

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2015.39.7.557>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

사각 마이크로 채널 내 Taylor 유동 특성 예측에 대한 연구

이 준 경*[†] · 이 관 근*

* 경남대학교 기계공학부

Prediction of Two-phase Taylor Flow Characteristics in a Rectangular Micro-channel

Jun Kyoung Lee*[†] and Kwan Geun Lee*

* Dept. of Mechanical Engineering, Kyungnam Univ.

(Received December 17, 2014 ; Revised April 1, 2015 ; Accepted April 20, 2015)

Key Words: Micro-channel(미세관), Two-phase Flow(이상유동), Taylor Flow(Taylor 유동), Bubble(기포), Slug(슬러그)

초록: 본 논문에서는 $600 \times 600 \mu\text{m}$ 사각 마이크로 채널에서의 기-액체 테일러(슬러그) 흐름의 특성을 실험을 통해 살펴보았다. 실험 유체로는 질소와 물을 사용하였으며, 액체 및 기체 겉보기 속도는 각각 $0.01 \sim 3 \text{ m/s}$, $0.1 \sim 3 \text{ m/s}$ 의 범위에서 테일러 흐름이 나타나는 구간에서만 데이터를 얻었다. 기포 길이, 액체 슬러그 길이, 기포 속도 그리고 기포 생성 주파수를 고속 카메라를 사용하여 이미지 분석을 통해 측정하였다. 제시된 측정값(기포 길이, 액체 슬러그 길이, 기포 속도)과 이전 문헌에서 제안된 경험적 모델의 비교결과 대부분 오차가 50% 이상으로 나타났다. 따라서 기포와 액체 슬러그 길이 그리고 기포 속도에 대한 개선된 모델을 제시하였고, $\pm 20\%$ 이내의 비교적 우수한 결과를 볼 수 있었다. 또한 기포 생성 주파수는 기포 길이, 액체슬러그 길이 그리고 기포 속도의 관계를 이용하여 $\pm 20\%$ 이내에서 예측가능함을 알 수 있었다.

Abstract: The characteristics of a gas-liquid Taylor (slug) flow in a square micro-channel with dimensions of $600 \mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$ are experimentally investigated in this paper. The test fluids were nitrogen and water. The superficial velocities of the liquid and gas were in the ranges of $0.01 - 3 \text{ m/s}$ and $0.1 - 3 \text{ m/s}$, respectively. The bubble and liquid slug lengths, bubble velocities, and bubble frequencies for various inlet conditions were measured by analyzing optical images obtained with a high-speed camera. It was found that the measured values (bubble and liquid slug lengths, bubble velocities) were not in good agreement with the values obtained using empirical models presented in the existing literature. Modified models for the bubble and liquid slug lengths and bubble velocity are suggested and shown to be in good agreement ($\pm 20\%$) with the measured values. Moreover, the bubble frequency could be predicted well by the relationship between the unit cell length and its velocity.

- 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. 서론

[†] Corresponding Author, jkleee99@kyungnam.ac.kr

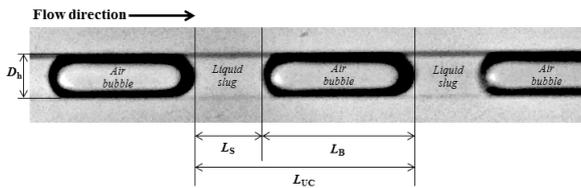


Fig. 1 Schematic plot of unit cell geometry

system)의 제작 기술 발전과 함께 꾸준히 발전을 하였고, 현재는 마이크로 크기의 다양한 적용분야에 기초가 되는 구성 요소로 자리 잡았다. 이에 따라, 마이크로채널 내의 2 상 유동에 대한 연구도 유동패턴, 압력강하, 상변화 열전달 등 다양한 분야에서 진행이 되어왔다.⁽¹⁾

Lap on a chip 기기에서 액체시료 자체나 시료 내 물질의 성분 분석에 대해 기체를 이용하여 액체의 슬러그를 만들어 적은 양의 시료로도 분석이 가능하게끔 만드는 기술이 요구되고 있고,^(1,2) 초소형 반응기(Micro reactor)^(3~7)나 초소형 열교환기(Micro heat exchanger)^(8,9)에 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 수배에 해당하는 크기의 기포(elongated bubble)로 이루어지며, 기포와 채널벽 사이는 두께가 작은 액체 필름으로 뒤덮여 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).

또한 단위 셀은 기포와 같은 속도(U_B)를 가지며, 혼합기 형태에 따라 다른 생성주파수(f_{UC})를 나타내게 된다. 특히, 기존의 많은 연구들은 유로에서의 압력강하와 물질전달률 등을 결정하는 데 중요한 인자가 되는 기포 및 액체 슬러그 길이와 속도를 측정하고 그것을 예측할 수 있는 식의 개발에 집중되어 있고, Table 1에 대표적인 것들을 나타내었다.

기포 길이와 관련된 기존 연구에 대해, Garstecki 등⁽²⁾은 squeezing mechanism을 이용하여 액체와 기체의 상대적인 걸보기속도 비가 기포의 크기를 결정짓는 가장 중요한 요소로 판단하여 식 (1)과 같이 간단한 형태의 길이 예측식을 제안하였고, Van Steijn 등⁽³⁾과 Fu 등⁽⁴⁾은 그들의 실험 조건을 고려하여 수정된 식 (2)와 (3)을 제안하였다.

