

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2016.40.4.227>

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

마이크로 T자형 합류지점에서 기체 및 액체의 주입 방법이 기포 및 액체 슬러그 생성에 미치는 영향

이 준 경^{**} · 이 치 영^{**}

* 경남대학교 기계공학부, ** 부경대학교 소방공학과

Effect of Gas- and Liquid-injection Methods on Formation of Bubble and Liquid Slug at Merging Micro T-junction

Jun Kyoung Lee^{*†} and Chi Young Lee^{**}

* Dept. of Mechanical Engineering, Kyungnam Univ.

** Dept. of Fire Protection Engineering, Pukyong Nat'l Univ.

(Received October 6, 2015 ; Revised February 2, 2016 ; Accepted February 2, 2016)

Key Words: Micro-channel(미세관), Two-phase Flow(2상유동), Taylor Flow(테일러 유동), Bubble(기포),
Liquid Slug(액체 슬러그)

초록: 본 논문에서는 $600 \times 600 \mu\text{m}$ 사각 마이크로 채널에서 T자형 합류지점에서의 기체 및 액체의 주입 방법이 기포 및 액체 슬러그의 생성에 미치는 영향을 실험을 통해 살펴보았다. 실험 유체로는 질소와 물을 사용하였으며, 액체 및 기체 겉보기 속도는 각각 0.05 - 1 m/s, 0.1 - 1 m/s 의 범위로 테일러 유동이 나타나는 구간에서 데이터를 얻었다. 기포 길이, 액체 슬러그 길이, 기포 속도 그리고 기포 생성 빈도를 고속 카메라를 사용하여 이미지 분석을 통해 측정하였다. 유사한 입구 겉보기 속도 조건에서, T-자형 합류지점의 main channel에 기체를 주입하는 방법(T_{gas-liquid})이 액체를 주입하는 방법(T_{liquid-gas})보다 기포와 액체 슬러그의 길이가 길었고 기포 생성 빈도는 낮았다. 한편, 두 주입방법에서 기포 속도는 유사하게 나타났다. T_{liquid-gas} 주입방법의 기존 예측 상관식은 T_{gas-liquid} 주입방법의 기포 길이, 기포 속도, 액체 슬러그 길이, 기포 생성 빈도 실험데이터를 각각 ~24 %, ~9 %, ~39 %, ~55 %로 예측하였다.

Abstract: In the present experimental study, the effect of gas- and liquid-injected methods on the formation of bubble and liquid slug at the merging micro T-junction of a square microchannel with dimensions $600 \mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$ was investigated. Nitrogen and water were used as test fluids. The superficial velocities of the liquid and gas were in the range of 0.05 - 1 m/s, and 0.1 - 1 m/s, respectively, where the Taylor flow was observed. The bubble length, liquid slug length, bubble velocity, and bubble generation frequency were measured by analyzing the images captured using a high-speed camera. Under similar inlet superficial velocity conditions, in the case of gas injection to the main channel at the merging T-junction (T_{gas-liquid}), the lengths of the bubble and liquid slug were longer, and the bubble generation frequency was lower than in the case of liquid injection to the main channel at the merging T-junction (T_{liquid-gas}). On the other hand, in both cases, the bubble velocity was almost the same. The previous correlation proposed using experimental data for T_{liquid-gas} had predicted the present experimental data of bubble length, bubble velocity, liquid slug length, and bubble generation frequency for T_{gas-liquid} to be ~24%, ~9%, ~39%, ~55%, respectively.

- 기호설명 -

d : 기체 목(neck) 특성길이(m)

D_h : 채널 수력직경(m)

f_{UC} : 생성 빈도(1/s)

L_B : 기포 길이(m)

L_S : 슬러그 길이(m)

† Corresponding Author, jkleee99@kyungnam.ac.kr

- L_{UC} : 단위 셀 길이(m)
 j_g : 기체 겉보기 속도(m/s) (= Gas volume flow rate/Cross sectional area)
 j_f : 액체 겉보기 속도(m/s) (= Liquid volume flow rate/Cross sectional area)
 t_c : 기체 붕괴 시간(s)
 U_{growth} : 기포 성장 속도(m/s)
 $U_{squeeze}$: 압박 속도(m/s)
 U_B : 기포 속도(m/s)

1. 서론

MEMS(Micro-Electro Mechanical System) 기술이 급격하게 발전하면서 마이크로 시스템(micro-system)이 다양한 분야에 적용되고 있고, 이로 인해 마이크로 채널(microchannel) 내의 2 상 유동(two-phase flow)에 대한 연구(예를 들면, 유동양식(flow pattern), 압력강하, 상변화 열전달 등)가 활발하게 진행되고 있다.⁽¹⁾

MEMS 기술과 마이크로플루이드(micro-fluidic) 기술을 기반으로 한 LOC(Lab On a Chip) 분야에서는, 액체시료 또는 시료 내 물질의 성분 분석을 위해 기체를 이용하여 액체 슬러그(liquid slug)를 만들어 적은 양의 시료로도 분석이 가능하게 만드는 기술이 요구되고 있고,^(1,2) 초소형 반응기(micro reactor)⁽³⁻⁵⁾나 초소형 열교환기(micro heat exchanger)^(6,7) 분야에서는 액체와 기체를 혼합기를 통해 동시에 주입하여 원하는 만큼의 액체 슬러그를 만들어내는 것이 매우 중요하다. 기체와 액체가 동시에 흐르는 2상 유동에서, 기포와 액체 슬러그로 이루어지는 유동을 테일러 유동(Taylor flow)이라 부른다. Fig. 1에 전형적인 테일러 유동을 나타내었다. 테일러 유동은 액체 슬러그와 기포(bubble)로 이루어지며, 일반적으로 기포와 채널 벽 사이는 두께가 얇은 액막(liquid film)이 존재한다. 기포의 양끝 길이를 L_B (bubble length), 액체 슬러그 양끝 길이를 L_S (liquid slug length), 기포와 액체 슬러그 길이를 합하여 단위셀(unit cell)이라 하며 $L_{UC}(=L_B+L_S)$ 로 나타낸다(Fig. 1). 마이크로 채널의 경우 Capillary 수가 작고, 표면에 작용하는 전단응력이 크지 않아 기포가 단면 전체를 채우는 테일러 유동이 자주 관찰된다. 기존의 많은 연구들이 테일러 유동에서 기포의 길이를 측정하고 예측하는 데에 집중되어 있는데, 이는 유로에

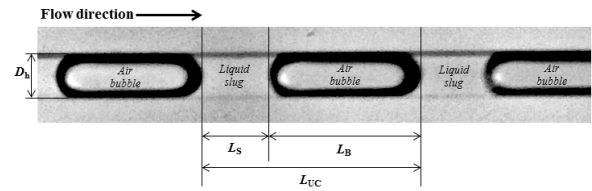


Fig. 1 Schematic plot of unit cell geometry in Taylor flow

서의 압력강하와 열 및 물질전달 등을 결정하는데 중요한 인자가 되기 때문이다.

