

# 소수성 미니채널 내 움직이는 접촉선을 가진 액체슬러그의 압력 강하에 대한 수치해석

전준호\* · 박수청\*\* · 유동인\*\*\* · 김태훈\*\* · 이연원†

## Numerical study on pressure drop with moving contact lines of dry slug flow in a hydrophobic minichannel

Jun Ho Jeon\*, Su Chung Park\*\*, Dong In Yu\*\*\*, Tae Hun Kim\*\*, Yeon Won Lee†

**Abstract** In this study, a single-phase analysis of droplet slug with different contact angles was performed based on the visualization of experimental results. Droplet slug – flowing between gases in a hydrophobic mini channel – moves with a triple contact line without a gas liquid film on the wall. The results show that the rotational flow inside the droplet occurred; this was compared and verified with the results of two-phase analysis. The pressure field shows pressure rise at the front and rear ends. The effective length – the section that satisfies the laminar flow condition – became shorter as the droplet velocity increased. The Choi's correlation for the effective length agrees with this analysis results with a slight difference. This difference is judged as the difference in the contact angle of the slug model.

**Key Words** : Slug flow(슬러그 흐름), Hydrophobic minichannel(소수성 미세관), CFD(전산유체역학) Effective length(유효 길이)

### 1. 서론

최근 다양한 열·유체기기의 소형화에 따라 미니/마이크로채널 내 이상 유동 연구에 관심이

높아지고 있다. 이상 유동은 각 상의 속도에 따라 다양한 유동현상이 나타나게 되며, 마이크로미터(~ 100 $\mu$ m) 또는 밀리미터(~ 1mm) 크기의 직경을 갖는 미니/마이크로채널에서는 슬러그류, 플러그류와 같은 간헐류가 다양한 속도 범위에서 주로 발달하게 된다. 특히, 미니/마이크로채널 내 슬러그류는 표면의 젖음성에 따라 유동 형태가 달라지며, 소수성 미니/마이크로채널에서는 액체슬러그와 기체슬러그가 계면 및 접촉선으로 완전히 분리되는 드라이슬러그가 발달하게 된다. 선행연구결과에 따르면<sup>(1)</sup>, 이러한 유동에서는 압력강하가 주로 움직이는 접촉선에서 발생하기 때문에 소수성 미니/마이크로채널을 사용하

† Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University, Professor  
E-mail: ywlee@pknu.ac.kr

\* Department of Mechanical Design Engineering, Graduated school of Pukyong National University, Ph.D Student

\*\* Research Institute of Industrial Science and Technology, Pukyong National University, Researcher

\*\*\* Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University, Assistant Professor

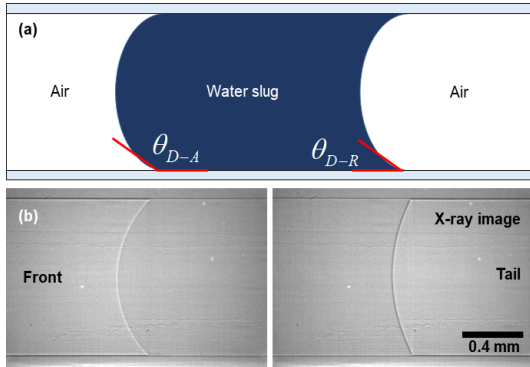


Fig. 1. Dry slug flow in hydrophobic minichannels (a) schematic, (b) X-ray image

는 열-유체기기의 설계를 위해서는 움직이는 접촉선의 연구가 필수적이다.

본 연구 그룹의 선행연구<sup>(2)</sup>에서는 소수성 미니/마이크로채널 내 움직이는 접촉선에서의 압력강하를 이해하기 위해 소수성 미니 채널( $D = 1.018\text{mm}$ )에서의 순수 물 액적 유동에 대한 압력강하를 측정하였으며, 특히 움직이는 접촉선의 압력강하에 중요한 변수인 액적 전/후단 접촉각 (dynamic contact angle)을 그림 1와 같이 방사광 X-선 영상법을 이용하여 측정하였다. 또한, 본 실험을 통해 식 (1)과 같은 개선된 움직이는 접촉선에서의 압력강하 이론식을 제시하였다<sup>(2)</sup>.

$$\Delta P_{CL} = -\frac{4\sigma LG}{D}[\cos\theta_{D-A} - \cos\theta_{D-R}] + \frac{4\sigma LG}{D}[\cos\theta_{S-A} - \cos\theta_{S-R}] \quad (1)$$

