

## 접촉각에 따른 마이크로채널 내에서의 액적 거동에 대한 수치적 연구

최지영\*, 손기헌\*\*

### Numerical Study of Droplet Motion in a Microchannel with different contact angles

Jiyoung Choi\*, Gihun Son\*\*

**Key Words :** Level Set Method(level set 방법), Microchannel(마이크로채널), Contact Angle(접촉각), Droplet Dynamics(액적 거동)

#### Abstract

The droplet dynamics in a hydrophilic/hydrophobic microchannel, which is applicable to a typical proton exchange membrane fuel cell (PEMFC), is studied numerically by solving the equations governing conservation of mass and momentum. The liquid-gas interface or droplet shape is determined by a level set method which is modified to treat contact angles. The matching conditions at the interface are accurately imposed by incorporating the ghost fluid approach based on a sharp-interface representation. The effects of contact angle, inlet flow velocity, droplet size and side wall on the droplet motion are investigated parametrically. Based on the numerical results, the droplet dynamics including the sliding and detachment of droplets is found to depend significantly on the contact angle. Also, a droplet removal process is demonstrated on the combination of hydrophilic and hydrophobic surfaces.

#### 1. 서론

고체고분자형 연료전지(PEMFC), 마이크로 냉각 장치, biomedical instruments 등 여러 분야에서 사용되고 있는 마이크로 채널에서의 이상 유동은 다양한 산업적 활용으로 인해 주목을 받고 있다. 본 연구에서는 PEMFC 연료전지의 성능 향상을 위해 해결해야 할 주요 문제 중 하나인, water management의 가스 채널에서의 이상유동에 대한 수치적 연구를 행하였다. 이 분야에 대한 많은 연구가 진행되어 왔지만, water droplet의 움직임에 대한 이해의 정도는 미미하다. 최근 액적의 움직임을 자세히 분석하고자 다음의 연구들이 수행되었다.

Quan 과 Lai[1]은 water droplet을 액적과 막 형태로 가정하고 FLUENT를 사용하여 VOF(Volume of Fluid) method로 공기 유동 채널 내에서의 water droplet 이동을 시뮬레이션 하였다. VOF method는 셀에서 차지하는 비율을 활용한 VOF 함수로 액상과 기상의 경계면을 계산한다. 이들은 U 모양 곡관에서의 water droplet의 변형과 퍼짐정도를 결과로 보여주는데, 접촉각과 다공성 막의 효과를 고려함으로써 채널 내의 water droplet 움직임을 연료전지의 실제 가동조건과 더욱 유사한 상태에서 예측하였다. Cai 등[2]도 VOF method를 사용하여 친수성 정도가 다른 채널 벽에서의 액적과 막 형태의 water droplet 거동을 연구하였다. 이들은 소수성 표면보다 친수성 표면에서의 water droplet 이동이

빠르다는 결과를 얻었다. 이를 토대로 채널의 바닥면은 친수성으로, 나머지 면은 소수성으로 처리한 채널에서는 다른 경우보다 바닥에서의 water droplet 제거가 용이하다는 결론을 도출하였다. 최근에는 Mukherjee와 Kandlikar[3]가 level set (LS) method로 채널 내에서의 water droplet의 성장과 움직이는 시점에 대한 수치적 계산을 수행하였다. 계산 방식에 있어, 경계면으로 부터의 거리로 정의된 LS function이 액상-기상 경계면을 따라가는데 이용된다. 이 방식은 경계면 곡률 계산에 있어 VOF보다 정확한 수치를 얻을 수 있다.

본 연구는 마이크로 채널에서 액적의 움직임을 명확히 알기 위해 수행되었다. 접촉각을 다룰 수 있게 변형된 LS method를 이용하여 액상-기상 경계면과 액적 모양의 변형을 계산하였다. 이를 토대로 접촉각 효과 및 액적의 최종 속도에 대한 관계를 알아보았다.

#### 2. 수치해석방법

기체-액체의 상경계면은 기상에서 음의 값, 액상에서 양의 값을 가지는 거리함수로 정의된 LS 함수에 의해 계산된다. Ghost fluid 방법을 바탕으로 기상, 액상 영역 모두에 적용될 수 있는 운동량 및 질량 보존식과 LS 함수  $\phi$ 를 지배하는 방정식은 다음과 같이 표현된다.