기포의 속도는 입구의 유량과 깊은 관계가 있

Table 1 Previous correlations on bubble, slug lengths and bubble velocity in Taylor flow

Authors	Inlet mixing geometry	Microchannel Shape	Hydraulic Diameter (μm)	Correlation	Eq.
Garstecki et al. ⁽²⁾	T-type junction	Rectangular	w: 50, 100, 200 h: 33	$\frac{L_B}{D_h} = 1 + \alpha \frac{j_g}{j_f}$ ($\alpha \approx 1$)	(1)
Van Steijn et al. ⁽³⁾	T-type junction	Square	w(h): 800	$\frac{L_B}{D_h} = 1.5 + 1.5 \frac{j_g}{j_f}$	(2)
Fu et al. ⁽⁴⁾	T-type junction	Rectangular	w: 120 h: 80	$\frac{L_B}{D_h} = 0.64 + 0.32 \frac{j_g}{j_f}$	(3)
Chaoqun et al. ⁽⁵⁾	Y-type junction	Rectangular	w: 750 h: 280	$\frac{L_B}{W} = (1 + 1.37 We^{-0.349}) j_g/j_f$	(4)
Qian and Lawal ⁽⁶⁾	T-type junction	Rectangular	$D_h = 250\sim 3000$	$\frac{L_B}{d} = 1.637 \left(\frac{j_g}{j_g + j_f} \right)^{0.107} \left(\frac{j_f}{j_g + j_f} \right)^{-1.05} Re^{-0.075} Ca^{-0.0678}$	(5)
Chaoqun et al. ⁽⁵⁾	Y-type junction	Rectangular	w: 750 h: 280	$U_B = 1.12(j_g + j_f)$	(6)
Yue et al. ⁽⁷⁾	Y-type junction	Rectangular	$D_h = 200$ or 400	$U_B = (j_g + j_f)$ for 400 μm $U_B = 1.2(j_g + j_f)$ for 200 μm	(7)
Vökel ⁽⁸⁾	T-type junction	Rectangular	w: 1000 h: 500	$\frac{L_S}{D_h} = 1 + \frac{j_f}{j_g}$	(8)
Yun et al. ⁽⁹⁾	T-type junction	Rectangular	w: 630 h: 200	$\frac{L_S}{D_h} = 1.06 \left(1 + \frac{j_f}{j_g} \right)^{1.28}$	(9)
Chaoqun et al. ⁽⁵⁾	Y-type junction	Rectangular	w: 750 h: 280	$\frac{L_S}{D_h} = 1.157 \left(1 + \frac{j_f}{j_g} \right)^{0.365} \left(1 + \frac{j_g}{j_f} \right)^{0.373} (We)^{-0.208}$	(10)

고, 대부분 기체와 액체의 겉보기 속도의 합에 비례하는 형태의 식(식 (6)과 (7))을 통해 기포의 속도를 예측할 수 있었다.

기포의 길이와 속도에 대한 연구는 이외에도 많은 연구가 존재하지만, 액체 슬러그 길이에 대한 연구는 상대적으로 매우 적은 수준이다. 그러나 액체시료분석이나 마이크로 기포의 생성주파수에 대한 분석과 예측을 위해서 슬러그 길이에 대한 예측이 필요하다.

기포의 생성 주파수는 다음과 같이 기포(단위 셀)의 속도 및 단위 셀의 길이에 대한 관계를 나타낸 이론식(Liu 등⁽¹⁰⁾)을 활용하여 구할 수 있다.

$$f_{UC} = \frac{U_B}{L_{UC}} = \frac{U_B}{L_B + L_S} \quad (11)$$

마이크로 채널에 대해 원하는 Taylor 유동을 만들어내기 위해서는, 기포 및 액체 슬러그 길이, 속도, 생성 주파수를 전체적으로 파악할 수 있어야 한다. 따라서 본 연구에서는 다음의 순서로 연구를 수행하고자 한다.

첫째, 측정된 실험결과가 이론식 (11)을 얼마나 만족하는지에 대한 여부를 판단하고자 한다. 즉, 이론식 (11)에 본 연구의 실험결과를 대입하여 나오는 주파수 값과 실험에서 획득한 주파수 값을 서로 비교하여 그것이 거의 일치하면, 실험의 신

뢰도가 높음을 확인할 수 있다. 뿐만 아니라 기포길이, 액체 슬러그 길이 그리고 기포 속도를 각각 예측할 수 있는 식을 개발하면, 이들을 이용하여 기포의 생성주파수를 쉽게 예측할 수 있게 된다. 둘째, 기포 길이와 속도, 액체 슬러그의 길이에 대한 기존의 예측 모델을 본 실험 결과와 비교하여 적용 가능성을 검토하고자 한다. 셋째, 적용 가능성이 낮다면 모델의 개선을 수행할 것이다. 마지막으로 개선된 각각의 모델(또는 높은 예측률의 기존 모델)을 식 (11)에 적용하여 구한 생성 주파수를 실제 실험값과 비교하여 생성 주파수에 대한 예측 결과를 검토할 것이다.

