

# 마이크로 채널 내 혼합부 형상이 2상 유동 양식에 미치는 영향에 대한 연구

## Effect of Various Shapes of Mixer Geometry on Two-Phase Flow Patterns in a Micro-Channel

이관근(Kwan Geun Lee)<sup>1</sup>, 이준경(Jun Kyoung Lee)<sup>1\*</sup>, 박태현(Taehyun Park)<sup>1</sup>,  
김교남(Gyo Nam Kim)<sup>2</sup>, 박은주(Eun Ju Park)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>경남대학교 기계공학부, <sup>2</sup>경남대학교 식품생명공학과, <sup>3</sup>경남대학교 식품영양학과

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Kyungnam University, Changwon, 631-701, Korea

<sup>2</sup>Department of Food Science and Biotechnology, Kyungnam University, Changwon, 631-701, Korea

<sup>3</sup>Department of Food and Nutrition, Kyungnam University, Changwon, 631-701, Korea

(Received September 3, 2014; revision received November 4, 2014; Accepted: November 13, 2014)

**Abstract** The effect of inlet mixer geometries on the two-phase flow patterns in square micro-channel with 600×600  $\mu\text{m}$  was investigated experimentally in this paper. The 4 different mixer configurations based on the Y, Impacting, and two T types (gas and liquid inlets were switched) were used. The test fluids were nitrogen and water. The liquid and gas superficial velocities were 0.01~10 m/s and 0.1~100 m/s, respectively. Several distinctive flow patterns, namely, annular, slug-annular, slug, slug-bubbly, bubbly, and churn flow could be seen. The flow pattern maps for each mixer were suggested, and it can be concluded that two-phase flow patterns are not very sensitive to the mixer geometries. But the mixing behaviors of gas and liquid for each mixer were different for slug and bubbly flow. Thus, the characteristics of slug and bubble for each case were not same.

**Key words** Micro-channel(미세관), Mixer(혼합기), Two-phase flow(이상유동), Flow Pattern(유동양식)

\* Corresponding author, E-mail: [jkleee99@kyungnam.ac.kr](mailto:jkleee99@kyungnam.ac.kr)

### 기호설명

$j_g$  : 기체 겉보기 속도 [m/s]

$j_f$  : 액체 겉보기 속도 [m/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, 마이크로채널 내의 2 상 유동에 대한 연구도 유동패턴, 압력강하, 상변화 열전달 등 다양한 분야에서 진행이 되어왔다.<sup>(1)</sup>

항노화 Micro chip 분야에서도 액체시료 자체나 시료 내 물질의 성분 분석에 대해 기체를 이용하여 액체의 슬러지를 만들어 적은 양의 시료로도 분석이 가능하게끔 만드는 기술이 요구되고 있고, 이에 액체와 기체를 임의의 혼합기를 통해 동시에 주입하여 원하는 만큼의

액체 슬러지(기포 크기)를 만들어내는 것이 매우 중요하다. 특히 제작 과정상 다양한 형태의 혼합기(Mixer)가 만들어질 수 있고, 같은 액체와 기체의 조건에 대해서도 혼합기 형태에 따라 합류 이후의 기체 및 액체(특히, 기포 및 액적)의 유동형태가 달라질 수 있다.

마이크로 크기에서의 기체와 액체의 2상 유동 혼합기에 대해, 제작의 용이성으로 인해 가장 일반적으로 많이 사용이 되는 것이 T자 형태이며, Xu et al.,<sup>(2)</sup> Haverkamp et al.<sup>(3)</sup> 그리고 그 외 많은 연구자들이 그것을 활용하여 마이크로 채널 내 2상 유동 현상에 대한 연구를 수행하였다. Kawaji et al.<sup>(4)</sup> 등은 T 형태와 reducer 형태의 2상 유동 혼합기가 하류 미소 채널 내 2상 유동 양식에 미치는 영향을 보고하면서, 2상 유동 혼합기(또는 입구 조건)의 형상이 2상 유동의 특성에 미치는 영향이 큼을 보고하였다. Waelchli and Rohr<sup>(5)</sup>는 충돌 T자형(Impacting type)에 대해 직경이 다른 두 원관을 이용한 동심형 혼합기를 사용한 Triplett et al.<sup>(6)</sup>의 유동양식 선