\* 서강대학교 대학원, zzubal7@sogang.ac.kr

\*\* 서강대학교 기계공학과, gihun@sogang.ac.kr

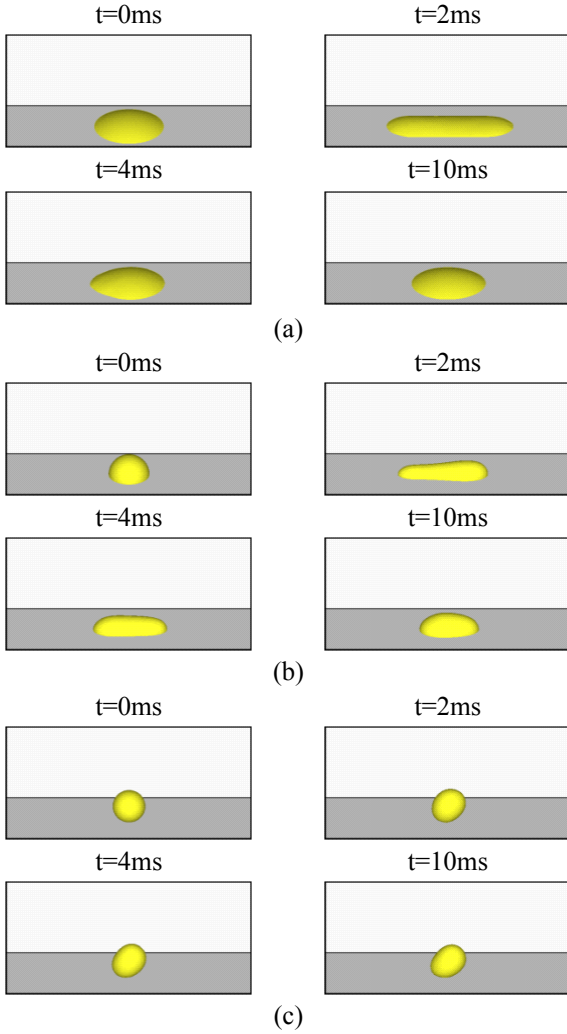


Figure 1 Effect of contact angle on droplet motion with  $u=3\text{m/s}$  and  $V=0.0335\text{mm}^3$ : (a)  $\phi=30^\circ$ , (b)  $\phi=90^\circ$ , and (c)  $\phi=150^\circ$

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0 \\ \rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) &= -\nabla p - \sigma \kappa \nabla H + \rho \mathbf{g} \\ &\quad + \nabla \cdot \mu (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) \\ \frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi &= 0 \end{aligned}$$

위의 식에서  $H$ 는 일종의 불연속적인 계단 함수이며, 상경계면의 곡률( $\kappa$ ), 물성치 등은 다음과 같이 계산된다.

$$H = \begin{cases} 1 & \text{if } \phi > 0 \\ 0 & \text{if } \phi \leq 0 \end{cases}$$

$$\kappa = \nabla \cdot \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|}$$

$$\rho = \rho_g + (\rho_l - \rho_g)F, \quad \mu = \mu_g + (\mu_l - \mu_g)F$$

여기서  $F$ 는 효과적인 물성치 계산을 위하여 다음과 같이 도입하였다.

$$F = \begin{cases} 1 & \text{if } H(\phi_A) = H(\phi_B) = 1 \\ 0 & \text{if } H(\phi_A) = H(\phi_B) = 0 \\ \frac{\max(\phi_A, \phi_B)}{\max(\phi_A, \phi_B) - \min(\phi_A, \phi_B)} & \text{otherwise} \end{cases}$$

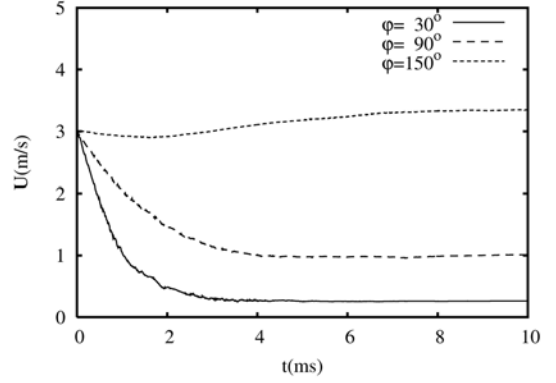


Figure 2 Droplet sliding velocities for different contact angles.

여기서  $\phi_A$ 와  $\phi_B$ 는 근접한 격자점으로부터 구한 거리이다.

### 3. 계산결과 및 검토

계산에 사용된 domain은  $1 \times 1 \text{ mm}$ 의 사각 채널로 길이  $80 \text{ mm}$ 이다. inlet velocity는  $u_{in}=3\text{m/s}$ , 액적의 부피는  $V=0.0335\text{mm}^3$ , 액적의 위치는  $x=4\text{mm}$ ,  $z=0.5\text{mm}$ 이다. 계산에 사용된 접촉각은  $150^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $30^\circ$ 이다. Figure 1은 액적 거동에 대한 접촉각의 효과를 보여준다. 초기 모양은 부피 유지 및 접촉각 만족을 위해 잘린 구 형태를 갖는다.  $\phi=30^\circ$ 의 경우, 길게 늘어난 후 표면 장력으로 인해 초기 모양으로 돌아간다. 정상상태에서 접촉각이 증가할수록 액적과 바닥면과의 접촉 면적은 감소함을 알 수 있다. 각 접촉각에 따른 액적의 속도가 figure 2에 나타나 있다. 액적의 속도는 접촉각이 클수록 증가함을 볼 수 있다. 이는 액적의 배출 속도가 친수성 표면에서 더 빠름을 가리킨다.

### 4. 결론

본 연구에서는 Level Set 방법을 바탕으로 액상과 기상을 해석할 수 있는 수치기법을 개발하여 미세액적을 이용한 마이크로 채널에서의 표면 친수성에 대한 액적의 거동에 관한 연구를 수행하였다. 계산 결과로부터 채널 내에서의 액적의 움직임 및 형상은 접촉면의 접촉각에 따라 달라지며, 친수성 표면에서의 액적 이동 속도가 빠름을 관찰할 수 있었다.

### 참고문헌

- [1] Quan, P., and Lai, M.C., 2007, Numerical Study of Water Management in the Air Flow Channel of a PEM Fuel Cell Cathode, *Journal of Power Sources*, 164(1), pp. 222-237.
- [2] Cai, Y.H., Hu, J., Ma, H.P., Ui, B.L., and Zhang, H.M., 2006, Effects of hydrophilic/hydrophobic properties on the water behavior in the micro-channels of a proton exchange membrane fuel cell, *Journal of Power Sources*, 161(2), pp. 843-848.
- [3] Mukherjee, A., and Kandlikar, S.G., 2006, A Numerical Analysis of Growing Water Droplet Inside an Air Supply Channel of a PEM Fuel Cell, *Proc. 2006 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Chicago, IMECE200614807.