기포 길이에 대한 기존 연구의 경우, Garstecki 등⁽²⁾은 squeezing mechanism을 이용하여 액체와 기체의 상대적인 겉보기속도 비가 기포의 크기를 결정짓는 가장 중요한 요소로 판단하였다. van Steijn 등⁽³⁾은 μ -PIV(micro Particle Image Velocimetry) 기법을 이용하여 기포의 생성을 연구하였고, Fu 등⁽⁴⁾은 기포 생성을 squeezing, transition과 dripping 영역으로 구분하여 제시하였다.

기존의 기포 길이에 대한 연구는 소개한 내용 외에도 비교적 많은데 반해, 슬러그 길이에 대한 연구는 상대적으로 매우 적은 수준이다. 슬러그 길이는 기체의 Reynolds 수와 Eötvös 수, Capillary 수 등과 연관되어 예측식을 만들 수 있으나, Phorecki and Kula⁽⁵⁾는 테일러 유동에 대해 액체와 기체가 번갈아가며 채널의 한 부분을 채워야 만들어지는 스위칭 메커니즘(switching mechanism)을 제시하였으며, 기포 길이는 액체 속도에, 액체 슬러그 길이는 기체 속도에 각각 반비례함을 개념적으로 제안하였다. Yun 등⁽⁶⁾은 그러한 개념을 기반으로 기체 holdup($\epsilon_g = j_g / (j_f + j_g)$)을 도입하여 액체 슬러그 길이 예측식을 제안하였다.

실험적인 방법뿐 아니라 CFD(Computational Fluid Dynamics) 방법을 이용한 합류지점에서의 기포 및 액체 슬러그 거동에 대한 연구도 꾸준히 수행되고 있다. Qian and Lawal⁽⁷⁾은 FLUENT를 이용하여 혼합기 형태와 이에 따른 기포 및 액체 슬러그 거동에 대한 연구를 수행하였다. Guo and Chen⁽⁸⁾은 CFD 기법을 이용하여 다양한 조건에서 기포 및 액체 슬러그의 길이, 슬러그 내부의 속도 분포 등을 보고하였고, 유체의 물성치가 미치는 영향에 대해서 연구를 수행하였다. Mansour 등⁽⁹⁾은 FLUENT를 이용하여 2차원 및 3차원 계산을 통하여 압력강하, 평균 기포 속도, 속도 분포 및 기포율 등에 대한 연구를 수행하였다. Arias

등⁽¹⁰⁾은 유체역학 전산해석 코드인 JADIM을 이용하여 T자형 합류지점에 대해 다양한 조건에서 2차원 계산을 수행하였고, 기포 속도, 기포율(void fraction), 기포 생성 빈도, 기포 길이에 대한 결과를 보고하였다. 이처럼 CFD 기법을 이용한 연구가 활발하게 진행되고 있으나 신뢰도를 높이기 위해서는 다양한 조건 및 형상에서 수행된 실험 데이터 확보가 꾸준히 이루어져야 한다.

본 연구 그룹에서는 최근 다양한 혼합기 형태(예를 들면 T(액체는 Main과 평행하고 기체가 90° 각도를 이룸), Y(Main에 대해 액체와 기체 각각 45° 각도를 이룸), Impacting(Main에 대해 액체와 기체 각각 90° 각도를 이룸))에서 생성되는 2상 유동양식을 실험적으로 파악하고 이를 비교하였다(Lee and Lee⁽¹¹⁾). 2상 유동 양식 선도는 혼합기 형태에 따라 크게 차이 나지 않았으나, 슬러그류(slug flow)나 기포류(bubbly flow) 영역에서 슬러그와 기포의 생성 거동이 다르고 이에 따라 생성 크기와 속도가 달라짐을 보고하였다. 또한 Lee and Lee⁽¹²⁾는 이전⁽¹¹⁾에 사용하였던 다양한 혼합기 중 T자형 혼합기에 대해 액체 슬러그 및 기포 생성에 대한 세부 연구를 수행하였다. Main inlet에 물, side inlet에 질소를 주입(Fig. 2 (a), 이후 T_liquid-gas)하여 실험을 수행하였으며, 기포 길이, 기포 속도, 기포 생성 빈도, 액체 슬러그 길이를 측정하였다. 실험데이터를 이용하여 기존 상관식과 비교, 검토하였으며, 실험데이터를 토대로 새로운 상관식을 제안하였다.

본 논문에서는 수력직경이 600 μm인 사각 마이크로 채널로 구성된 T자형의 합류지점을 제작하고 main inlet에 질소, side inlet에 물을 주입(Fig. 2(b), 이후 T_gas-liquid)하여 합류지점에서의 기포 및 액체 슬러그 형성에 대한 특성(즉, 기포 길이, 기포 속도, 기포 생성 빈도, 액체 슬러그 길이)을 파악하기 위한 실험을 수행하였다. Main inlet에 물, side inlet에 질소를 공급하여 수행한 기존 Lee and Lee⁽¹²⁾ 연구결과와의 비교를 통하여 마이크로 T자형 합류지점에서 기체 및 액체의 주입 방법이 기포 및 액체 슬러그 생성에 미치는 영향을 검토, 보고한다.