도와 유사함을 보고하였다. Yue et al.<sup>(7)</sup>은 Y 자형 혼합기에 대해 200 및 400  $\mu\text{m}$ 의 수력직경을 가지는 사각 채널에 대해 물과  $\text{CO}_2$ 를 이용하여 실험을 수행하였으며, Haverkamp et al.<sup>(3)</sup>은 교차형(Cross) 혼합기에 대해 수직형과 곡선형(Smooth)의 두 가지 형태를 사용하고, 중앙부 메인채널은 기체를, 양측면은 액체를 주입하여 균일한 기포나 슬러그를 형성해 주었다. 혼합기 형태에 따라 기포의 크기가 달라짐을 확인하였으나, 유동양식에 대한 연구를 체계적으로 수행한 것은 아니었다.

기존 연구 결과를 통해, 마이크로 채널의 경우 여러 가지 형태의 2상 유동 혼합기를 사용하고 있으며, 일반적인 상용관(5 mm 이상)의 경우와는 달리 혼합기의 형태에 따라 채널 내 유동 양식이나 기공률, 그리고 압력 강하 등이 다르게 나타남을 확인할 수 있었다. 그러나 기존의 각 연구를 종합하여 혼합기 형태의 2상 유동 형태에 미치는 영향을 정확히 파악할 수 없는 이유는 각 연구에서 사용한 마이크로 채널의 크기가 각각 다르고, 그에 의해 유동양식의 변화가 혼합기의 형상에 대한 영향인지, 채널의 크기에 대한 영향인지가 명확하지 않기 때문이다.

따라서 혼합기 형태가 마이크로 채널 내 유동양식의 변화에 미치는 영향을 정확히 살펴보기 위해서는 일정한 크기의 마이크로 채널에 대해, 여러 형태의 혼합기를 이용하여 2상 유동을 만들어 내는 경우의 유동 양식 변화에 대한 연구를 수행할 필요가 있다. 본 연구에서는 4가지 혼합기의 형태 즉, T type이지만 기체와 액체

의 입구 방향이 반대인 2가지 경우(T, T inverse), Y 그리고 Impacting type의 혼합기를 마이크로 크기로 제작하고, 기체와 액체의 유동 조건을 다양하게 설정하여, 나타나는 2상 유동 양식을 유동가시화를 통해 파악하였다. 그리고 그 결과를 유동양식 선도에 나타냄으로써, 혼합기의 형상이 2상 유동 양식에 미치는 영향을 자세히 살펴보았다.

## 2. 실험장치 및 방법

4가지 형태의 혼합기에 대한 2상 유동 양식의 변화 현상을 살펴보기 위하여 Fig. 1과 같은 실험 장치를 구성하였다. 실험부에 대해 유동가시화를 위해서 Polymethyl methacrylate(PMMA)로 제작하였으며, 유로의 단면은  $600\ \mu\text{m} \times 600\ \mu\text{m}$  크기의 사각 형태이고 혼합부 이후 길이는 5 cm이다. 각 형태의 2상 유동 양식에 대한 영향을 살펴보기 위해 유로의 크기는 유지하되 혼합부만 Fig. 2와 같이 변화시켜가며 시험부를 제작하였다. 작동유체로서 액체는 물을, 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 수평으로 설치된 마이크로 채널을 흐르게 되며, 유동가시화는 고속카메라(MotionPro Y3, IDT Co.)와 스트로보를 활용한 디지털 카메라를 활용하여 유동가시화를