2. 실험장치 및 방법

T 자형 혼합기에 대한 기포생성을 살펴보기 위하여 Fig. 2 과 같은 실험 장치를 구성하였다. 실험부에 대해 유동가시화를 위해서 PMMA로 제작하였으며, 유로는 600 μ m \times 600 μ m 크기의 사각 형태이다(Fig. 3). 작동유체로서 액체는 이온이 없는 용존기체가 제거된 물(degassed water)을, 기체는 질소를 사용하였다. 또한 전체 연결 튜브들 사이에 존재하는 용존기체를 제거하기 위해 약 30분 가량 물을 빼내었다. 질소는 정압기(Pressure Regulator)와 질량 유량계(Mass Flow Controller, Aalborg)를 거쳐 혼합부(Mixer)로 유입되고, 액체

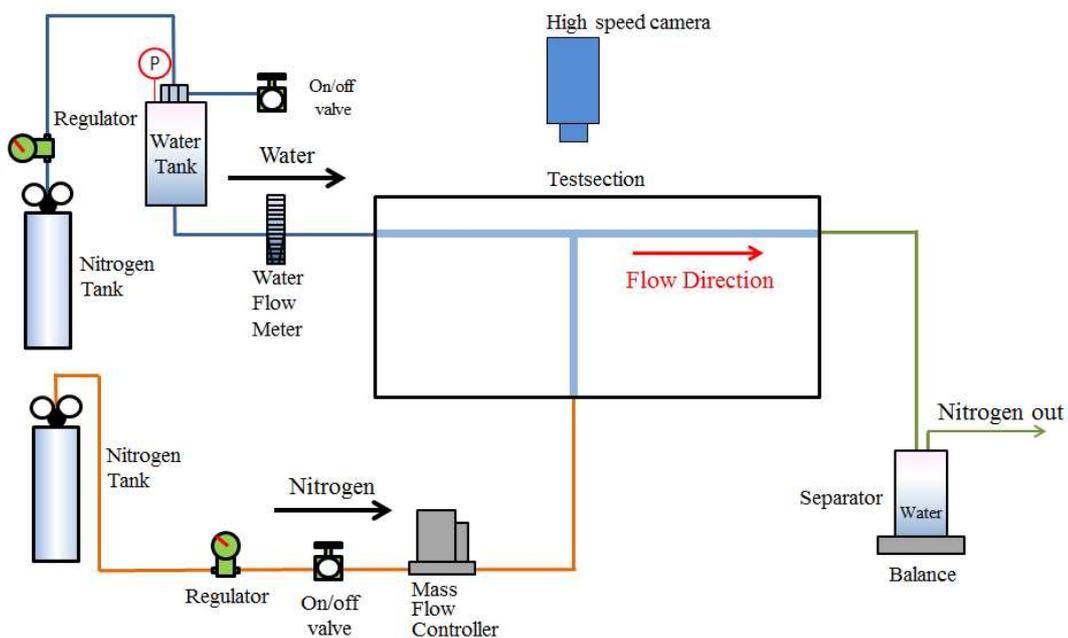


Fig. 2 Experimental setup

는 가압이 된 저장탱크로부터 유량계(Flow meter, Dwyer)를 거쳐 혼합부로 각각 유입된다. 혼합된 2상 유체는 마이크로 채널을 흐르게 되며, 유동 가시화는 고속카메라(MotionPro Y3, IDT Co.)와 스트로보를 활용한 디지털 카메라를 활용하여 유동가시화를 수행하였다. 고속카메라를 이용하여 10,000 frame/s 의 속도로 1초간 Image 데이터를 획득하였고, 각 기포의 길이, 액체 슬러그 길이, 속도, 생성주파수를 Image Processing을 통하여 평균값을 측정하였다. 기포의 길이와 액체 슬러그 길이에 대한 불확실성은 각각 $\pm 5\%$, $\pm 7\%$ 의 오차를 가지며, 생성주파수는 $\pm 0.5\%$ 이내로 측정이



Fig. 3 Photographs of T-type test section

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)는 각각 0.01 - 3 m/s (j_l) 및 0.1 - 3 m/s (j_g)로 설정하여

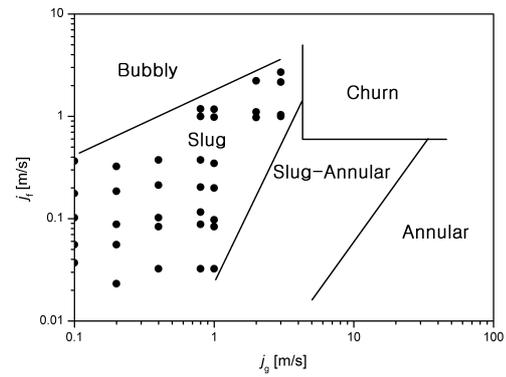
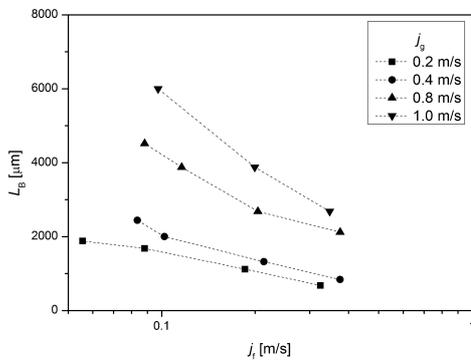
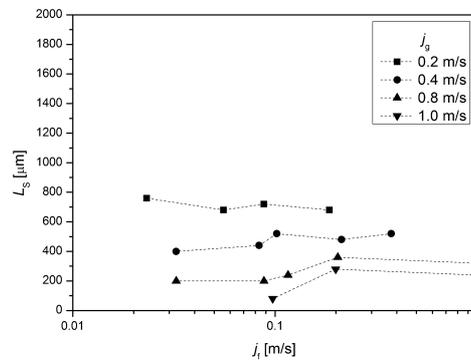


