

수평 마이크로 T 자관에서 2상 환상류 유동분배에 관한 연구

이 준 경[†], 조 성 일
경남대학교 기계자동차공학부

Study on Dividing Two-phase Annular flow in a Horizontal Micro T-junction

Jun Kyoung Lee[†], Seong il Jo

Department of Mechanical Engineering, Kyungnam University, Masan 631-701, Korea

(Received June 16, 2010; revision received October 28, 2010)

ABSTRACT: The objective of the present study is to investigate the dividing two-phase flow in a horizontal micro T-junction with the same rectangular cross section, 800 μm ×800 μm , experimentally. Air and water were used as the test fluids. The superficial velocity ranges of air and water were 15~20 m/s and 0.11~0.2 m/s, respectively. Dividing flow characteristics at the micro T-junction are different from those at the larger T-junctions (5~10 mm in hydraulic diameter). Compared with the results of previous works related with the T-junction with mini cross sections (about 5 mm), for lower range of gas separation, the fraction of the liquid separated through the branch decreases for the fixed fraction of the gas separation. But for higher range of gas separation, higher liquid separation could be found.

Key words: Micro T-junction(마이크로 T자관), Dividing flow(유동 분배), Two-phase(2상), Annular flow(환상류)

기 호 설 명

A	: 단면적 [m^2]
D	: 관의 수력직경 [m]
F_i	: 관성력 [N]
F_c	: 구심력 [N]
F_s	: 표면장력 [N]
j	: 결보기 속도(= $W/(\rho \cdot A)$) [m/s]
P	: 압력 [bar]
W	: 질량 유량 [kg/s]
ρ	: 밀도 [kg/m^3]

g	: 기체 (air)
m	: 입구관(main)
b	: 분지관(branch)
r	: 출구관(run)

1. 서 론

최근 마이크로 가공 기술이 발달함에 따라 그를 활용한 많은 디바이스들이 개발되었고, 그 중 고 효율 및 실용화 등에서 각광을 받고 있는 시스템으로는 마이크로 연료전지, 마이크로 열교환기, 마이크로 반응기 등이 있다. 그러한 마이크로 디바이스의 효율을 높이기 위해 하나의 시스템이 직렬이나 병렬 형태 등의 모듈로 구성되어 있고, 각 모듈에 분배되는 유체의 조건을 동일하게 해주거나 우리가 원하는 대로 제어할 수 있게 해준다면 매우 효율이 높은 시스템을 구축할 수 있게 된다.

하 첨 자

f : 액체(water)

[†] Corresponding author

Tel.: +82-55-249-2613; fax: +82-55-249-2617

E-mail address: jklee99@kyungnam.ac.kr

예를 들어, 마이크로 연료전지의 경우는 여러 개의 MEA가 1개의 stack으로 구성이 되고, 그러한 스택(stack)이 모듈로 구성이 되어 하나의 시스템을 이루게 된다. 효율을 증가시키기 위해 스택과 스택을 병렬로 연결하여 하나의 연료전지 시스템을 구성할 경우, 캐소드(Cathode)에서는 산소가 수소와 결합하여 물이 발생하여 스택 출구에서는 물과 산소의 2상 유동이 발생하게 된다. 다음 스택으로 연결이 될 경우, 2상 유동의 분배가 발생하게 된다. 그리고 마이크로 열교환기의 경우에는 국부적인 냉각이 필요한 경우에 대해, 여러 개의 마이크로 증발기를 필요지점에 배치시키게 되고, 각 증발기로의 2상 유동 분배가 중요하게 된다. 모듈로 이루어진 시스템이 아니라도, 여러 개의 채널이 하나의 헤더로 연결되어 있는 많은 마이크로 디바이스의 경우는 각 채널로의 균등한 분배를 위해서는 2상 유동 분배에 대한 연구가 반드시 필요하게 된다. 그러나 마이크로 영역에서의 유동 분배현상에 대해서는 연구가 거의 진행되지 않은 실정이다.