2. 실험장치 및 방법

T자형 혼합기에서 기포 및 액체 슬러그 생성 거동을 파악하기 위하여 Fig. 2와 같은 실험 장치

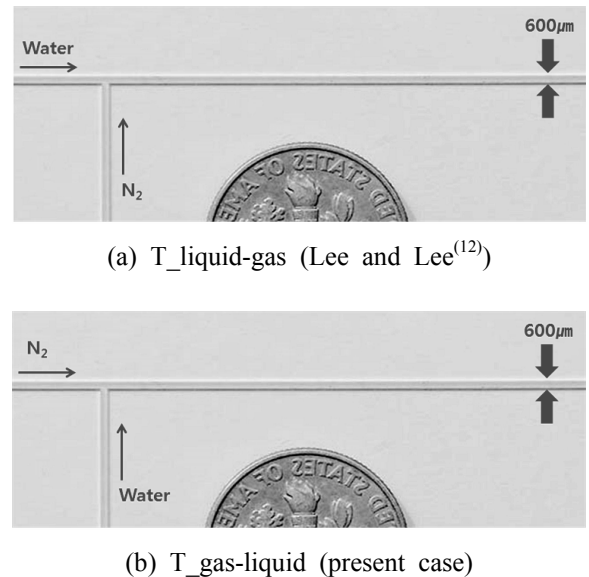


Fig. 2 Photographs of T_liquid-gas and T_gas-liquid test sections

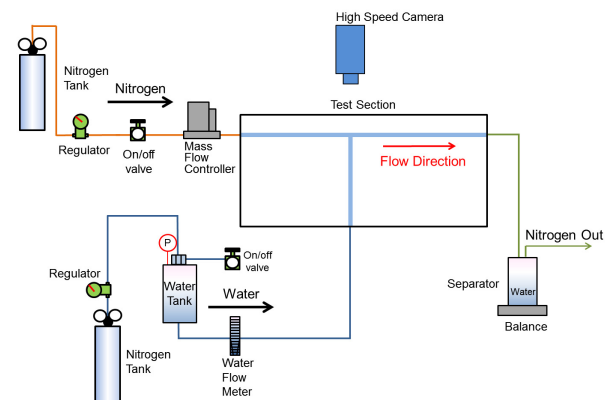


Fig. 3 Experimental setup for T_gas-liquid

를 구성하였다. T자형 합류지점은 유동가시화를 위해서 투명한 PMMA(PolyMethyl MethAcrylate)로 제작하였으며, 유로는 600 μm × 600 μm 크기의 정사각 형태이다(Fig. 3). 작동유체로, 액체는 이온이 없는 용존기체가 제거된 물(degassed water)을, 기체는 질소를 사용하였다. 또한 전체 연결 튜브들 사이에 존재하는 용존기체를 제거하기 위해 약 30분 가량 충분히 물을 흘려주었다. 질소는 정압기(pressure regulator)와 질량 유량계(mass flow controller, Aalborg)를 거쳐 T자형 합류지점으로 유입되고, 액체는 가압이 된 저장탱크로부터 유량계(flow meter, Dwyer)를 거쳐 합류지점으로 유입된다. 기존 연구 (Lee and Lee⁽¹²⁾)에서는 main inlet을 통하여 물을 공급하였고 side inlet을 통하여 질소를 공급하였으나 본 실험에서는 main

inlet을 통하여 질소를 공급하였고, side inlet을 통하여 물을 공급하였다. 편의상 본 논문에서는 첫 번째 경우를 T_liquid-gas 주입방법, 두 번째 경우를 T_gas-liquid 주입방법이라 명명하였다. 혼합된 2상 유체는 마이크로 채널을 흐르게 되며, 유동 가시화는 고속카메라(MotionPro Y3, IDT Co.)와 백라이트팅 기법(Backlighting method)을 활용하여 수행하였다. 고속카메라를 이용하여 10,000 frame/s 의 속도로 1초간 이미지(image)를 획득하였고, 기포 길이, 액체 슬러그 길이, 기포 속도, 기포 생성 빈도를 이미지 처리(image processing) 기법을 통하여 측정하였다. 액체 슬러그 및 기포 길이는 Fig. 1과 같은 이미지에서 액체 슬러그의 끝과 끝, 기포의 끝과 끝까지의 픽셀(pixel) 수를 측정하여 환산하였다. 속도의 경우 일정한 시간 동안 기포의 움직인 거리(픽셀 수)를 측정하여 데이터를 얻었으며, 생성 빈도의 경우 일정한 위치를 기준으로 단위 셀이 한번 지나갈 때의 시간을

측정하여 생성 빈도를 측정하였다. 기포 길이, 액체 슬러그 길이, 기포 생성 빈도에 대한 측정 불확도(measurement uncertainty)는 각각 $\pm 5\%$, $\pm 7\%$, $\pm 0.5\%$ 이내로 평가되었다.

마이크로 채널을 통해 출구로 나온 2상 유체는 하류에 설치된 기/액 분리기(separator)로 유입된다. 액체 유량은 전자저울(balance)을 사용하여 일정시간 동안 질량을 측정함으로써 획득할 수 있었다. 액체와 기체의 겉보기 속도(superficial velocity)는 각각 $0.05 - 1 \text{ m/s}$ (j_f) 및 $0.1 - 1 \text{ m/s}$ (j_g)로 설정하여 실험을 수행하였다. 기체와 액체 겉보기 속도의 불확도는 각각 $\pm 5\%$, $\pm 4\%$ 이내로 평가되었다.

3. 실험 결과

3.1 기포 길이

T자형 합류지점에서의 기포 및 액체 슬러그 생성 거동(기포 길이, 기포 속도, 기포 생성 빈도, 액체 슬러그 길이)을 측정하였다.

Fig. 4에 본 연구에서 실험을 통해 얻어진 기포 길이를 입구의 겉보기 속도(j_g , j_f)의 변화에 대해 나타내었다. 기체 및 액체 주입조건이 기포 및 액체 슬러그 생성에 미치는 영향을 비교하기 위하여 본 연구에서 수행한 T_gas-liquid 주입방법의 실험데이터와 함께 동일한 입구 겉보기 속도 조건의 T_liquid-gas 주입방법에 대한 실험데이터⁽¹²⁾를 함께 나타내었다.