여기서  $\Delta P$ ,  $\sigma$ ,  $D$ ,  $\theta$ 는 각각 압력강하, 표면장력, 관 내경, 접촉각이며, 하첨자 LG, D-A, D-R, S-A, S-R은 각각 액상-기상, 동적 전진, 동적 후진, 정적 전진, 정적 후진을 의미한다. 다만, 본 연구 그룹의 선행연구결과는 물 액적 유동에 대한 전체 압력강하를 측정하였기 때문에 액체슬러그 내부에서의 압력 및 속도 분포를 확인하기 어려우며, 동적 접촉각에 의한 압력강하의 원인을 명확하게 규명하지 못하는 한계가 있다.

Choi<sup>(3)</sup> 등은 수치적 기법을 통하여 액체슬러그 내부의 유동 및 압력장을 확인하는 연구를

수행하였다. 그의 연구에서는 식 (2)를 만족하는 단상 층류 유동 압력강하 영역과 움직이는 접촉선 근처에서의 순환 유동에 의한 압력강하 영역으로 구분되는 것을 확인하였으며, 액체슬러그의 속도에 따른 층류유동 유효 액체슬러그 길이를 예측할 수 있는 상관식을 제시하였다.

$$f \cdot Re_D = 64 \quad (2)$$

여기서,  $f$ ,  $Re_D$ 은 각각 마찰계수, 레이놀즈수이다. 다만, Choi는 액체슬러그 계면 형상을 가정하였기 때문에, 액체슬러그 속도에 따른 동적 접촉각 변화로 인한 형상 차이를 고려하지 못하였다.

따라서, 본 연구에서는 움직이는 접촉선에서의 압력강하를 분석하기 위해 소수성 미니 채널 내 액체슬러그에 대한 수치적 해석을 수행하였다. 선행연구에서 실험적으로 획득한 접촉각을 반영하여 액체슬러그의 계면을 모델링하였으며, 기체에 둘러싸인 액체슬러그를 해석영역으로 하여 단상 유동 해석을 수행하였다. 본 해석 결과를 바탕으로 액체슬러그 내부 유동 및 압력 분포를 확인하였고, 층류 유동 유효길이에 대한 상관식을 검토하였으며, 미세관 내 일정한 형태를 유지하는 접촉선을 가지는 액체슬러그의 내부 유동이 단상 해석으로 모사 가능한지 판단하였다.

## 2. 수치해석 방법

본 연구의 수치해석은 Fluent 19.2를 사용하였고 이차원, 비압축성, 정상상태 및 축대칭조건의 단상해석이기에 원통형좌표계를 사용한 연속방정식은 아래와 같고<sup>(4)</sup>.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = 0 \quad (3)$$

운동량 방정식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (r \rho v_x v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r v_x) \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[ (r \mu) \left( 2 \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) \right] \\ & \quad + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ (r \mu) \left( \frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

그리고

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (r \rho v_x v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r v_r) \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[ r \mu \left( \frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \right] \\ & \quad + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu 2 \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) - 2 \mu \frac{v_r}{r^2} \end{aligned} \quad (5)$$

이다. 여기서  $\rho$ ,  $x$ ,  $r$ ,  $v_x$ ,  $v_r$ ,  $\mu$ 은 각각 밀도, 축방향 좌표, 반경방향 좌표, 축방향 속도, 반경방향 속도, 점성계수이다.

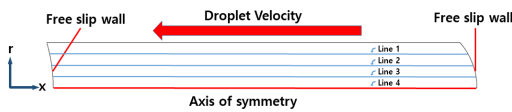


Fig. 2. Computational domain and boundary conditions

Table 1. Droplet moving contact angle parameters

Case	Velocity [m/s]	Advancing angle [°]	Receding angle [°]
1	0.07649	133.01	73.02
2	0.11342	134.51	68.17
3	0.1506	133.52	66.65
4	0.18592	133.70	65.31
5	0.22277	133.59	59.99
6	0.26103	133.62	56.69
7	0.29412	133.23	53.68

해석을 위한 액체슬러그의 모델 및 경계조건은 그림 2과 같다. 축대칭모델을 이용하여 액체슬러그를 해석영역으로 설정하였고, 액체슬러그와 미니채널이 접촉하는 면에 액체슬러그방향 속도를 경계조건으로 주었다. 이러한 액체슬러그 영역만