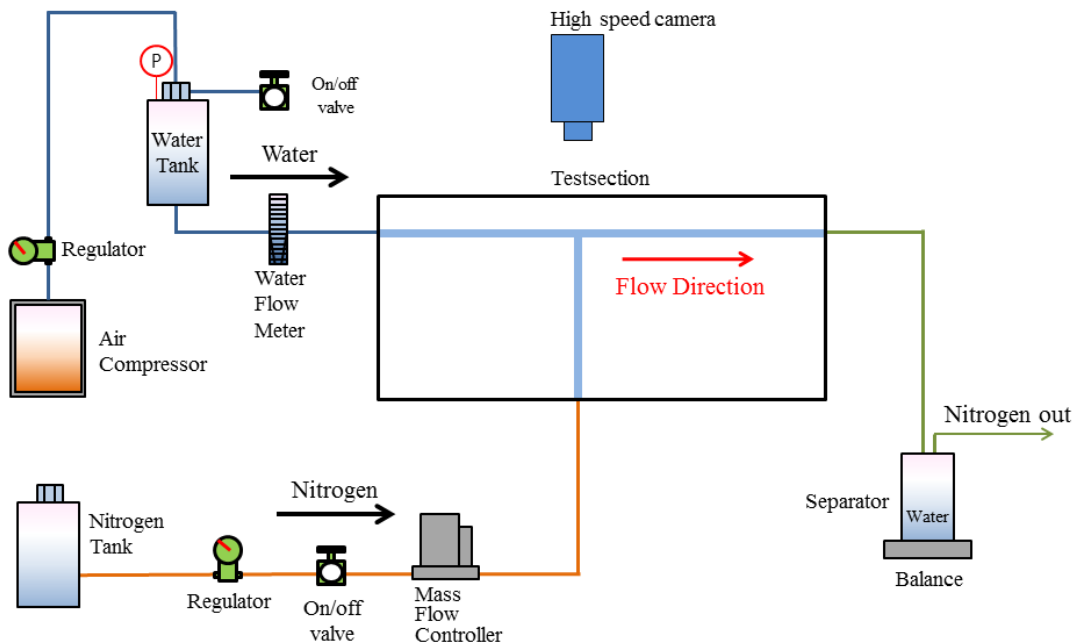


Fig. 1 Experimental setup.

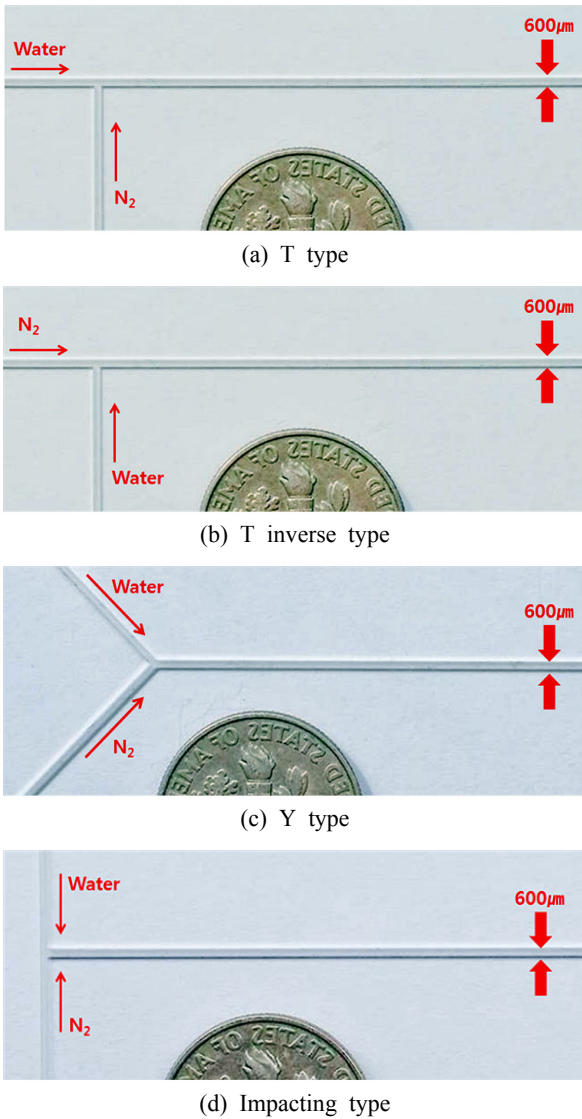


Fig. 2 Photographs of test section.

수행하였다. 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  $0.01 \sim 10 \text{ m/s}(j_i)$  및  $0.1 \sim 100 \text{ m/s}(j_s)$ 로 설정하여 실험을 수행하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 유동양식