일정한 기체 겉보기 속도에 대해 액체 겉보기 속도가 증가할수록 기포 길이는 줄어드는 것을 볼 수 있고, 액체 겉보기 속도가 일정하면 기체

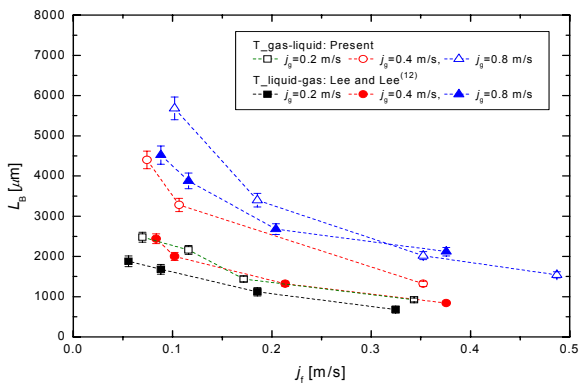
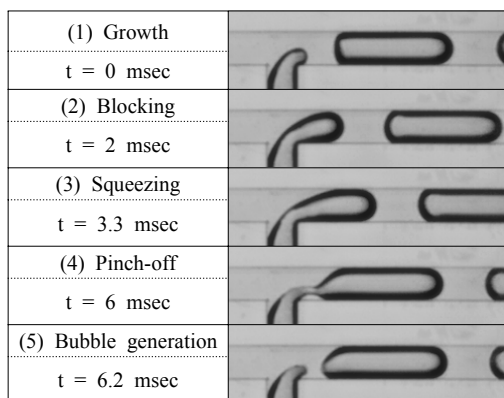
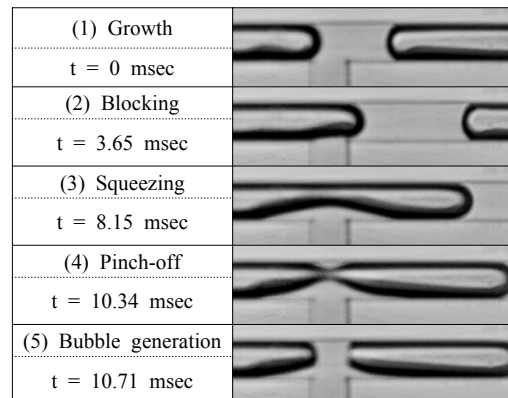


Fig. 4 General trend of bubble length (LB) in T_liquid-gas and T_gas-liquid with various inlet superficial velocity conditions



(a) T_liquid-gas (Lee and Lee⁽¹²⁾)



(b) T_gas-liquid

Fig. 5 Visualization of periodic bubble generation ($j_g = 0.370 \text{ m/s}$, $j_f = 0.139 \text{ m/s}$)

겉보기 속도가 증가할수록 기포 길이가 증가함을 알 수 있다. 이러한 측정 결과는 기존의 연구결과 (7), (12)와 동일하다. 전체적으로 T_{gas-liquid} 주입방법의 경우가 T_{liquid-gas} 주입방법에 비해 같은 입구 겉보기 속도 조건에서 상대적으로 기포 길이가 길어지는 경향이 있다는 것을 알 수 있다. 이에 대한 원인을 살펴보기 위하여 Fig. 5에 각 주입 방법에 대해 혼합 영역에서 기포가 생성되는 모습을 가시화한 결과를 나타내었다.

액체와 기체가 합류되는 지점에서 기포가 생성될 때 표면장력, 전단응력, 두 상(phase) 간의 압력차와 관성력의 관계에 의해 기포의 크기가 결정된다. 기포가 유로를 대부분 채워서 흐르는 테일러 유동이 주로 발생하는 영역, 즉 Capillary 수가 작은 영역에 대해서는 관성력이 상대적으로 매우 작게 되고, 액체의 압력이 기체를 밀어내면서 기포가 생성된다.⁽⁵⁾ Garstecki 등⁽²⁾은 T자형 혼합부에 대해 기포의 발생을 다음과 같이 2가지의 가정으로 정리하여 기포의 길이를 예측할 수 있는 식을 제안하였다. 첫 번째 가정은 기체가 액체를 가로막을 때의 기체 덩어리의 크기는 유로 너비와 거의 같다는 것이다(Fig. 5(a), $t=2$ msec). 두 번째 가정은 기체가 액체를 막고 나서 액체가 기체를 압박(squeezing, $t=3.3$ msec)하고 그로 인해 기체의 덩어리가 끊어져나갈 때 (pinch-off, $t=6$ msec)까지 기포가 계속 자라난다는 것이며 그것을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$L_B \approx D_h + t_c \cdot U_{growth} \quad (1)$$

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

즉, 압박 속도는 액체의 속도와 거의 같다고 할 수 있으며($U_{squeeze} \approx j_f$), 액체의 속도로 기체 덩어리(thread)를 붕괴(collapse)시킬 때까지의 시간을

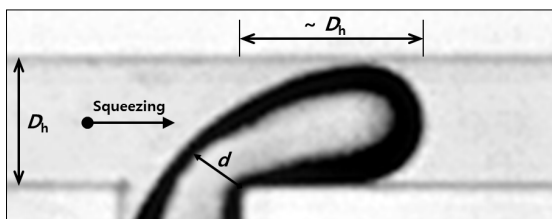


Fig. 6 Principle illustration of the initial step of bubble formation (Lee and Lee⁽¹²⁾)

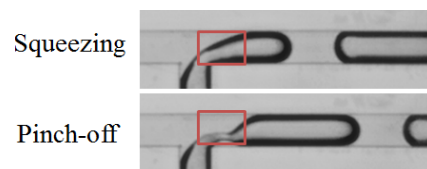
t_c 로 두면, $t_c = d/U_{squeeze}$ 가 된다. 이 때, d 는 기체가 끊어지기 시작할 때의 목(neck)의 특성길이라고 정의한다(Fig. 6). 그리고 액체가 압박을 가하여 끊어지는 순간까지 기체 덩어리는 계속 자라게 된다. 그 때의 속도를 U_{growth} 라 하고 이는 기체의 속도와 거의 유사하다고 할 수 있다 ($U_{growth} \approx j_g$). 위의 내용을 정리하면 기체 덩어리가 기포가 될 때까지의 길이는 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\frac{L_B}{D_h} = 1 + \alpha \frac{j_g}{j_f} \quad (2)$$