기존의 분기관(T-junction)에서의 2상 유동 분배에 관한 연구는 주로 30 mm 이상의 비교적 큰 관에 대해서 이루어졌다. Stacey et al.⁽¹⁾은 5 mm 수평 분기관에 대한 연구를 수행, Hong⁽²⁾의 9.5 mm 연구결과와 30 mm, 125 mm의 경우에 대해 비교, 분석하여 입구 조건이 동일한 경우 10 mm 미만의 입구관(inlet), 출구관(run) 및 분기관(branch)이 동일 단면적을 갖는 소형관에 대해 큰 관에 비해서 액체 분기비가 커짐을 발견하였다. 그리고 Lee and Lee⁽³⁾는 8 mm×8 mm 수직 분기관에 대한 실험결과를 기존의 큰 관과 Stacey et al.⁽¹⁾의 결과와 비교, 분석하여 소형 분기관의 경우 입구관의 방향은 무시할 수 있다고 보고하였다. 이는 수평관에 대해 관이 작아지면서 입구관 액막이 중력보다는 표면장력의 영향에 의해 관전체에 골고루 분포하기 때문이다. Mak et al.⁽⁴⁾도 5 mm의 수직 원형 분기관에 대한 분기 실험을 수행하여 Lee and Lee⁽³⁾의 결과와 유사한 경향을 얻어내었다. 이러한 결과들은 모두 5 mm(5 mm 이상 10 mm 미만의 관으로 이후 소형관으로 명명) 이상의 소형관에 대한 결과들이고, 그러한 결과를 그대로 마이크로 사이즈에 대해 적용을 하는 것은 기존의 마이크로 사이즈에 대한 2상 유동의 연구 결과를 통해 유추해보면 매우 힘들다는 것을 알 수 있다. 따라서 1 mm 미만의 T자관에 대한 분배 연구가 실험적으로 수행되어야 함을 알 수 있다.

그와 관련하여 Lim⁽⁵⁾은 $600 \times 600 \mu\text{m}^2$ 정사각형 단면을 가지는 T자관에서 입구관이 플러그류 영역에 대해서 물과 공기를 이용하여 실험을 수행하였다. 그러나 소형관이나 대형관과의 비교에 대한 어떠한 데이터도 없기 때문에 사이즈 변화에 대한 전체의 경향을 파악할 수가 없고, 입구 유동패턴도 플러그류에만 한정하여, 실제로 적용하기에도 한계가 존재하였다. 따라서 플러그류 이외의 환상류, 기포류 등에 대해서도 실험을 수행하여 일반적인 분기현상에 대해 정리할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 1 mm 미만의 T자관에 대한 2상 유동 분배 현상을 파악하고 그에 대한 유동 분배 모델을 개발하기 위한 기초 연구로 $800 \mu\text{m}$ 의 수력직경(D_h)을 가지는 정사각형 단면을 가진 모관(main)과 동일한 단면적을 가지는 분기관(branch) 및 출구관(run)이 연결된 수평 T형 연결구내의 2상 유동 분배에 대한 실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

수평 분기관을 갖는 수평 마이크로 T형 분기관의 분배현상을 살펴보기 위해서 Fig. 1 및 Fig. 2와 같은 실험 장치를 구성하였다. 실험부에 대해 유동가시화를 위해서 아크릴로 제작하였으며 유로의 크기는 $800 \mu\text{m} \times 800 \mu\text{m}$ 이다. 분기시 압력분포를 얻기 위해 압력측정부를 가공하였고, Fig. 2에 그 지점을 표시하였다. 액체는 물을, 기체는 공기를 작동유체로 사용하였다. 압축기에 의해 압축된 공기는 정압기(pressure regulator)와 유량계(Dwyer, 700 cc/min 및 5 L/min)를 거쳐 혼합부(mixer)로 유입되고, 액체는 저장탱크로부터 마이크로 기어펌프(micro gear pump)와 유량계(Dwyer, A152, 100 cc/min)를 거쳐 혼합부로 각각 유입된다. 혼합된 2상 유체는 분기부에서 분기관과 출구관으로 분기되는데, 하류에 각각 설치된 니들밸브(needle valve)를 이용하여 분기량을 조절하였다. 이 때 분기부분(P_{ms})의 계기압력은 0.5 bar로 고정하였다. 분기된 2상 유체는 분기관과 출구관 하류에 설치된 기/액 분리기(separator)로 유입된다. 액체유량은 전자저울(balance)을 사용하여 일정시간 동안 질량을 측정함으로써 획득할 수 있었다. 기체유량은 Aalborg사의 질량 유량계(Mass flow meter)를 사용하여 측정하였다.