본 실험에서 사용한 4가지 혼합기로 만들 수 있는 대표적인 유동 형태를 Fig. 3에 정리하였다. 환상류((a))의

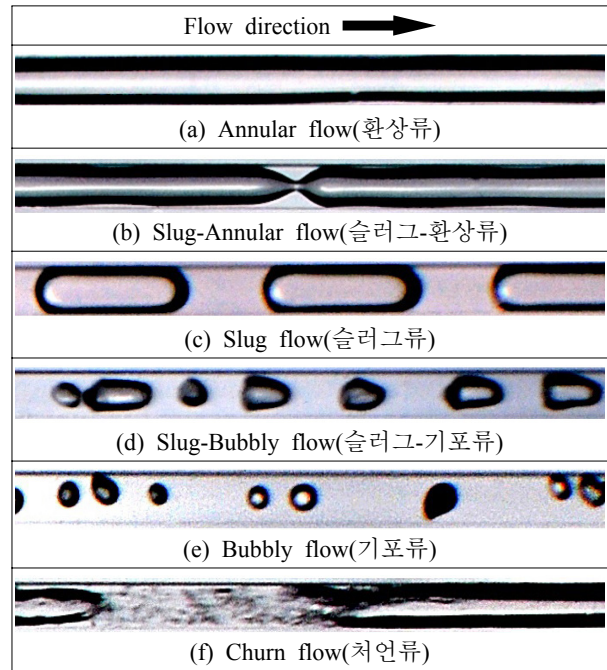


Fig. 3 Flow patterns.

경우 채널 벽을 따라 지속적으로 액체 필름이 둘러싸인 형태를 유지하며, 슬러그-환상류((b))는 매우 길고 끊어지지 않는 기체 슬러그가 생성된다. 슬러그류((c))의 경우 기체/액체 슬러그 대부분이 규칙적이고 매우 부드러운 모양이 형성되며, 슬러그-기포류((d))의 경우 불규칙한 슬러그와 기포가 생성되며, 기포류((e))는 연속적인 액체상에서 채널의 직경보다 작은 기포가 뿌려지는 것을 관찰할 수 있다. 마지막으로 치언류((f))의 경우 액체유량과 기체유량이 모두 매우 높은 경우에 발생하며, 슬러그류와 유사하지만 매우 빠른 속도 때문에 관찰력이 생기며, 이로 인해 형상이 이탈되는 모습을 볼 수 있다.

#### 3.2 유동양식선도(Flow Pattern Map)

혼합기 형상에 따른 유동양식선도를 Fig. 4에 각각 나타내었다. 각 형상에 대해 슬러그-기포류를 제외한 5가지 유동 형태(Bubbly, Slug, Slug-Annular, Annular, Churn flow)에 대해 유동양식 경계를 선으로 나타내었다.

혼합기 형상이 변화함에 따라 유동양식 선도가 크게 변하지 않음을 확인할 수 있었다. 이를 보다 더 자세히 살펴보기 위해 본 실험에서 수행한 모든 혼합기 형상에 대한 유동양식 선도를 Fig. 5에 동시에 나타내었다. 기포류와 슬러그류의 경계, 환상류와 슬러그-환상류의 경계(flow transition line)가 혼합기 형상에 따라 달라지기는 하지만, 그 영향은 크지 않음을 확인할 수 있다. 그