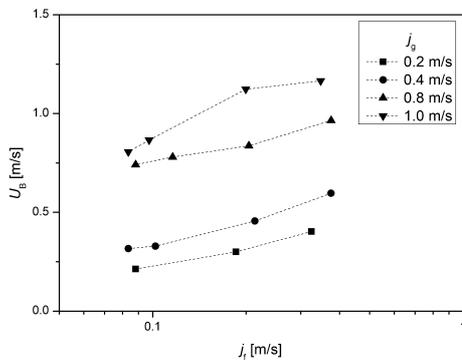
Fig. 4 Flow pattern map with T type mixer⁽¹¹⁾



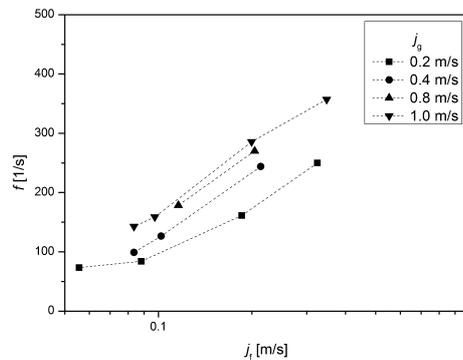
(a) Bubble length



(b) Slug length



(c) Bubble velocity



(d) Bubble generation frequency

Fig. 5 Effect of gas and liquid superficial velocity

실험을 수행하였으며 Taylor flow(Slug flow)가 형성 되는 영역에서의 데이터만 얻었다(Fig. 4). 기체와 액체 걸보기 속도 불확실성의 경우, 각각 $\pm 5\%$, $\pm 4\%$ 의 오차 범위를 가진다.

3. 실험 결과

Fig. 5는 본 실험을 통해 획득한 결과 중 대표적인 경우를 나타낸 그림이다. 기포 길이(Fig. 5(a))에 대해, 액체 유량이 증가 할수록 기포 길이는 감소하는 반면에, 기체 유량이 증가 할수록 Taylor flow에서의 기포 길이가 증가함을 알 수 있었다. 슬러그 길이(Fig. 5(b))에 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. 기포 속도(Fig. 5(c))에 대해, 액체와 기체의 유량이 증가할수록 속도가 증가함을 알 수 있었다. 기포 생성 주파수(Fig. 5(d))에 대해, 액체와 기체의 유량이 증가할수록 생성 주파수도 커짐을 확인할 수 있었다. 또한 액체 속도의 증가에 대한 주파수 증가가 매우 큼을 알 수 있었다. 이러한 현상에 대한 원인은 Lee and Lee⁽¹²⁾의 연구에서 자세히 살펴보았다.

4. 예측 모델

4.1 이론식 비교

서론에서 언급하였듯이 측정한 실험결과가 이론식 (11)을 얼마나 만족하는지에 대한 여부를 판단하였다. 이론식 (11)에 본 연구의 실험결과를 대입하여 나오는 주파수 값과 실험에서 획득한 주파수 값을 서로 비교하여 Fig. 6에 나타내었다.

실험으로 측정한 주파수를 가로축에, 실제 실험으로 측정한 속도, 단위 셀 길이를 식 (11)에 대입하여 구한 주파수를 세로축에 나타내었다. 실험값보다 이론값이 대체로 조금 크게 나오지만 식 (11)의 관계가 성립함을 확인할 수 있다. 따라서 기포 및 액체슬러그 길이(단위셀 길이)와 기포의 속도를 제대로 예측하면 기포의 생성 주파수도 식 (11)을 활용하여 쉽게 예측이 가능함을 알 수 있다.

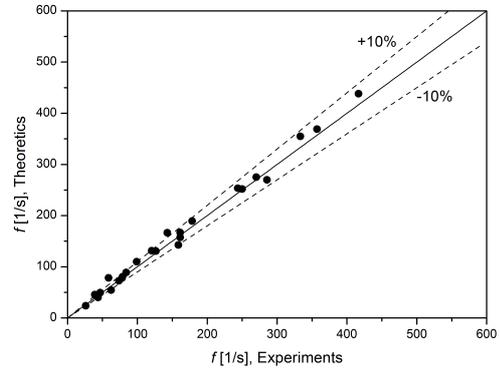


Fig. 6 Comparisons between experimental and theoretical values (Eq. (11))