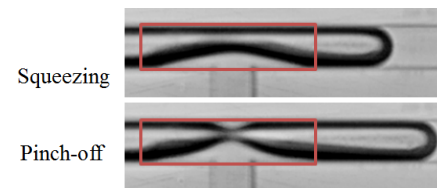
이 식에서 기체 덩어리가 붕괴될 때의 거리 d 와 유로의 크기가 거의 같다고 한다면 $d/D_h = \alpha \approx 1$ 의 관계가 성립한다.⁽²⁾

위 모델에서도 알 수 있듯이 액체가 기체를 압박하여 떨어지게 하는 시간이 중요하며, 이것은 기포가 발생하는 영역의 크기에도 많은 영향을 받게 된다. 즉, 액체가 기체를 압박하여 떨어지게 하는 영역(squeezing to pinch-off regime)의 크기가 클수록 액체를 채우는 공간이 커져야 하므로 시간이 많이 걸리게 되고, 따라서 기포의 크기가 커지게 된다. 이와 관련하여 Qian and Lawal⁽⁷⁾은 혼합 영역(mixing zone)이라는 개념을 도입하여 이 영역이 클수록 기포의 크기가 커짐을 설명하였다. Fig. 4의 겉보기 속도 조건에 대한 합류지점에서의 혼합 영역을 Fig. 7에 가시화하여 나타내었다.

T_{gas-liquid} 주입방법이 T_{liquid-gas} 주입방



(a) T_{liquid-gas} (Lee and Lee⁽¹²⁾)



(b) T_{gas-liquid}

Fig. 7 Comparison of mixing zones

법에 비해 혼합 영역의 크기가 매우 크게 되고, 따라서 그 영역을 채우는 액체의 양이 많이 필요하게 되어 기체가 생성되는 시간이 길어진다. 식 (1)에 대해 액체의 속도로 기체 덩어리(thread)를 붕괴(collapse) 할 때까지의 시간을 t_c 라고 할 때 T_{gas-liquid} 주입방법이 T_{liquid-gas} 주입방법에 비해 흘러가는 면적이 넓어서 t_c 가 증가하는 효과가 있으므로 α 값이 커진다. 따라서 T_{gas-liquid} 주입방법이 T_{liquid-gas} 주입방법에 비해 기포의 길이가 길어지는 Fig. 4와 같은 결과가 나타난다.

3.2 기포 속도

T_{gas-liquid} 주입방법을 이용하여 실험을 통해 측정된 기포의 속도를 Fig. 8에 나타내었다. 비교를 위하여 기존 T_{liquid-gas} 주입방법의 실험데이터⁽¹²⁾를 함께 나타내었다.

두 주입방법에서 모두 기체와 액체의 걸보기 속도가 증가하면 기포 속도가 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 두 주입방법간의 측정데이터 차이가 크지 않았으며, 이를 토대로 볼 때 기체 및 액체의 주입방법이 기포속도에는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

3.3 액체 슬러그 길이

T_{gas-liquid} 주입방법에 대해 실험을 통해 측정된 액체 슬러그의 길이를 Fig. 9에 나타내었다. 비교를 위하여 T_{liquid-gas} 주입방법의 실험데이터⁽¹²⁾도 함께 나타내었다. 두 주입방법 모두 액체 걸보기 속도가 일정한 조건에서 입구 기체 걸보

기 속도가 증가할수록 액체의 슬러그 길이가 감소하는 경향을 나타내었다.

Phorecki and Kula⁽⁵⁾는 테일러 유동에 대해 액체와 기체가 번갈아가며 유로의 한 부분을 채우면서 기포 및 액체 슬러그가 생성되는 것에 대해 스위칭 메커니즘을 제시하였고, 기포 길이는 액체 걸보기 속도에 반비례하고, 액체 슬러그 길이는 기체의 걸보기 속도에 반비례함을 개념적으로 제안하였다. Vökel⁽¹³⁾은 그와 같은 개념을 바탕으로 기포 길이의 예측식(식 (2))에 대해 액체와 기체의 항(term)을 교체한 다음과 같은 간단한 형태의 식을 제안하였다.

$$\frac{L_s}{D_h} = \beta_1 + \beta_2 \frac{j_f}{j_g} \tag{3}$$

식 (3)은 액체 걸보기 속도가 일정한 조건에서 기체 걸보기 속도가 액체 슬러그 길이와 반비례 관계에 있음을 잘 표현하고 있다.

한편, 동일한 입구 기체 걸보기 속도 조건에서 두 주입조건의 액체 슬러그 생성 길이에 대한 액체 걸보기 속도에 대한 경향은 차이가 있었다. T_{gas-liquid} 주입방법의 경우 비교적 낮은 입구 기체 걸보기 속도 조건(예를 들면 $j_g=0.2$ m/s)에서는 액체 걸보기 속도가 증가함에 따라 생성되는 액체 슬러그의 길이가 식 (3)에서와 같이 증가하는 경향을 보였다. 하지만 입구 기체 걸보기 속도가 증가함에 따라 증가율은 작아졌고 일정 입구 기체 걸보기 속도 조건 이상에서는 입구 액체 걸보기 속도 조건에 따라 액체 슬러그 길이가 크게 영향을 받지 않았다. 한편, T_{liquid-gas} 주입방

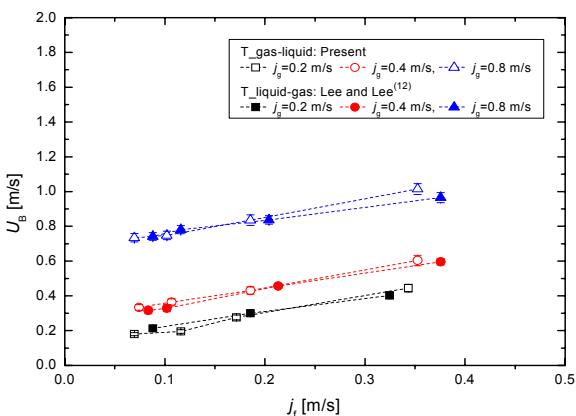


Fig. 8 General trend of bubble velocity (UB) in T_{liquid-gas} and T_{gas-liquid} with various inlet superficial velocity conditions