입구조건은 기존의 소형관의 실험결과와 비교하기 위해서 Stacey et al.⁽¹⁾과 Lee and Lee⁽³⁾의 실험조건과 유사하고, 유동양식이 유지되는 입구조건(j_0

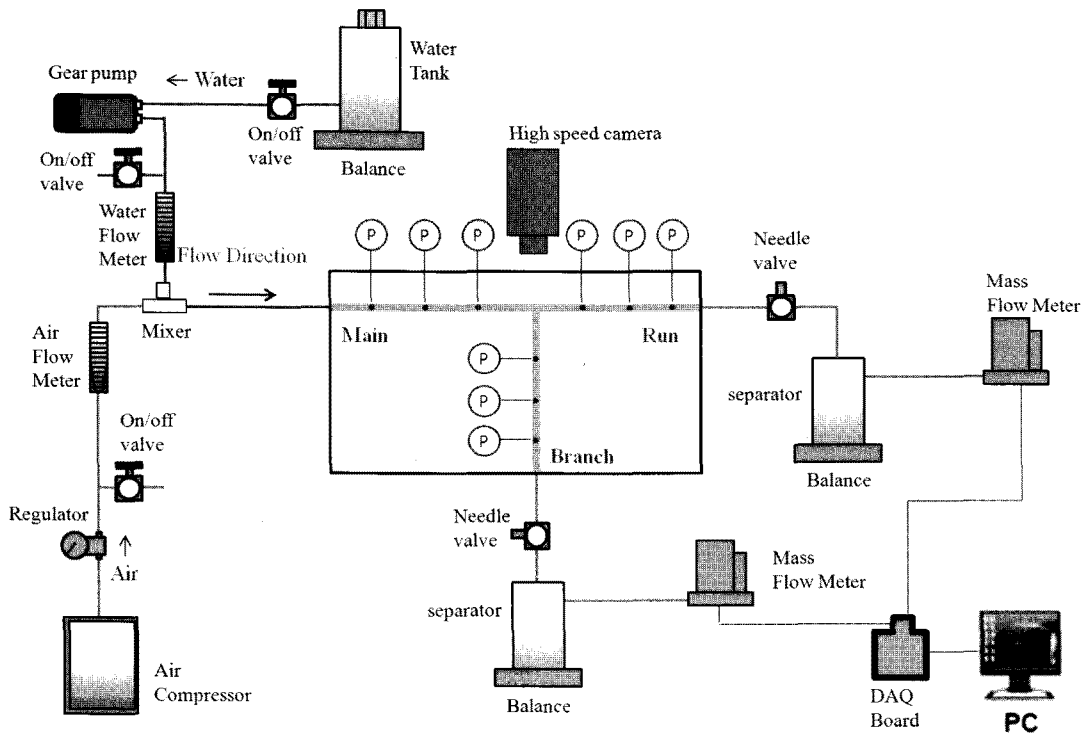


Fig. 1 Experimental setup.