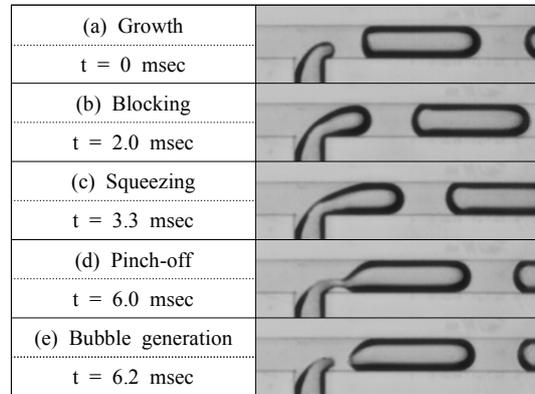


Fig. 7 Temporal evolution of periodic bubble generation procedure ($j_g = 0.370$ m/s, $j_f = 0.139$ m/s)

4.2 기포 길이

기포 길이는 Taylor flow 특성에서 중요한 인자 중에 하나이다. 기포 길이에 대한 예측을 하기 위해서는 기포 생성에 대한 메커니즘을 우선 살펴봐야 한다. 기포가 생성이 될 때 기상과 액상에 대해 작용하는 힘은 표면장력, 전단응력, 두 상간의 압력차와 관성력의 관계에 의해 기포의 크기가 결정이 된다.⁽²⁻⁴⁾ 기포가 유로를 대부분 채워서 흐르는 Taylor flow가 주로 발생하는 영역에 대해서는 관성력이 매우 작고, 액상의 압력이 기상을 밀어내면서 기포를 생성시키게 된다(Ca 수 ($= \mu V/\sigma$)가 작은 경우, squeezing regime).

Fig. 7은 기포가 생성이 되는 모습을 시간과 함께 나타내었다. 이러한 T자형 혼합부에 대한 기포 발생 현상을 Garstecki 등⁽²⁾은 다음과 같이 2가지의 가정으로 정리하여 기포의 길이를 예측할 수 있는 식을 제안하였다. 첫 번째 가정은 기체

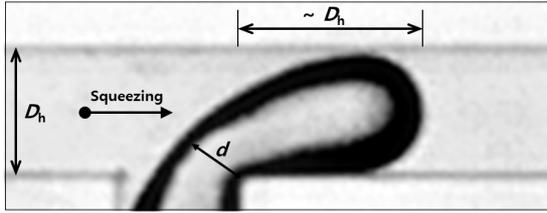


Fig. 8 Principle illustration of the initial step of bubble formation

가 액체를 가로막을 때의 기체 덩어리의 크기는 유로 너비와 거의 같다는 것이다(Fig. 8). 두 번째 가정은 기체가 액체를 가로막고 나서 액체가 기체를 압박(squeezing)하고 그로 인해 기체의 덩어리가 끊어져나갈 때까지 기포가 계속 자라난다는 것이며 그것을 수식으로 나타내면 다음과 같다. 즉, 압박 속도는 액체의 속도와 거의 같다고 할 수 있으며 ($U_{\text{squeeze}} \approx U_l$), 액체의 속도로 기체 덩어리(thread)를 붕괴(collapse)시킬 때까지의 시간을 t_c 로 두면, $t_c = d/u_{\text{squeeze}}$ 가 된다. 이 때, d 는 기체가 끊어지기 시작할 때의 목(neck)의 특성 길이로 정의한다. 그리고 액체가 압박을 가하여 끊어지는 순간까지 기체 덩어리는 계속 자라게 된다. 그 때의 속도를 U_{growth} 라 하고 이는 기체의 속도와 거의 유사하다고 할 수 있다 ($U_{\text{growth}} \approx U_g$). 위의 내용을 정리하여 기체 덩어리가 기포가 될 때까지의 길이는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$L_B \approx D_h + t_c \cdot U_{\text{growth}} \quad (12)$$

$$= D_h + \left(\frac{d}{U_{\text{squeeze}}}\right)U_{\text{growth}} = D_h + d\frac{j_g}{j_f}$$

식 (12)는 간단하게 Table 1의 식 (1)과 같이 정리가 된다. 이 식에 대해 기체 덩어리가 붕괴될 때의 거리 d 와 유로의 크기가 거의 같다고 한다면 $d/D_h \approx 1$ 이 된다. Garstecki 등⁽²⁾의 식 (1)에 대해 기체가 액체를 가로막을 때의 기체 덩어리의 크기가 유로 너비와 같지 않고, 거리 d 와 유로의 크기가 다르다면 식 (1)의 각 계수는 다음과 같은 일반식의 형태로 나타낼 수 있다.

