

## 다양한 채널 너비를 가지는 균일계 Rectangular 마이크로채널에서의 이론적인 유량 변화

김기호, 이효송, 유재근, 이영우  
충남대학교 화학공학과

### Flow rate change of the Rectangular microchannel with different channel width

Kim Ki-Ho, Lee Hyo-Song, Yu Jae-Keun, Rhee Young-Woo  
Department of Chemical Engineering, Chungnam National University

#### 1. 서 론

Microsystem에서의 microfluidics 흐름은 압력, 표면장력, 자기장, 전기장, 원심력 등의 구동력에 의하여 실현될 수 있다[1-3]. Microfluidics에서는 표면에 미치는 힘의 효과가 상대적으로 중요하게 되며, 유체가 흐르는 채널 벽의 상태 또한 유체의 흐름에 큰 영향을 미친다. 전기삼투 (electroosmosis)에 의한 microfluidics 흐름은 채널 벽면에 형성되는 전기장에 의하여 형성이 되며, microsystem 내에 추가적인 기계장치가 필요하지 않고 전기장의 세기를 조절하거나 채널 내에 흐르는 유체의 pH를 조절함으로써 그 흐름을 보다 쉽게 제어할 수 있다[4-6]. 일반적으로 전기삼투에 의한 유체의 이론적인 거동은 단면에서의 전기이중층 (EDL: electrical double layer)에 대한 이해를 바탕으로, Navier-Stokes 식을 이용하여 일정한 범위 내에서 예측이 가능하다[7-9].

본 연구에서는 microchannel 단면에서 전기이중층의 분포를 나타내기 위하여 FEMLAB (ALTSOFT, version 3.0)을 이용하여 다양한 외부전압과 표면 전위에 따른 분석을 실시하였으며, 채널 전체에 대한 유속의 변화도 추가적으로 조사하였다. 이를 통하여 이론적인 유체의 흐름 특성을 조사하였다.

#### 2. 이 론

대부분의 고체 물질들은 수용액과 접하게 되면 정전하나 표면 전위를 띄게 된다. 고체표면 근처에는 과다한 counter-ion들에 의하여 고 전하밀도를 갖는 고정층 (Stern layer)이 형성되며, 점차적으로 전하밀도가 감소하여 bulk 상태에 이르는 확산층 (Diffuse layer)이 연속된다. 고 전하밀도를 갖는 Stern layer와 전기적인 힘과 열운동에 의한 불규칙 운동에 영향을 받는 Diffuse layer를 전기이중층이라고 한다. 전하를 띄는 고체표면과 직접적으로 강하게 접하고 있는 Stern layer에서는 움직임이 일어나지 않고, Stern layer에서 전기적으로 중성인 bulk 용액까지 이르는 Diffuse layer에서는 전하밀도가 점차적으로 감소하다가 0이 되며, 용액의 움직임이 일어난다. Stern layer와 Diffuse layer의 경계는 Shear plane이라 하며, 여기에서의 유체의 속도는 0으로 본다. Shear plane에서의 전위를 제타 전위 ( $\zeta$ : zeta potential)라고 일컬으며, 제타 전위는 대부분의 계면전동 모델에서 표면전위로 간주된다.

전기이중층에서의 전위 분포는 Poisson-Boltzmann 식으로 나타낼 수 있다. Debye-Hückel 파라미터와 무차원 전위를 정의하면 Poisson-Boltzmann 식은 식 (1)의 형태로 얻어진다.

$$\nabla^2 \Psi = k^2 \sin h \Psi \quad (1)$$

전기이중층 장과 전기삼투흐름에 대한 기존의 연구들은 slit microchannel과 cylindrical microchannel 같은 간단한 형태의 microchannel에 한정되었다. 그렇지만 최근의 microfluidic device와 MEMS에서의 microchannel은 단면이 rectangular 형태에 가깝다. Rectangular microchannel에서 전기이중층과 유체흐름은 2차원적으로 해석할 수 있다. Fig. 1은 너비가  $2W$ , 높이가  $2H$  그리고 길이가  $L$ 인 rectangular microchannel이다.