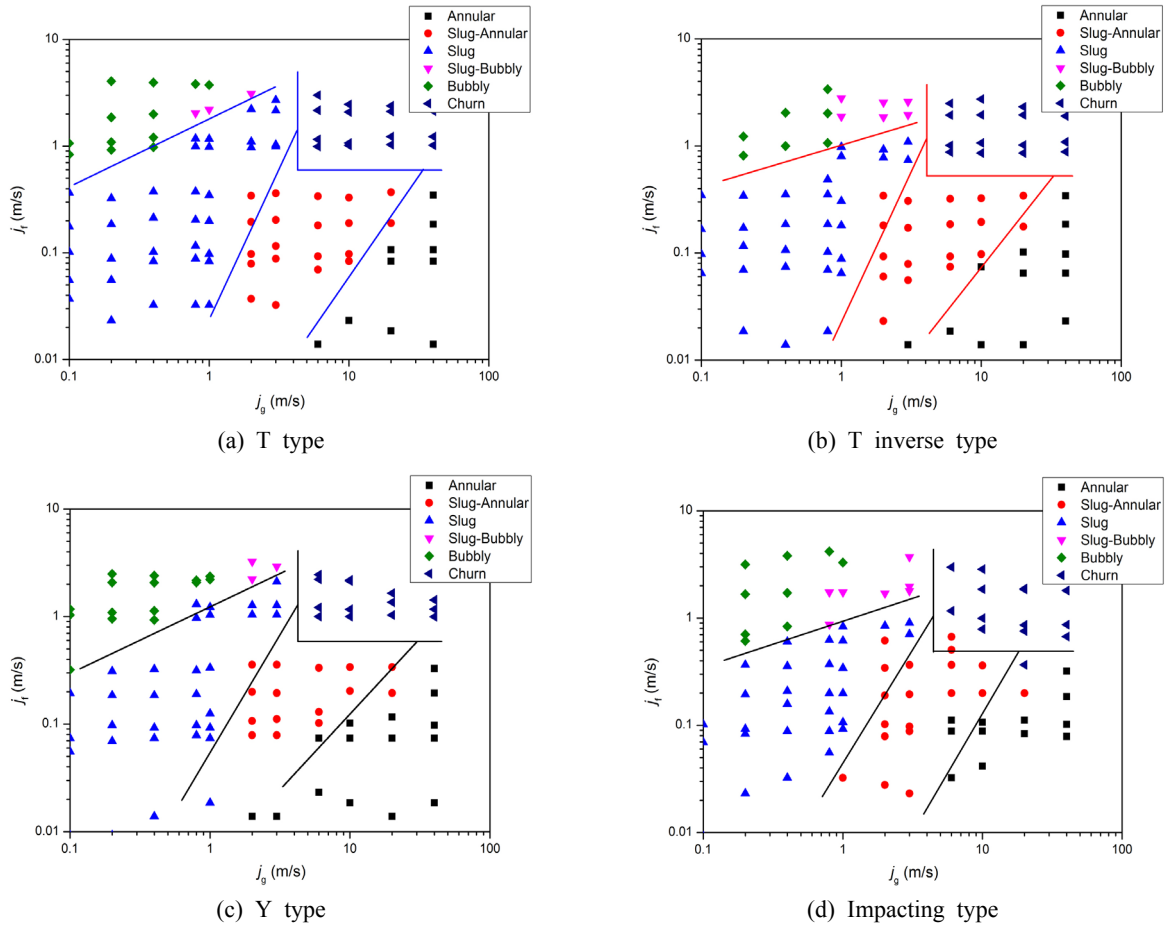


Fig. 4 Flow pattern maps with different mixer geometries.

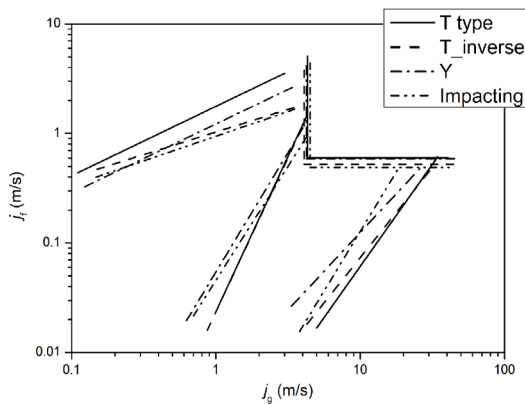


Fig. 5 Comparisons of flow pattern transition boundaries with different mixer geometries.

이유를 살펴보기 위하여 유사한 입구조건에 대해 각 혼합기 형상으로 만들어지는 2상 유동의 가시화 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 기체 및 액체의 걸보기 속도가 유

사한 조건에 대해서 하류에서의 유동양식이 유사함을 볼 수 있다. 기체의 유량이 큰 환상류의 경우는 액체와 기체가 만나는 각도는 다르다고 할지라도, 기체의 모멘텀이 매우 커서 액체가 벽으로 흐르는 양상이 매우 유사하게 나타난다. 그러므로 슬러그류와 환상류의 경계와 처연류의 경계가 4가지 다른 혼합기 형태에 대해 거의 유사함을 확인할 수 있다.

그러나 기체의 유량이 적은 슬러그류와 기포류의 경우에는 혼합부의 형상에 따라 기포가 생성되는 형태가 다를 수 있으며, 그에 따라 기포의 형태와 크기가 달라짐을 확인할 수 있다. 즉, 같은 T 형태라도 액체와 기체의 입출구가 반대인 2개의 혼합부 형상에 대해 T 형태는 액체가 움직이며 기체를 끌어내는(drag) 방식으로 슬러그를 형성하는데 반해, T inverse 형태는 액체가 기체를 눌러(squeezing) 슬러그를 형성하고 있음을 볼 수 있다. Y 형태는 전술한 2가지 형태의 혼합 방식으로 슬러그를 형성하며, Impacting 형태는 T inverse 형태와 유사하기는 하나 액체와 기체의 충돌 후에 액체