$$\frac{L_B}{D_h} = \alpha_1 + \alpha_2 \frac{j_g}{j_f} \quad (13)$$

Van Steijn 등⁽³⁾은 마이크로 PIV를 통해 기포의 생성을 연구하여 기체의 걸보기 속도가 비교적

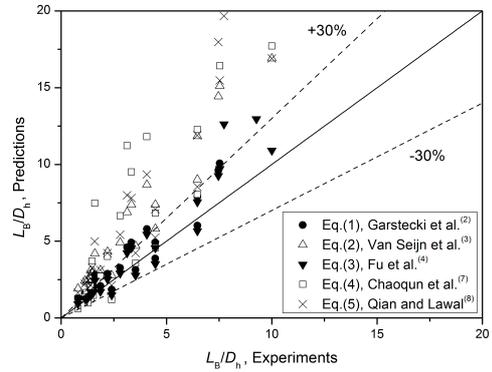


Fig. 9 Comparisons between experiments and empirical models for bubble length

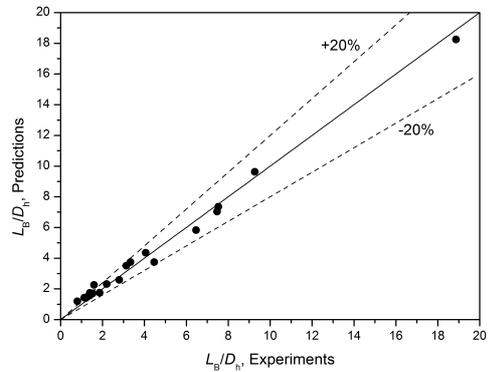


Fig. 10 Comparisons between experiments and modified model for bubble length

적은 영역에서는 식 (1)의 계수들이 커짐을 보고하였고 수정식을 제안하였다(식 (2)). Fu 등⁽⁴⁾은 높이가 40 μm 이고 너비가 120 μm 인 채널에 대해, 종횡비를 고려해 계수를 조정($\alpha = h/w = 40/120$)한 식을 제안하였다(식 (3)). Chaoqun 등⁽⁵⁾은 기포의 관성을 고려하여 We 수($= \mu V^2 D/\sigma$)를 도입하고, 기체와 액체의 속도비를 이용하여 경험식을 제안하였고(식 (4)), Qian and Lawal⁽⁶⁾은 전산유체역학(CFD)을 활용하여 마이크로 채널에서의 Taylor flow에 대한 연구를 수행하였고, Ca 수($= \mu V/\sigma$)와 Re 수 등을 고려하여 기포 크기를 예측하는 경험식을 제안하였다(식 (5)).

본 실험의 기포 길이 결과에 대해 기존 예측 모델(식 (1) ~ (5))을 적용하여 Fig. 9 에 그 결과를 나타내었다. 가로축은 기포 길이에서 수력직경을 나눈 실험값이고, 세로축은 예측 값을 나타내었다. 3가지 모델 중 Garstecki 등⁽²⁾이 제안한 모델이 $\pm 30\%$ 의 예측 범위에서 가장 우수한 예측결과를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. Fu

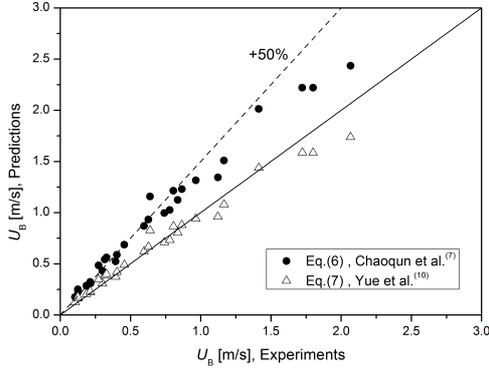


Fig. 11 Comparisons between experiments and empirical models for bubble velocity

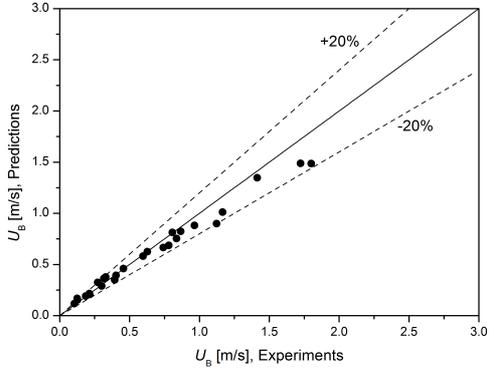


Fig. 12 Comparisons between experiments and modified model for bubble velocity

등⁽⁴⁾의 식도 α 를 1로 두고($\alpha = 600/600$) 대입하여 결과가 유사함을 알 수 있다. Van Steijn 등⁽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 등⁽²⁾의 식에 비해 예측 오차가 커짐을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 위의 결과를 바탕으로 식 (13)의 형태에 대해 계수를 조정한 식(14)를 제안하였고, 실험결과와 비교하여 Fig. 10 과 같은 $\pm 20\%$ 이내의 예측결과를 얻을 수 있었다.

$$\frac{L_B}{D_h} = 1 + 0.7 \frac{j_g}{j_f} \quad (14)$$

4.3 기포 속도

기포 속도의 경우, 사각 채널 내 기포에 대한 유량의 보존식에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_g + Q_f = (j_g + j_f)A = U_B A_B + U_{film} A_{film} \quad (15)$$

A , A_B , A_{film} 은 각각 채널, 기포, 액막의 면적에 해당한다. 위의 식을 기포의 속도에 대해 정리하면

$$U_B = \frac{A}{A_B}(j_g + j_f) - \frac{A_{film}}{A_B}U_{film} \quad (16)$$

Ca 수가 비교적 작은 Taylor flow의 경우 액막의 속도(U_{film})가 기포속도의 최대 5% 정도에 해당하는 크기로 무시할 만하고, 따라서 다음의 형태로 간단하게 표현이 가능하다.