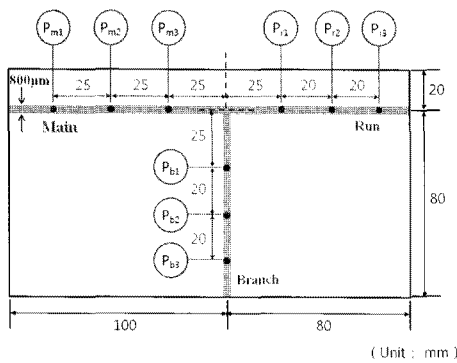
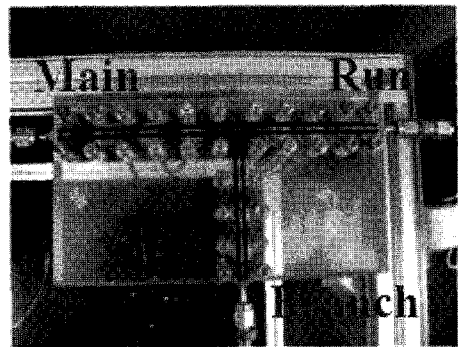


Fig. 2 Test section.



= 15~20 m/s, $j_t = 0.11 \sim 0.20$ m/s)을 설정하였다. 입구에서의 유동양식을 확인하기 위해 Yang and Shieh⁽⁶⁾의 1 mm에 대한 2상유동양식 선도를 이용하였으며 각 조건은 Fig. 3의 유동양식선도 위에 나타났다. 입구 유동은 환상류로 유지되었고, 이는 마이크로관에 대해서도 같은 유동양식이였다.

실험은 3회 이상 실시하였고, 측정결과와 불확실성에 대해 기체 및 액체의 질량유량(W_g, W_l)의 오

차범위는 각각 $\pm 11\%$, $\pm 8\%$ 이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 환상류 분배 경향

입구 조건을 환상류로 두고 분배에 대한 실험을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 입구

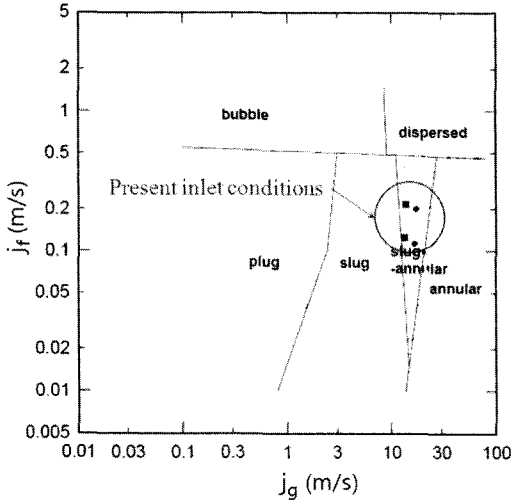


Fig. 3 Flow pattern map with the present inlet conditions.

조건이 다른 2가지 경우에 대해 각각 나타내었고, 대체적으로 등분기선을 따라서 분포하는 것이 가장 큰 특징으로 나타났다. 관의 크기가 작으므로 Azzopardi⁽⁷⁾의 영향영역(Zone of influence)에 대한 이론이 그대로 적용이 되어, 입구관에서 분기관으로의 분기시 기체의 분기 영역에 영향을 받은 액체의 영역이 거의 동일하다고 판단할 수 있으나, 실험결과가 입구조건에 따라 분기의 경향이 다르게 나타나므로 이에 대해서는 차후에 더 많은 조건과 다른 입구 유동 양식 조건에 대해서도 실험을 수행하여 일반적인 결론을 내야할 필요가 있다.

3.2 관 크기의 영향

Stacey et al.⁽¹⁾과 Lee and Lee⁽²⁾는 관의 크기가 작은(5 mm 정도의) 수평 및 수직 T자관에 대해, 환상류의 분기 현상에 대한 연구를 수행하였고, 그 결과로 큰 관(대체로 32 mm 이상)의 경우에는 작은 관과 분기의 경향이 다름을 밝혔다. 즉, 같은 입구조건인 경우, 같은 기체 분기비에 대해 액체의 분기비가 작은 관인 경우에 더 커짐을 확인하였다. 그와 같은 현상의 원인을 작은 관일수록 입구관을 흐르는 액체에 대해 액적으로 흐르는 양이 상대적으로 적어지고, 액막으로 흐르는 액체의 양이 많아짐으로 설명하였다. 액막으로 흐르는 액체의 양이 많아지면 분기관으로의 분기가 쉬워지므로 같은 입구조건에 대해 액체가 더 많이 분기된다고 설명하였다.