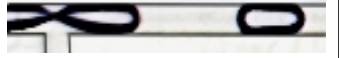

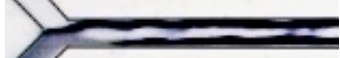


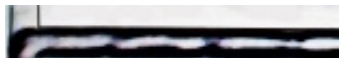
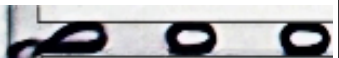

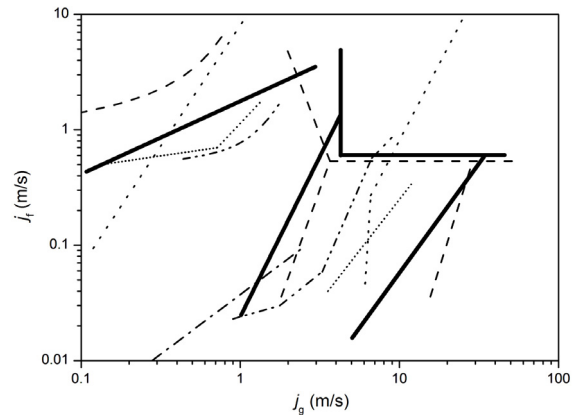
| Pattern Type | Annular   | Slug  | Bubbly   |
|--------------|---|---|--|
| T            | <br>$j_f = 0.3748 \text{ m/s}$<br>$j_g = 40 \text{ m/s}$ | <br>$j_f = 0.1855 \text{ m/s}$<br>$j_g = 0.2 \text{ m/s}$ | <br>$j_f = 1.9943 \text{ m/s}$<br>$j_g = 0.4 \text{ m/s}$ |
| T_inverse    | <br>$j_f = 0.3432 \text{ m/s}$<br>$j_g = 40 \text{ m/s}$ | <br>$j_f = 0.1716 \text{ m/s}$<br>$j_g = 0.2 \text{ m/s}$ | <br>$j_f = 2.0406 \text{ m/s}$<br>$j_g = 0.4 \text{ m/s}$ |
| Y            | <br>$j_f = 0.3293 \text{ m/s}$<br>$j_g = 40 \text{ m/s}$ | <br>$j_f = 0.1855 \text{ m/s}$<br>$j_g = 0.2 \text{ m/s}$ | <br>$j_f = 2.0685 \text{ m/s}$<br>$j_g = 0.4 \text{ m/s}$ |
| Impacting    | <br>$j_f = 0.3200 \text{ m/s}$<br>$j_g = 40 \text{ m/s}$ | <br>$j_f = 0.1948 \text{ m/s}$<br>$j_g = 0.2 \text{ m/s}$ | <br>$j_f = 1.7160 \text{ m/s}$<br>$j_g = 0.4 \text{ m/s}$ |

Fig. 6 Flow visualizations for different mixer geometries with similar inlet conditions.

가 기체를 눌러 슬러그를 형성하고 있다. 기포류도 슬러그류와 유사한 형태로 기포를 형성하고 있음을 확인할 수 있다. 이처럼 혼합기 형태에 따라 슬러그와 기포를 생성해내는 방식이 서로 다르므로, 슬러그와 기포의 크기와 생성주기, 속도 등이 혼합부 형태에 따라 다를 수 있음을 확인할 수 있었고, 향후에는 이에 대한 자세한 연구가 필요하다. 그리고, 이런 차이로 인해 기포류와 슬러그류의 유동경계선은 각 경우에 대해 비교적 차이가 나타남을 확인할 수 있다.

본 연구에서 수행한 결과와 기존의 여러 혼합부 형상에 대한 2상 유동 양식 연구결과를 비교하기 위해, Fig. 7에 비교적 유사한 크기의 유로에 대한 유동 양식선도를 1개의 유동양식선도에 모두 나타내었다. 본 연구에서는 혼합부 형상에 대해 유동양식이 크게 다르지 않았으므로, 대표적으로 T 형 혼합부의 유동양식선도를 나타내었다.