을 고려한 단상유동해석이 가능한 이유는 실험결과 충분히 발달된 액체슬러그는 일정한 속도에서 일정한 형태를 유지하기 때문이다. 액체슬러그의 속도에 따른 접촉각은 실험 결과인 표 1에서 확인이 가능하다. 표 1에서 접촉각을 확인해보면 액체슬러그의 속도가 증가할수록 전단부 접촉각은 그 차이가 미미하고, 후단부 접촉각의 변화가 뚜렷하게 감소함을 확인하였다. 해석영역에 압력 및 속도를 측정하기 위한 line 1~4를 설정하였다.

### 3. 해석 결과 및 토의

그림 3(a)는 액체슬러그를 따라가며 관찰 가능한 상대속도를 가지고 유선을 나타낸 것으로 액체슬러그 내 순환 유동이 생기는 것을 확인할 수 있다. 그림 3(b)는 액체슬러그 내 속도장 나타낸 것으로 벽면과 축 대칭 영역에서 속도가 가장 빠르고, 그 사이 속도가 0인 지점이 존재한다.

그림 3(a)에서 보여주는 순환 유동은 액체슬러그 중앙영역에서의 속도와 벽면의 속도차이에 의한 것으로 설명 가능하고, He & Kasagi<sup>(5)</sup> 또한 이에 관해 논한 바 있다. 또한 본 연구의 선행연구<sup>(6)</sup>로서 Case 5~7과 같은 조건으로(액체슬러그 속도 및 접촉각 자유표면모델(Volume of Fluid)을 사용한 이상 유동 해석을 진행하였고, 그림 4에 이상 유동 해석결과, 속도벡터 및 유선을 나타내

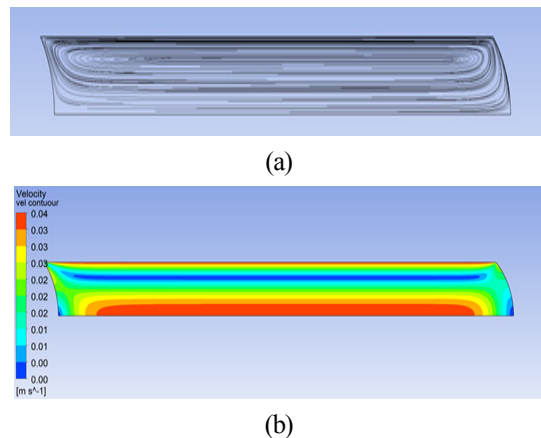


Fig. 3. Velocity field for Case 7 (a) streamline of relative velocity fields; (b) contour of the absolute value for the relative velocity