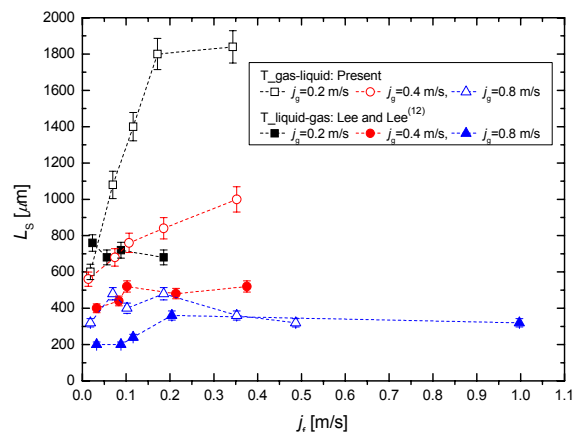


Fig. 9 General trend of slug length (L_s) in T_{liquid-gas} and T_{gas-liquid} with various inlet superficial velocity conditions

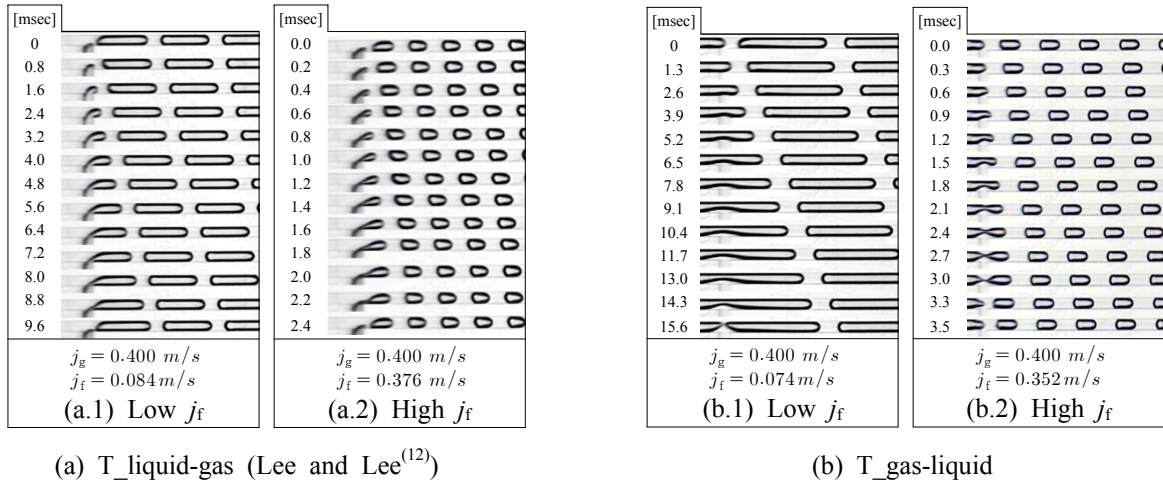


Fig. 10 Successive images of bubble generation for T_liquid-gas and T_gas-liquid

법의 경우에는 전체 입구 기체 겹보기 속도 조건에서 입구 액체 겹보기 속도가 액체 슬러그 길이 변화에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 관찰되었다.

이와 같은 경향에 대한 세부 분석을 위해서 Fig. 10에 두 주입방법의 합류지점에서의 가시화 결과를 나타내었다. 액체 겹보기 속도가 작을 경우(Fig. 10(a.1), (b.1)), 합류지점에서 기체의 가로막음이 용이해 기포의 길이가 긴 반면, 액체 겹보기 속도가 큰 경우(Fig. 10(a.2), (b.2)), 액체의 압박 압력(squeezing pressure)이 커지게 되고, 그에 의해 기포의 끊어짐(pinch-off)이 쉽게 발생하여 기포의 길이가 작아지게 된다. 즉, 액체 겹보기 속도가 증가할수록 액체 슬러그 길이가 증가하는 것이 아니라 기포를 짧게 끊게 되고, 액체 슬러그 길이는 그다지 변화가 없는 경향을 나타낸다. 따라서 식 (3)과 같이 액체 겹보기 속도가 증가하면 슬러그 길이가 증가하는 조건도 있지만 그렇지 않은 조건들도 존재하게 됨을 알 수 있다.

한편, 유사한 입구 겹보기 속도 조건에서 T_gas-liquid 주입방법의 경우가 T_liquid-gas 주입방법의 경우보다 액체 슬러그의 길이가 긴 것으로 측정되었고, 이는 기포 길이에서 언급한 혼합영역의 크기와 관계가 있다. 즉, T_gas-liquid 주입방법의 경우, 혼합영역이 커짐에 따라 기포를 압박하는(squeezing) 액체의 양도 많이 필요하게 되고, 그에 의해 액체 슬러그의 길이도 증가함을 알 수 있다.

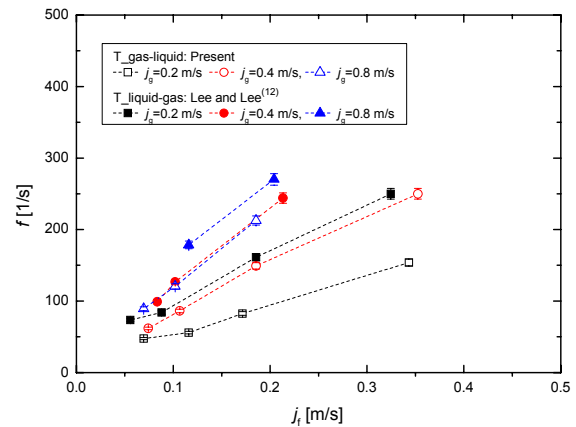


Fig. 11 General trend of bubble generation frequency (f_{UC}) in T_liquid-gas and T_gas-liquid with various inlet superficial velocity conditions

3.4 기포 생성 빈도

기포 생성 빈도와 관련하여, 본 실험에서 수행한 T_gas-liquid 주입방법 실험데이터와 기존 T_liquid-gas 주입방법 실험데이터⁽¹²⁾를 Fig. 11에 함께 나타내었다. 두 주입방법 모두 기체 및 액체 겹보기 속도가 증가할수록 기포 생성 빈도가 증가하였다.