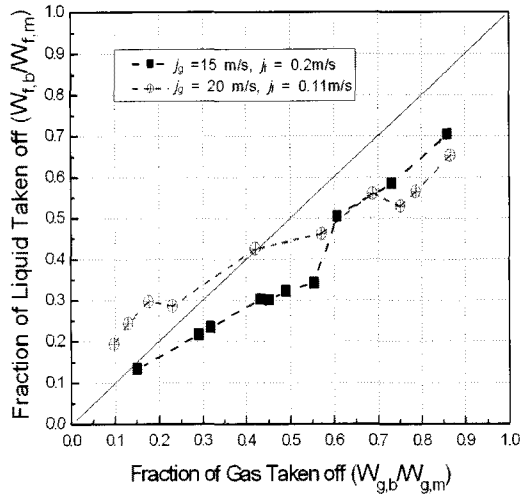


Fig. 4 Annular flow distribution tendencies at Micro-T junction.

본 연구에서는 수평관에 대해 실험을 수행하였던 Stacey et al.⁽¹⁾의 기존 연구결과와 본 실험결과를 비교하기 위해 기존 연구 결과와 입구 조건을 동일하게 만들어주고, 실험을 수행하여 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

4개의 각기 다른 입구 조건에 대해(환상류 조건은 고정), 기존의 연구결과와는 다른 결과가 나타남을 확인할 수 있다. 즉, 분기관으로의 낮은 분기비(기체 분기비($W_{g,b}/W_{g,m}$) < 0.4~0.6)에 대해 관의 크기가 작은 경우 액체의 분기가 낮게 나타나고, 높은 분기비(기체 분기비($W_{g,b}/W_{g,m}$) > 0.4~0.6) 조건에 대해서는 그와 반대로 관의 크기가 작은 경우 액체의 분기가 높게 나타남을 확인할 수 있다. 즉, 전체적으로 앞의 제 3.1절에서 언급하였던 등분기선에 대체로 근접한 형태의 분배 경향을 보였다. 관의 크기에 대한 분배 경향과 관련해서 중요한 것은 높은 분기비에 대해서는 마이크로 관일수록 액체의 분기비가 높다는 기존 연구 결과와 그 경향이 같음을 확인할 수 있으나, 작은 분기비에서는 기존의 경향과는 다르게 나타난다는 것이다. 이에 대한 원인은 다음장의 유동가시화 결과를 바탕으로 살펴보기로 한다.

그리고 실험결과에 대해 입구 액체 및 기체 속도의 변화에 대한 영향은 소형관의 경향(Lee and Lee⁽²⁾, Stacey et al.⁽¹⁾)과 다르지 않음을 확인할 수 있다. 즉, 액체의 속도가 높아지면 액체 모멘텀의 증가로 인해 같은 기체 분기비에 대해 액체의 분기