기포류와 슬러그류의 경계를 제외한 대부분의 경우 Triplett et al.<sup>(6)</sup>의 연구결과와 유사함을 확인할 수 있었다. 특히 Triplett et al.<sup>(6)</sup>은 본 연구에서 살펴본 혼합부 형태와는 많이 다른 동심관 형태의 혼합부를 사용하였고, 그 결과가 본 연구결과와 유사함을 볼 때 입구의 형상이 유동양식에 미치는 영향이 그리 크지 않음을 확인할 수 있다. 그러나 기포류와 슬러그류의 유동경계선에 대해서는 입구부 형상에 따른 차이가 존재하며, Fig. 6에서도 살펴보았듯이 슬러그나 기포의 거동까지 같지는 않음이 중요하며 이에 대한 자세한 연구가 필요하다.



| Line  | Authors                              | Inlet Type  | Microchannel Shape | Hydraulic Diameter (μm) |
|-------|--------------------------------------|-------------|--------------------|-------------------------|
| —     | Present                              | T type      | Rectangular        | 600                     |
| ----  | Triplett et al. <sup>(6)</sup>       | Radial hole | Circular           | 1097                    |
| - - - | Cubaud and Ho <sup>(8)</sup>         | Cross       | Rectangular        | 200                     |
| ..... | Waelchli and von Rohr <sup>(9)</sup> | T-junction  | Rectangular        | 187                     |
| ..... | Yue et al. <sup>(10)</sup>           | Y-junction  | Rectangular        | 200                     |

Fig. 7 Comparisons of flow pattern transition boundaries with previous researches.



#### 4. 결 론

마이크로 채널에 대해 혼합기 형상이 2상 유동양식에 미치는 영향을 살펴보는 기초연구로, 각 혼합기 형상을 변화시키며 여러 입구 조건에 대한 실험을 수행하였다. 본 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 4개의 다른 형상을 가진 혼합기에 따른 2상 유동양식 선도를 정리하였고, 혼합기 형태에 따라 유동양식 선도가 크게 변하지 않음을 확인할 수 있었다.
- (2) 슬러그류나 기포류에 대해 혼합기의 형태에 따라 슬러그와 기포가 생성되는 메커니즘이 틀림을 유동가시화를 통해 확인할 수 있었다. 그에 의해 슬러그와 기포의 크기나 속도 등의 거동도 달라짐을 확인하였고, 유동양식선도도 차이가 존재함을 확인할 수 있었다. 보다 정확한 특성에 대한 파악은 향후 연구를 통해 살펴볼 계획이다.

#### 후 기

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

#### References

1. Shui, L., Eijkel, J. C. T., and Berg, A. V. D., 2007, Multiphase flow in micro- and nanochannels, *Sensors and Actuators B : Chemical*, Vol. 121, No. 1, pp. 263-276.
2. Xu, J. H., Li, S. W., Wang, Y. J., and Luo, G. S., 2006, Controllable gas-liquid Phase flow patterns and monodisperse microbubbles in a microfluidic T-junction device, *Applied Physics Letter*, Vol. 88, No. 13, p. 133506.
3. Haverkamp, V., Hessel, V., Lowe, H., Menges, G., Warnier, M. J. F., Rebrov, E. V., Croon, M. H. J. M. D., Schouten, J. C., and Liauw, M. A., 2006, Hydrodynamics and mixer-induced bubble formation in micro bubble columns with single and multiple-channels, *Chemical Engineering Technology*, Vol. 29, No. 9, pp. 1015-1026.
4. Kawaji, M., Mori, K., and Bolintineanu, D., 2009, The effects of inlet geometry and gas-liquid mixing on two-phase flow in microchannels, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 131.
5. Waelchli, S. and Rohr, P. R. V., 2006, Two-phase flow characteristics in gas-liquid microreactors, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 327, No. 7, pp. 791-806.
6. Triplett, K. A., Ghiaasiaan, S. M., Abdel-Khalik, S. I., and Sadowski, D. L., 1999, Gas-liquid two-phase flow in microchannels-Part I : two phase flow patterns, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 25, No. 3, pp. 377-394.
7. Yue, J., Luo, L., Gonthier, Y., Chen, G., and Yuan, Q., 2008, An experimental investigation of gas-liquid two-phase flow in single microchannel contactors, *Chemical Engineering Science*, Vol. 63, No. 16, pp. 4189-4202.
8. Cubaud, T. and Ho, C. M., 2004, Transport of bubbles in square microchannels, *Physics of Fluids*, vol. 16, No. 12, pp. 4575-4585.
9. Waelchli, S. and Rohr, P. R. V., 2006, Two-phase flow characteristics in gas-liquid microreactors, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 327, No. 7, pp. 791-806.
10. Yue, J., Chen, G., and Yuan, Q., 2004, Pressure drops of single and two-phase flows through T-type microchannel mixers, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 102, No. 1, pp. 11-24.