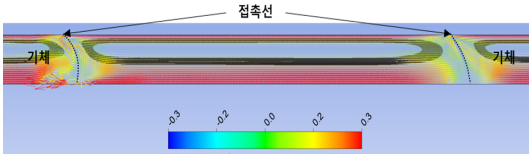


Fig. 4. Velocity field of two-phase model

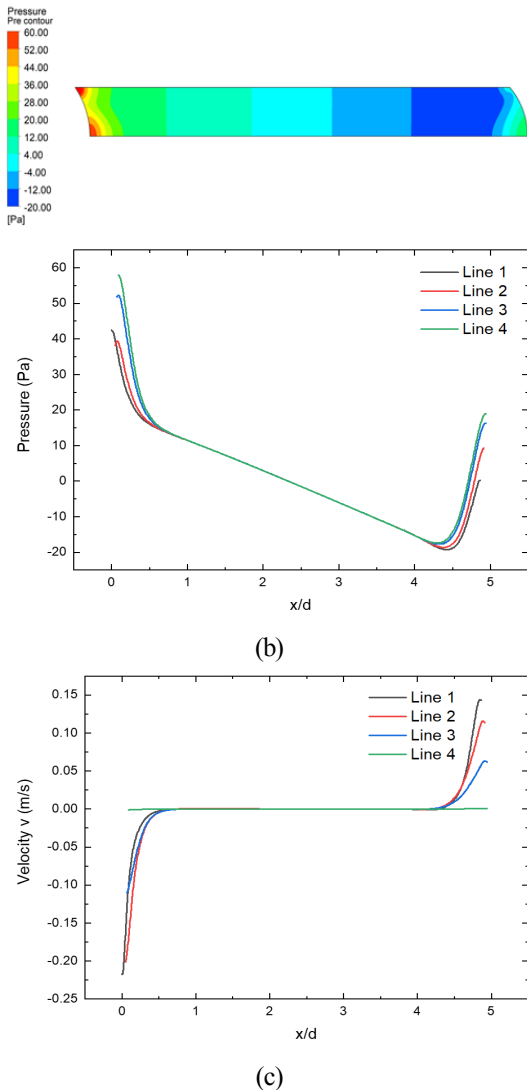


Fig. 5. Pressure and velocity fields for Case 7  
(a) pressure contour; (b) pressure at line 1~4; (c) velocity component v at line 1~4

었다. 이러한 이상 유동 해석으로 실험과 같은 접촉각을 이루는 접촉선의 존재를 모사할 수 있었으며, 액체슬러그 내의 순환 유동도 확인할 수

있었다. 이를 통해 단상해석결과 순환 유동 및 속도 분포 등이 일치함을 확인하였다. 그러나 현재 진행된 이상 유동 해석에서의 접촉각 등은 벽면 조건을 조정하여 실험값과 일치하도록 설정된 결과이므로 좀 더 면밀히 검토할 필요가 있다.

그림 5(a)는 액체슬러그 내 압력장을 그림 5(b)는 line 1 ~ 4에서 측정된 압력을 그림 5(c)는 line 1 ~ 4에서 측정된 반경 방향 속도를 나타낸 것이다. 그림 5(a)에서 후단부에서의 압력이 가장 높으며 전단부에서의 압력 또한 상승하는 것을 확인할 수 있다.

이는 계면에 의해 유체가 축 방향으로 흐르지 못하고 반경 방향으로 틀어지며 생기는 압력 상승으로 판단된다. 그림 5(b)에서는 압력강하가 선형적으로 나타나는 영역이 존재하는데 이는 그림 5(c)의 반경 방향 속도가 0에 근사한 영역과 일치하며, 이 영역에서는 (2)식과 같은 층류 유동의 특성을 만족하는데 이러한 영역 길이를 층류 유동 유효길이( $L_{eff}$ )로 정의하고 He & Kasagi<sup>(5)</sup>와 Choi<sup>(3)</sup> 등이 각각 식(6)-(7)과 같은 상관식을 제시하였다.

$$L_{eff} = L - D \quad (6)$$

$$\frac{L_{eff}}{D} = -0.0132Re + \frac{L}{D} - 1.1885 \quad (7)$$

여기서  $D$ ,  $L$ ,  $L_{eff}$ 는 각각 액체슬러그직경, 액체슬러그길이, 층류유동 유효길이이다.

이에 액체슬러그의 접촉각을 고려한 본 논문의 CFD 결과를 토대로, 아래와 같은 상관식을 제시하였다.

$$\frac{L_{eff}}{D} = -0.0165Re + \frac{L}{D} + 0.8 \quad (8)$$

그림 6은 액체슬러그의 속도에 따른 층류유동 유효길이를 그래프로 나타낸 것으로, 유동해석결과와 Choi의 상관식, He & Kasagi의 상관식 그리고 새로운 상관식을 나타내었다. He & Kasagi의 상관식을 제외하고, 속도가 증가 할수록 층류유동 유효길이는 감소하는 것을 확인 가능하다. 유동해석 결

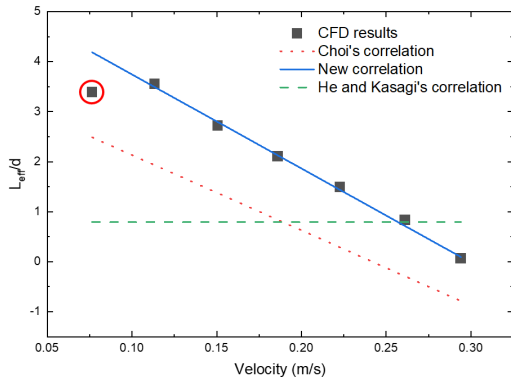


Fig. 6. Comparison of effective lengths with our result and other correlations

과 및 새로운 상관식의 결과는 Choi의 상관식의 결과와 차이는 있으나 비슷한 경향성을 보여주었고 그 차이는 Choi가 가정한 액체슬러그의 형상과 실제 실험으로 측정된 형상이 상이하기 때문으로 판단된다. 다만 본 연구의 상관식은 속도 0.07649 m/s의 유동해석 결과를 고려하지 않은 것으로, 추가 실험 및 해석을 통해 저속도 영역( $u < 0.07649$  m/s)에서의 추가 검토를 진행할 예정이다.

