., Chen, G. and Yuan, Q., 2009, An experimental study of air-water Taylor flow and mass transfer inside square microchannels, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 64, pp. 3697-3708.
10. Lee, K. G., Lee, J. K., Park, T., Kim, G. N. and Park, E. J., 2015, Effect of various shapes of Mixer geometry on Two-phase flow Patterns in a Micro-channel, *Korean J. Air-Cond. and Ref. Eng.*, Vol. 27, No. 2, pp. 75-80.
11. Zuber, N. and Findlay, J. A., 1968, Average volumetric concentration in two-phase flow system, *Tran. of ASME, J. of Heat Transfer*, Vol. 87, pp. 453-468.
12. Fukano, T. and Kariyasaki, A., 1993, Characteristics of gas-liquid two-phase flow in a capillary tube, *Nuc. Eng. and Design*, Vol. 141, pp. 59-68.