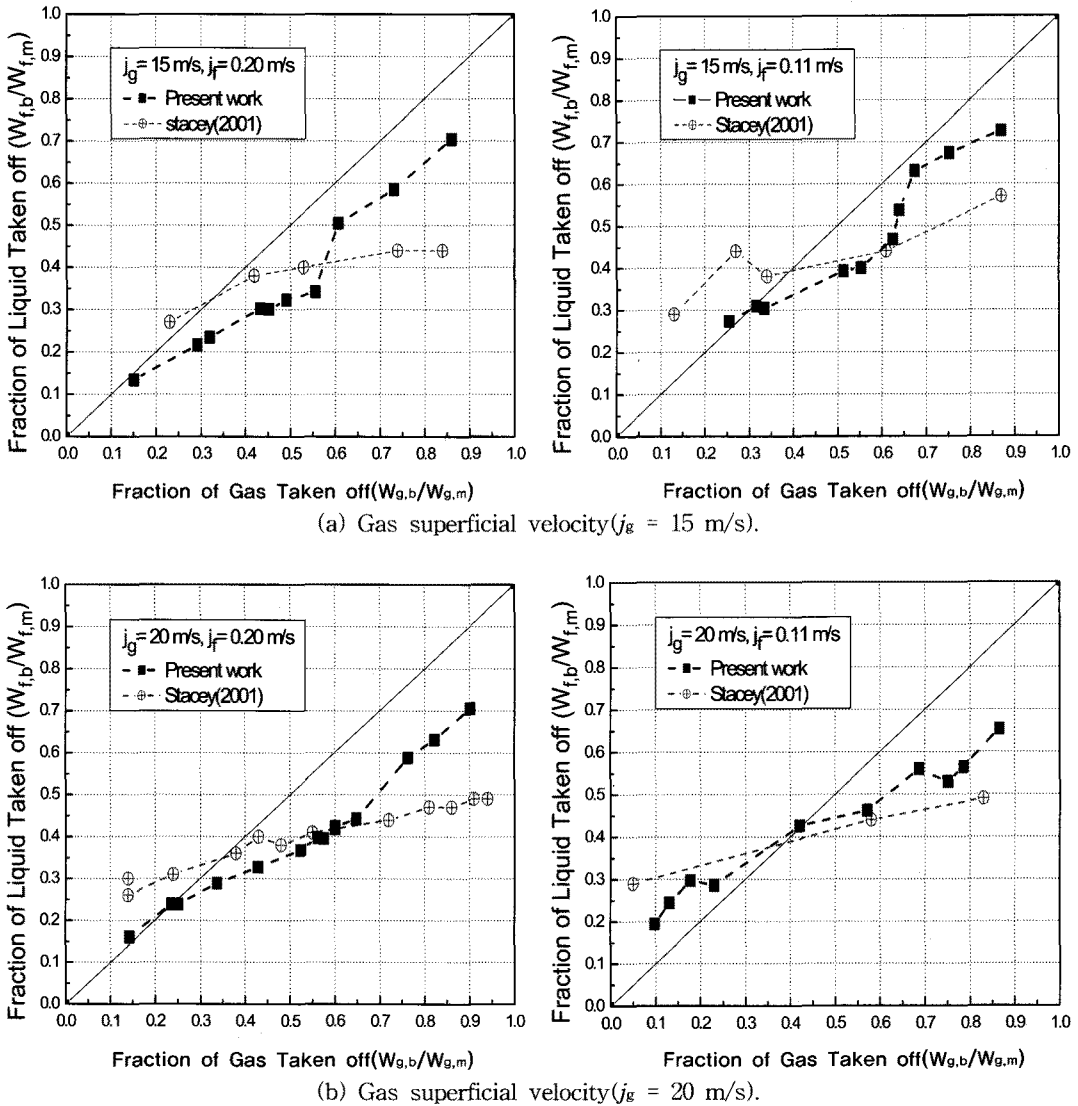


Fig. 5 Comparisons between present results and previous results(Stacey et al. ⁽¹⁾).

량이 작아짐을 확인할 수 있고, 기체의 경우도 그와 유사함을 알 수 있다.

3.3 유동가시화

분배 경향을 보다 잘 파악하기 위해 고속 카메라(MotionPro×4)를 이용하여 초당 5000 프레임의 속도로 유동가시화를 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 6 및 Fig. 7에 사진 및 개요도를 각각 나타내었다. 환상류의 분배현상은 기체의 분기에 대해 영향을 받

는 액막의 운동을 살펴봄으로써 액체의 분기에 대한 경향을 알 수 있다.