기포 생성 빈도와 기포의 속도 및 단위 셀의 길이는 아래와 같은 관계를 가진다(Liu 등⁽¹⁴⁾).

$$f_{UC} = \frac{U_B}{L_{UC}} = \frac{U_B}{L_B + L_S} \quad (4)$$

위의 관계를 바탕으로 입구조건에 대한 기포 생성 빈도의 경향을 파악할 수 있다. 즉, 액체의 겹

보기 속도가 커지면, 기포의 속도(U_B)가 증가하고, 액체의 압박 압력이 커져서 기포 생성이 활발해진다. 그로 인해 기포의 개수가 늘어나면서 단위셀의 길이(L_{UC})가 작아짐에 따라 기포 생성 빈도가 증가하게 된다. 반면에 기체 걸보기 속도가 커지면 기포 속도(U_B)가 증가하여 기포 생성 빈도가 증가할 수 있다. 하지만 기체의 가로막음 또한 활발하게 되어 기포의 길이가 증가하게 되고, 이로 인해 단위셀의 길이(L_{UC}) 또한 증가하게 되어 기체 유량 증가에 대한 기포 생성 빈도 증가는 액체 유량의 영향보다는 작게 나타나게 됨을 알 수 있다.⁽¹²⁻¹⁵⁾

반면, 동일한 입구 걸보기 속도 조건에서 T_gas-liquid 주입방법의 경우가 T_liquid-gas 주입방법의 경우보다 기포 생성 빈도가 전체적으로 작게 측정되었다. 이는 기포 속도의 경우 두 주입방

법에서 크게 차이가 나지 않았으나(Fig. 8) T_gas-liquid 주입방법에서 기포 길이 및 액체 슬러그 길이가 더 길어지기 때문이다(Figs. 4 and 9).

3.5 실험데이터와 기존 상관식 간 비교

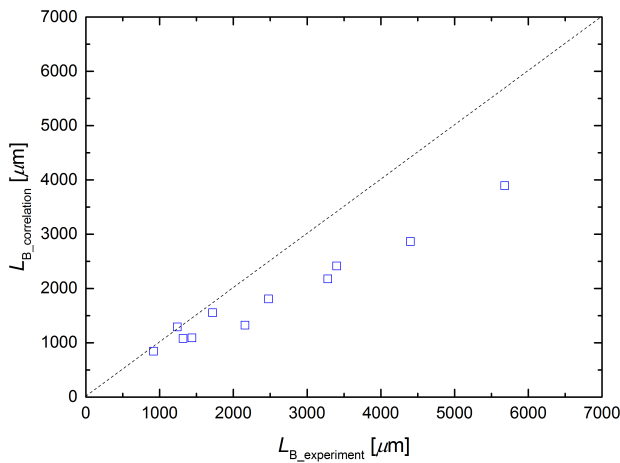
Lee and Lee⁽¹²⁾는 T_liquid-gas 주입방법에 대해 실험데이터를 바탕으로 기포 길이, 기포 속도, 액체 슬러그 길이에 대한 아래와 같은 상관식을 제안한 바 있다.

$$\frac{L_B}{D_h} = 1 + 0.7 \frac{j_g}{j_f} \quad (5)$$

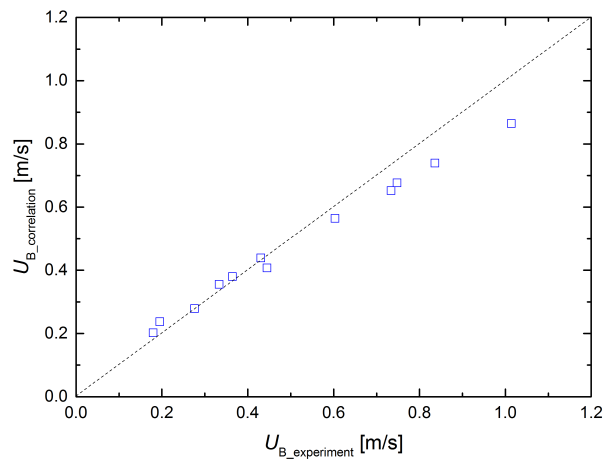
$$U_B = 0.75(j_f + j_g) \quad (6)$$

$$\frac{L_S}{D_h} = 0.5 + 0.9 \frac{j_f}{j_g} \quad (7)$$

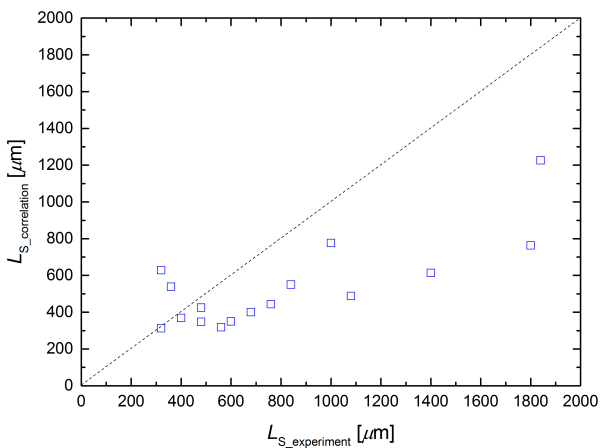
기포 생성 빈도는 식 (5), (6), (7)을 식 (4)에 대입



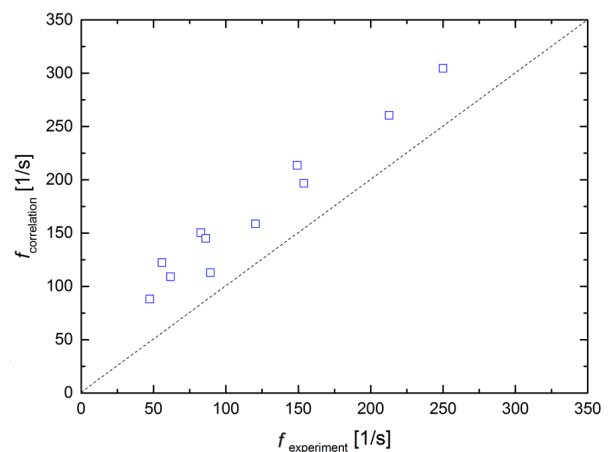
(a) Bubble length



(b) Bubble velocity



(c) Liquid slug length



(d) Bubble generation frequency

Fig. 12 Comparison of present experimental data with previous correlation of Lee and Lee⁽¹²⁾

하여 구할 수 있다. Fig. 12에 Lee and Lee⁽¹²⁾에서 제안한 상관식과 T_{gas-liquid} 주입방법의 실험데이터(기포 길이, 기포 속도, 액체 슬러그 길이, 기포 생성 빈도)를 비교하여 나타내었다.