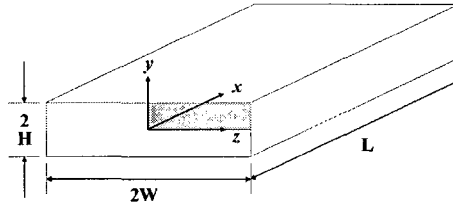


Fig. 1. A rectangular microchannel with the computational domain.

Poisson-Boltzmann 식을 2차원의 형태로 나타내고, 일정한 경계조건과 무차원 변수를 대입하면 식 (2)와 같은 무차원 Poisson-Boltzmann 식을 얻을 수 있다.

$$(2)$$

### 3. 결과 및 고찰

microchannel의 너비변화에 따른 채널 단면에서의 전위의 분포를 알아보려고 한다. Fig. 2는 표면의 제타 전위가 0.1 V이고 온도가 298 K일 때,  $H/W$  비가 1, 1/2인 microchannel에 대하여 FEMLAB을 이용하여 단면에서의 전위 분포를 구현한 것이다.

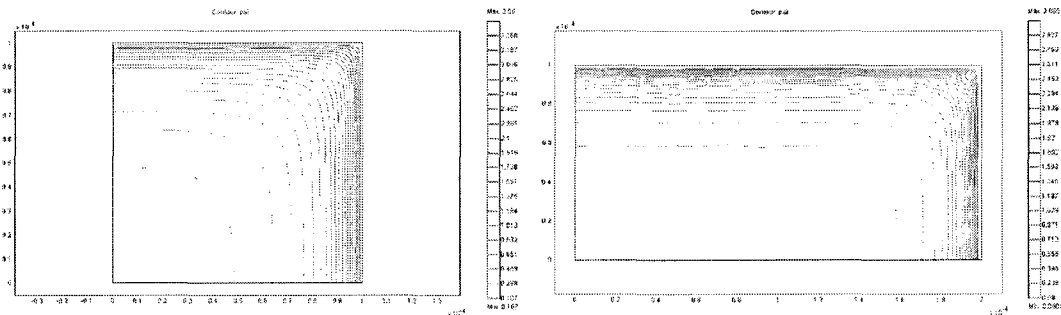


Fig. 2. Electrical potential distribution in the cross-section ( $H/W$ : 1, 1/2).

Fig. 2에 보이는 바와 같이 표면의 전위가 내부의 전위에 비하여 높은 값을 가지므로, 표면으로 갈수록 전위의 밀도와 수치가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 경계조건에 의하면 모서리에서의 전위가 가장 큰 값을 갖는다. 그러나 rectangular 형태의 채널에서는 모서리 부분이 상대적으로 멀리 떨어져 있으며 형태에 의한 저항이 발생하기 때문에, 모서리 부분에서의 전위 분포가 상대적으로 낮은 값을 나타내는데, 이를 모서리 효과 (corner effect)라

고 일컫는다.

Fig. 3에서는 채널 표면에서부터 너비방향으로 동일한 영역(100  $\mu\text{m}$ ) 내에서의 전위 변화를 H/W 비가 1인 단면과 비교하여 나타내었다. Fig. 2에 보이는 바와 같이 H/W 비가 1/2인 단면에서 표면에 근접한 영역의 전위 기울기가 H/W 비가 1인 단면의 전위 기울기보다 큰 값을 나타내었다. 또한 일정한 값에 수렴하는데 요구되는 길이도 H/W 비가 1/2인 단면에서 보다 짧은 것으로 나타났다.

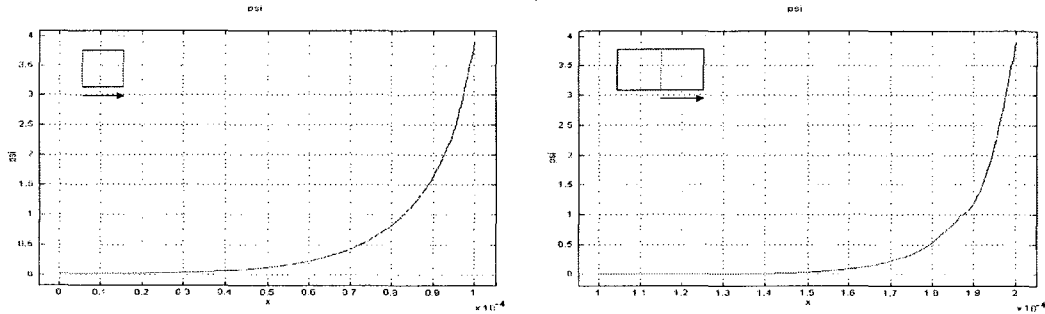


Fig. 3. Potential change in the cross-section (H/W: 1, 1/2).