### 3. 결론

본 연구에서는 소수성 표면에서 나타나는 액막이 없는 액체슬러그 내의 유동에 관하여 실험결과에 의한 액체슬러그 형상 및 거동조건을 기초로 하여 액체슬러그 영역만을 단상 유동 해석으로 수치해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 액체슬러그 내의 순환유동의 존재를 확인하였고 층류유동 특성을 나타내는 영역을 제외한 전후단부에서 압력 상승을 확인하였다. 이러한 전후단부에서의 압력 상승 및 반경방향 속도 성분이 실험을 통해 측정된 드라이슬러그 전후단부에 존재하는 움직이는 접촉선의 압력강하와 연관성이 있을 것으로 판단된다.

2) 자유표면모형을 이용한 이상 유동 계산 결과와 비교하여 액체슬러그 내 유동특성, 압력 강하 특성 등을 단상 유동 해석이 가능함을 확인하였다.

다만 움직이는 접촉선에 의한 압력 강하를 연구하기 위해서는 이상 유동해석을 통한 액체슬러그 내외의 압력 강하 특성 연구가 앞으로 필요할 것으로 판단된다.

3) 속도 증가에 따른 유효 특성길이가 짧아짐을 확인하였으며, 접촉각이 고려된 액체슬러그의 층류 유동 유효길이의 해석결과를 토대로 상관식을 제시하였다.

### 후 기

본 연구는 2020년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP) 에너지기술개발사업에서 지원받아 수행하였습니다. (No.20181510102390) 또한 정부의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (2019R1F1A1062140)

### REFERENCE

- 1) Lee, C. Y. & Lee, S. Y., 2007, "Effect on interfacial tensions on behavior of two-phase plug flow in round mini-channels", The 8th International Symposium on Transport Phenomena, pp.27-30.
- 2) Park, S. C., Kwak, H. J., Kim, M. H., Lee, Y. W. & Yu, D. I., 2020, "Pressure Drop with Moving Contact Lines and Dynamic Contact Angles in a Hydrophobic Round Minichannel: Visualization via Synchrotron X-ray Imaging and Verification of Experimental Correlations", Langmuir, Vol. 36, No. 38, pp.11207-11214.
- 3) Choi, C. W., Park, S. C. & Kim, M. H., 2009, "Numerical investigation of liquid slug between non\_lubricated bubbles in hydrophobic capillary tubes", KSME conference, pp.2249-2253
- 4) 2013, "ANSYS Fluent Theory Guide 15", ANSYS Inc
- 5) He, Q. & Kasagi, N., 2009, "Numerical Investigation on Flow Pattern and Pressure Drop Characteristics of Slug Flow in a Micro Tube",

- ASME 2008 6th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, pp.327~335.
- 6) Kim, T. H., Jeon, J. H., Yu, D. I. & Lee, Y. W., 2020, "A study on the numerical approaching method to liquid slug flow moving in microchannel", KSPSE Autumn conference, pp.3-09
  - 7) Jiang, M., Zhou, B., Wang, X., 2018, "Comparisons and validations of contact angle model", International journal of hydrogen energy, Vol. 43, pp.6364-6378.
  - 8) Guo, F., Chen, B., 2009, "Numerical study on Taylor bubble formation in a micro-channel T-Junction using VOF method", Microgravity Science and Technology, Vol. 21, pp.51-58.
  - 9) Jiang, M., Zhou, B., 2020, "Numerical study of flow regimes in microchannel with dynamic contact angle" International Journal of Hydrogen Energy, Vol 45, Issue 54, pp.29782-29790.
  - 10) Shin, H. C., Kim, S. M., 2018, "An Experimental Study on the Frictional Pressure Drop of Air-Water Mixture in a Mini-Channel", The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 21, No. 2, pp.5-10.
  - 11) Thulasidas, T. C., Abraham, M. A. & Cerro, R. L., 1997, "Flow patterns in liquid slugs during bubble-train flow inside capillaries", Chemical Engineering Science, Vol. 52, No. 17, pp.2947-2962.