$$U_B \approx \frac{A}{A_B}(j_g + j_f) = \lambda(j_g + j_f) \quad (17)$$

위의 식은 Zuber and Findlay⁽¹³⁾가 제안한 드리프트 플럭스(Drift-Flux) 모델(식 (18))과 같은 형태이다.

$$U_B = C_o(j_g + j_f) \quad (18)$$

Chaoqun 등⁽⁵⁾과 Yue 등⁽⁷⁾의 경우도 사각 채널에 대해 기체의 속도를 예측할 수 있는 식을 제안하였다(식 (6), (7)). 기포 속도에 대해 식 (6)과 (7)을 본 실험결과와 비교하여 Fig. 11 에 나타내었다. Chaoqun 등⁽⁵⁾의 경우는 속도가 높게 예측이 되었고, Yue 등⁽⁷⁾의 경우는 수력직경이 600 μm 인 경우에 대해 식 (17)의 $\lambda = 0.8$ 을 두고 적용하여 비교적 잘 예측이 됨을 확인하였다. Chaoqun 등⁽⁵⁾의 경우 수력직경이 약 400 μm 로 본 연구에서 사용한 유로보다 작으며, 유로의 직경이 감소함(Yue 등⁽⁷⁾과 Fukano and Kariyasaki⁽¹⁴⁾)에 따라 λ 의 값이 증가하는 경향에 의해 예측의 오차가 발생한 것으로 사료된다.

위의 논의를 토대로 본 실험 결과를 $\pm 20\%$ 내에서 표현하는 식은 다음과 같으며(식 (19)), Fig. 12에 그 결과를 나타내었다.

$$U_B = 0.75(j_f + j_g) \quad (19)$$

4.4 슬러그 길이

Phorecki and Kula⁽¹⁵⁾는 Taylor 유동에 대해 액체와 기체가 번갈아가며 채널의 한 부분을 채워야 만들어

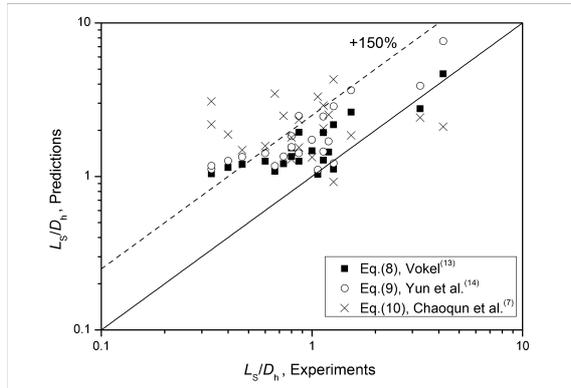


Fig. 13 Comparisons between experiments and empirical models for liquid slug length

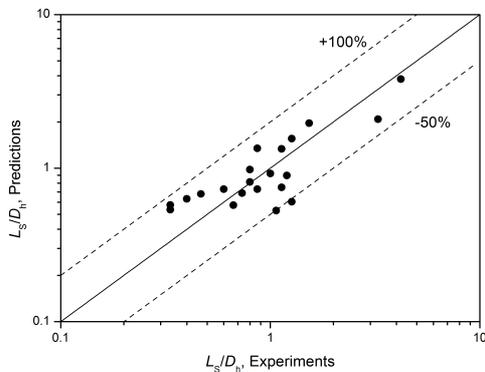


Fig. 14 Comparisons between experiments and modified model for liquid slug length

지는 것에 대해 스위칭 메커니즘(switching mechanism)을 제시하며, 기포 길이는 액체속도에 반비례하고, 액체 슬러그 길이는 기체속도에 반비례함을 개념적으로 제안하였다. Vökel⁽⁸⁾은 기포의 생성과 유사하게 액체 슬러그도 생성이 되고, 식 (13)과 같은 Garstecki 등⁽²⁾의 모델에 대해 액체와 기체의 항을 교체한(switching) 다음 식의 형태를 제안하였다.

$$\frac{L_S}{D_h} = \beta_1 + \beta_2 \frac{j_f}{j_g} \quad (20)$$

또한 실험을 통해 계수 β_1 과 β_2 가 각각 1의 값을 확인하였다(식 (8)). Yun 등⁽⁹⁾은 식 (20)의 형태에 대해 실험을 통해 얻은 결과를 기반으로 수정된 식 (9)를 제안하였고, Chaoqun 등⁽⁵⁾은 Weber 수를 추가하여 슬러그 길이를 예측할 수 있는 식(식 (10))을 제안하였다.

본 실험의 액체 슬러그 길이 결과에 대해 기존 예측 모델(식 (8) ~ (10))을 적용하여 Fig. 13에 그 결과를 나타내었다. 가로축은 액체슬러그 길이에

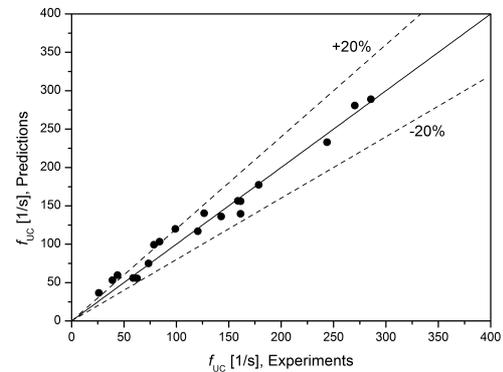


Fig. 15 Comparisons between experiments and Eq. (11) using modified models(Eq. (14), (19) and (21))

서 수력직경을 나눈 실험값이고, 세로축은 예측값을 나타내었다. 3개의 모델 모두 예측오차가 모두 크기를 확인할 수 있었고, Vökel,⁽⁸⁾ Yun 등⁽⁹⁾의 결과가 Chaoqun 등⁽⁵⁾과 비교하여 나은 예측 결과를 보여주고 있다. Chaoqun 등⁽⁵⁾은 액체 슬러그의 형성을 나타내는 식 (8)과 기포 생성을 나타내는 식 (1)을 한꺼번에 사용함으로써 오차가 커지는 것으로 사료된다.