체의 분기비가 높은 경우에 대해(Fig. 6), 입구관에서 분기관으로 액체의 분기가 이루어질 때, 액막의 막힘(Blocking) 현상이 관찰되었다. 보다 상세히 기술하면, 분기관으로 향하는 유동에 대해 분기관으로 많은 기체가 분기됨으로 인해 액막도 함께 분기가 발생하게 된다. 그 때 출구관으로 향하는 액막의 운동이 방해받게 되고, 그로 인해 분기관 부분에서 액막의 정체가 발생하면서 Fig. 6에서 나타난 것

과 같이 액막의 상당 부분이 유로를 막아 출구관으로의 유동을 방해하는 액막의 막힘 현상이 발생하였다. 그로인해 상대적으로 많은 양의 액막이 분지관으로 분기가 되며, 그에 따라 실험결과(Fig. 5)에서 확인할 수 있듯이 마이크로 사이즈의 분기관에서는 액체의 분기비가 큼을 확인할 수 있다. 여기서 액막이 유로의 많은 부분을 막는 원인은 다음과 같이 분기시 액막이 받는 힘의 관계를 고려함으로써 유추할 수 있다. 힘의 관계에 대해 간단히 기술하면, 출구관으로의 관성력(F_i)과 분지관으로의 구심력(F_c)의 상대적인 크기에 의해 분배가 결정된다고 하였고(Shoham et al.⁽⁸⁾), 따라서 분기비가 높은 경우는 분지관으로의 구심력이 상대적으로 크기 때문이다. 여기에 작은 관일수록 표면장력(F_s)의 영향이 커지고(Stacey et al.⁽¹⁾), 그 힘은 액막을 유지해주는 역할을 하므로, 작은 관일수록 액막이 주된 흐름방향으로 끌려가는 현상이 크게 나타날 것이다. 그에 의해 액막의 막힘 현상이 발생된다고 볼 수 있다. 결과적으로 액막에 작용하는 주된 구심력에 표면장력이 더해져 분지관쪽으로 더 많은 액막의 분기가 발생한다고 볼 수 있다. 그러므로 큰 관의 분기관과 비교하여 기체의 분기비가 높을 경우, 액체의 분기비가 더 높은 결과가 나타났다.

그러나 분기비가 낮은 경우(Fig. 7)는 분기비가 높을 때와 비교하여 액막의 막힘 현상이 거의 관찰되지 않았다. 이는 액막에 대해 출구관으로의 관성력이 더 크게 작용하고 액막이 출구관으로 쉽게 흘러갈 수 있게 된다. 표면장력은 그러한 액막의 상태를 유지해주는 역할을 하므로 관성력에 더해지는 효과가 나타난다고 할 수 있다. 그러므로 출구관으로 대부분의 액막이 흘러감에 따라 분지관으로의 분기가 어려워지고, 그 결과 액체의 분기비가 상대적으로 낮게 나온 것으로 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 모든 단면이 800 μm 의 수력직경을 가지는 수평 T자관에 대한 2상 유동 분배에 대한 기초연구를 실험을 통하여 수행하였고, 그에 대한 결과는 다음과 같다.

- (1) 입구유동양식이 환상류인 경우, 유동분배가 대체적으로 등분기선을 따라서 이루어짐을 확인하였다.
- (2) 마이크로 T자관과 소형 T자관(5 mm~10 mm)과의 분배결과 비교시, 분지관(branch)으로의 낮은 분기비에 대해 마이크로 관인 경우 액체의 분기

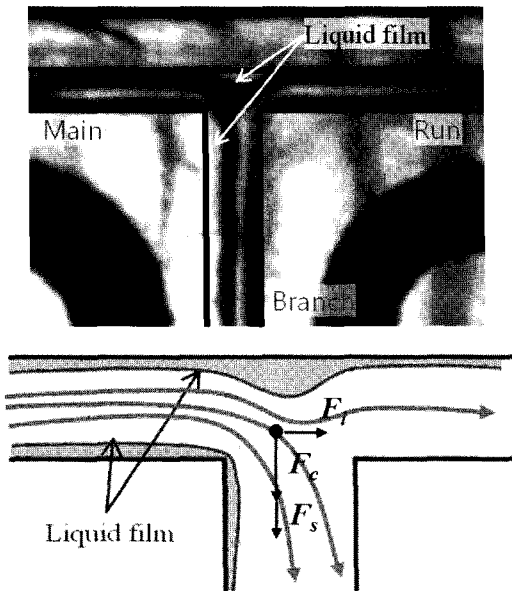


Fig. 6 Flow visualization for high fraction of liquid taken off ($W_{g,b}/W_{g,m} = 0.82$, $j_{g,m} = 20$ m/s, $j_{f,m} = 0.2$ m/s).