기존 Lee and Lee⁽¹²⁾ 상관식은 본 연구에서 측정한 T_{gas-liquid} 주입방법의 기포 길이, 기포 속도, 액체 슬러그 길이, 기포 생성 빈도 실험데이터를 각각 ~24 %, ~9 %, ~39 %, ~55 %로 예측하였다. 이러한 차이는 Lee and Lee⁽¹²⁾ 상관식의 토대가 된 실험조건인 T_{liquid-gas} 주입방법과 본 실험에서 수행한 T_{gas-liquid} 주입방법 간 합류지점에서의 기포 및 액체 슬러그의 생성 거동의 차이 때문이다. 특히 기포 길이, 액체 슬러그 길이, 기포 생성 빈도의 경우 상관식과 실험데이터 간 차이가 크게 나타났는데 이는 상술했듯이 합류지점에서의 두 주입 방법 간 혼합 길이의 차이 때문이라 판단된다. T_{gas-liquid} 주입방법에서의 기포 길이, 기포 속도, 액체 슬러그 길이, 기포 생성 빈도를 정확하게 예측하기 위해서는 T_{gas-liquid} 주입방법의 합류지점에서의 기포 및 액체 슬러그 생성 거동(예를 들면 혼합 길이의 영향)을 반영한 상관식이 개발되어야 하며, 추후 이에 대한 연구를 수행할 예정이다.

4. 결론

본 연구에서는 600 μm 크기의 수력직경을 가지는 사각 마이크로 채널에서의 T자형 합류지점을 이용하여 기포 및 액체 슬러그 생성 거동에 대한 실험을 수행하였다. Main inlet에 질소, side inlet에 물을 주입하는 T_{gas-liquid} 주입조건으로 실험을 수행하였으며, main inlet에 물, side inlet에 질소를 주입하는 T_{liquid-gas} 주입조건에 대한 실험데이터와의 비교를 통하여 마이크로 T자형 합류지점에서 기체 및 액체의 주입 방법이 기포 및 액체 슬러그 생성 거동(즉, 기포 길이, 기포 속도, 액체 슬러그 길이, 기포 생성 빈도)에 미치는 영향을 파악하였다.

(1) 두 주입방법에서 기포 길이는 액체 걸보기 속도가 증가할수록 감소하였고, 기체 걸보기 속도가 증가할수록 증가하였다. T_{gas-liquid} 주입방법의 경우가 T_{liquid-gas} 주입방법에 비해 합류지점에서 더 긴 기포 길이를 생성하였다.

(2) 두 주입방법에서 기포 속도는 기체 또는 액체 걸보기 속도가 증가할수록 증가하였고,

T_{gas-liquid} 주입방법과 T_{liquid-gas} 주입방법 간 차이가 크게 나타나지 않았다.

(3) 액체 슬러그 길이의 경우 두 주입방법 모두 입구 기체 유량이 증가할수록 액체의 슬러그 길이가 감소하는 경향을 나타내었다. T_{liquid-gas} 주입방법의 경우에는 동일한 입구 기체 걸보기 속도 조건에서 입구 액체 걸보기 속도는 액체 슬러그 길이 변화에 크게 영향을 미치지 않았다. 하지만 T_{gas-liquid} 주입방법의 경우 비교적 낮은 입구 기체 걸보기 속도 조건 영역에서는 액체 걸보기 속도가 증가함에 따라 생성되는 액체 슬러그의 길이가 급격하게 증가하는 경향을 보였다.

(4) 기포 생성 빈도는 기포 속도와 유사하게 기체 또는 액체 걸보기 속도가 증가할수록 모두 증가하였다. T_{liquid-gas} 주입방법의 경우가 T_{gas-liquid} 주입방법에 비해 높은 기포 생성 빈도를 나타내었다.

(5) T_{liquid-gas} 주입방법에서 개발된 기존 Lee and Lee⁽¹²⁾ 상관식은 T_{gas-liquid} 주입방법의 기포 길이, 기포 속도, 액체 슬러그 길이, 기포 생성 빈도 실험데이터를 각각 ~24 %, ~9 %, ~39 %, ~55 %로 예측하였다.

(6) 마이크로 T자형 합류지점에서 기체 및 액체의 주입방법이 기포 및 액체 슬러그 생성에 크게 영향을 미친다는 것을 파악하였고, 이는 주입방법에 따라 합류 지점에서의 거동이 크게 영향받기 때문이다. 향후 연구에서는 본 연구의 실험결과를 바탕으로 T_{gas-liquid} 주입방법에 대해 기포 길이, 기포 속도, 액체 슬러그 길이, 기포 생성 주파수를 예측할 수 있는 모델을 개발하고자 한다.

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) 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.
- (6) 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.
- (7) Qian, D. and Lawal, A., 2006, "Numerical Study on Gas and Liquid Slugs for Taylor Flow in a T-junction Microchannel," *Chem. Eng. Sci.* 61, pp. 7609~7625.
- (8) Guo, F. and Chen, B., 2009, "Numerical Study on Taylor Bubble Formation in a Micro-channel T-junction Using VOF Method," *Microgravity Sci. Technol.* 21, pp. 51~58.
- (9) Mansour, M., Kawahara, A. and Sadatomi, M., 2014, "Numerical Investigation of Two-phase Flow Through a T-junction Microchannel Reactor," *Journal of Environmental Science and Engineering A.* 3, pp 42~54.
- (10) Arias, S., Legendre, D., and Gonzalez-Cinca, R., 2012, "Numerical Simulation of Bubble Generation in a T-junction," *Computers & Fluids* 56, pp. 49~60.
- (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, J. K. and Lee, K. G., 2015, "Prediction of Two-phase Taylor Flow Characteristics in a Rectangular Micro-channel," *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. B., Vol.3*, pp. 557~569.
- (13) Vökel, N., 2009, "Design and Characterization of Gas-liquid Microreactors," *Ph.D Thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, France.*
- (14) 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.
- (15) 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.