본 연구에서는 Vökel⁽⁸⁾의 모델(식 (20))을 기반으로 여전히 오차는 크지만 실험결과를 보다 잘 표현하는 식을 다음과 같이 제안하였으며, 예측 결과를 Fig. 14에 나타내었다.

$$\frac{L_S}{D_h} = 0.5 + 0.9 \frac{j_f}{j_g} \quad (21)$$

4.5 기포 생성 주파수

기포 생성 주파수는 식 (11)과 함께 앞에서 도출한 예측 모델(식 (14), (19) 그리고 (21))들을 활용하면 비교적 쉽게 예측이 가능하다. Fig. 15에 실험값과 예측 모델로부터 구한 예측값을 비교하여 나타내었고, $\pm 20\%$ 이내에서 기포 생성 주파수의 예측이 가능함을 알 수 있다. 액체 슬러그 길이를 예측하는 식 (21)의 정확도가 다른 예측 모델보다 떨어지지만, 대개의 경우 기포 길이가 액체 슬러그 길이의 3~8배에 해당되어, 슬러그 길이의 영향이 적었고, 결과적으로 생성 주파수에 대해 $\pm 20\%$ 의 예측 오차를 나타내었다.

5. 결 론

600 μm 크기의 정사각 마이크로 채널에서의 기포 길이, 액체 슬러그 길이, 기포 속도 그리고 기

포 생성 주파수를 고속 카메라를 사용하여 이미 지 분석을 통해 측정하였다. 그리고 그 결과를 기존 예측 모델과 비교하였고, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 기포 길이 및 속도, 슬러그 길이에 대해 기존의 예측 모델이 잘 맞지 않음을 확인할 수 있었다.

(2) 기포 길이 및 속도, 슬러그 길이의 실험결과를 예측할 수 있는 개선된 모델을 제시하였고, 기포 길이 및 속도는 $\pm 20\%$ 이내, 슬러그 길이는 $-50\sim 100\%$ 이내에서 예측가능함을 알 수 있었다.

(3) 기포 생성 주파수 예측은 기포 길이 및 속도, 그리고 슬러그 길이의 관계를 통해 가능하며, 각각의 예측식을 통해 구한 값으로부터 실험결과와 비교를 수행하였고, $\pm 20\%$ 이내에서 생성 주파수 예측이 가능하였다.

(4) 본 논문에서는 T형 혼합기를 사용하였지만, 다양한 형태의 혼합기를 활용할 경우에 나타나는 Taylor flow의 유동특성이 다름을 확인(Lee 등⁽¹¹⁾) 할 수 있으며, 향후에는 다양한 혼합기에도 적용할 수 있는 일반식에 대한 연구를 수행할 예정이다.

후 기

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

참고문헌 (References)

(1) Shui, L., Eijkel, J. and Berg, A., 2007, "Multiphase Flow in Micro- and Nanochannels," *Sensors and Actuators B* 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 on a Chip* 6, pp. 437~446.

(3) Van Steijn, V., Kreutzer, M. T. and Kleijn, C. R., 2007, " μ -PIV Study of the Formation of Segmented Flow in Microfluidic T-junctions," *Chem. Eng. Sci.* 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.* 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.* 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) 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.* 64, pp. 3697~3708.

(8) Vökel, N., 2009, "Design and Characterization of Gas-liquid Microreactors," *Ph.D Thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, France.*

(9) 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. Sci.* 65, pp. 5256~5263.

(10) Liu, H., Vandu, Chippla O. and Krishna, Rajamani., 2005, "Hydrodynamics of Taylor Flow in Vertical Capillaries: Flow Regimes, Bubble Rise Velocity, Liquid Slug Length, and Pressure Drop," *Ind. Eng. Chem. Res.* 44, pp. 4884~4897.

(11) 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.* 27, pp.75~80.

(12) Lee, K. G. and Lee, J. K., 2015, "Study on the Characteristics of Bubble and Liquid Slug for Gas-Liquid Taylor flow in a Rectangular Micro-channel," *Korean J. Air-Cond. and Ref. Eng.*, Accepted.

(13) Zuber, N. and Findlay, J. A., 1968, "Average Volumetric Concentration in Two-phase Flow System," *Transactions of ASME, Journal of Heat Transfer* 87, pp. 453-468.

(14) 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.

(15) Pohorecki, R. and Kula, K., 2008, "A Simple

Mechanism of Bubble and Slug Formation in Taylor Flow in Microchannels," *Chem. Eng. Research and Design*. 86, pp. 997~1001.