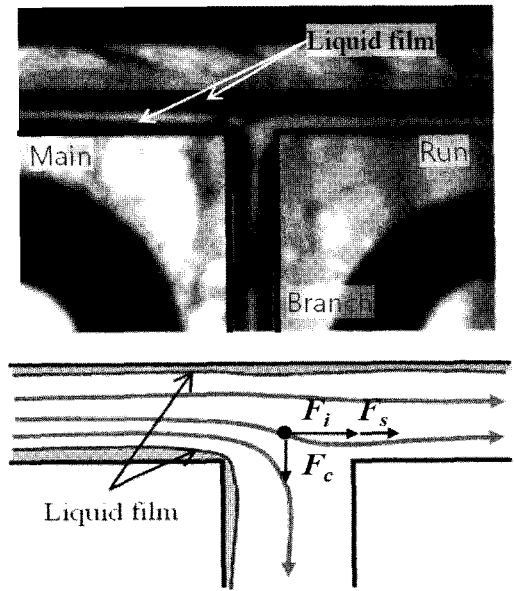


Fig. 7 Flow visualization for low fraction of liquid taken off ($W_{g,b}/W_{g,m} = 0.24$, $j_{g,m} = 20$ m/s, $j_{f,m} = 0.2$ m/s).

낮게 나타나고, 높은 분기비조건에 대해서는 그와 반대로 마이크로 관인 경우 액체의 분기가 높게 나타남을 확인할 수 있다.

(3) 고속카메라를 이용한 유동가시화를 통하여 마이크로 T자관의 분배 현상을 관찰하였다. 그를 통하여 높은 분기비에서는 액막에 작용하는 구심력 및 표면장력에 의한 액막의 막힘 현상으로 액체의 분기가 높게 되고, 낮은 분기비에서는 액막에 작용하는 원심력 및 표면장력에 의한 액막의 출구관으로의 직진운동으로 액체의 분기가 낮게 됨을 알 수 있었다.

(4) 본 연구는 입구유동이 환상류인 경우에 대해 진행하였으나, 마이크로 크기의 유로에 대해서는 플러그류(plug flow)나 기포류(bubbly flow) 등의 유동양식 또한 많이 나타나기 때문에 그에 대한 추가 연구도 향후 수행하여 궁극적으로 대부분의 유동양식에 대한 분배 모델 개발을 수행할 것이다.

후 기

이 결과물은 2009학년도 경남대학교 신진교수연구비 지원에 의하여 이루어졌습니다.

참고문헌

1. Stacey, T., Azzopardi, B. J. and Conte, G., 2000, The split of annular two-phase flow at a small diameter T-junction, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 26, pp. 845-856.
2. Hong, K. C., 1978, Two phase flow splitting at a pipe tee, *J. Pet. Technol.*, pp. 290-296.
3. Lee, J. K. and Lee, S. Y., 2001, Dividing two-phase annular flow within a small vertical rectangular channel with a horizontal branch, *Proc. 3rd International Conference on Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology for the Process Industries*, Davos, Switzerland, pp. 361-368.
4. Mak, C. Y., Omebere-Iyari, N. K. and Azzopardi, B. J., 2006, The split of vertical two-phase flow at a small diameter T-junction, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 61, pp. 6261-6272.
5. Lim, J. S., 2008, An experimental study on dividing two-phase plug flow at a mini T-junction, M. S. thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology.
6. Yang, C. Y. and Shieh, C. C., 2000, Flow pattern of air-water and two-phase R-134a in small circular tubes, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 27, pp. 1163-1177.
7. Azzopardi, B. J., 1984, The effect of side arm diameter on two phase flow split at a T junction, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 10, pp. 509-512.
8. Shoham, O., Brill, J. P. and Taitel, Y., 1987, Two-phase Flow Splitting in a Tee Junction-Experiment and Modelling, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 42, pp. 2667-2676.