채널의 너비가 증가할수록 단면 전체에 대한 높이방향 표면 전위의 영향과 모서리 효과가 감소되며, 표면에서 전기이중층이 압축되어 그 두께가 얇아지는 결과를 가져오는 것을 확인할 수 있었다. 또한 전기이중층의 압축은 제타 전위의 증가로 이어지며, 제타 전위의 증가는 유량 속도의 증가로 나타날 것으로 사료된다.

Fig. 4에는 단면의 중심을 지나는 가상의 선상에서 H/W 비가 1, 1/2인 단면의 전위 변화를 나타내었다. Fig. 4에 나타난 바와 같이, 표면에서의 전위가 가장 높은 값을 나타내었으며, 중심에서의 전위가 가장 낮은 값을 나타내었다. 이는 제타 전위의 영향이 단면의 중심으로 갈수록 점점 감소하는 것을 잘 보여주고 있다.

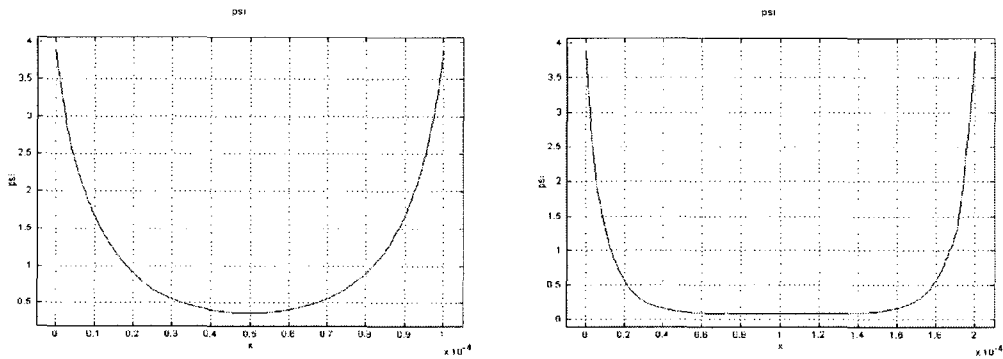


Fig. 4. Potential change in the cross-section (H/W: 1, 1/2).

Fig. 4에 나타나는 바와 같이 표면에서의 전위가 가장 높은 값을 보이고 중심으로 갈수록 전위가 감소하는 경향성이 있다. 그렇지만 H/W 비가 1/2인 경우에는 단면 중앙의 일정 영역에서 최소값에 이르고, 그 후에는 최소값을 유지하는 모습이 H/W 비가 1인 단면과 확연한 차이를 보이고 있다. 또한 채널의 너비가 증가할수록 최소 전위에 이르는 거리가 감소하면서 전위가 압축되고 표면으로 이동하는 모습을 나타내고 있다. 이러한 표면 방향으로의 전위 이동은 전기이중층에서 제타 전위의 증가를 가져오며, 유체의 이동속도를 증가시키게 된다.

#### 4. 결 론

다양한 채널 너비를 가지는 균일계 Rectangular microchannel에서의 이론적인 유량 변화에서 FEMLAB을 이용한 채널 단면에서 전위의 거동에 관하여 살펴보았다. 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. FEMLAB을 이용하여 채널 단면에서의 전위 거동을 이론적으로 조사하였다. 채널의 너비가 증가할수록 (H/W 비가 감소할수록) 단면에서의 전위 방향이 전환되었으며, 길이가 증가하는 너비방향 표면의 전위가 높이 방향 표면의 전위에 비하여 상대적으로 증가하였다. 또한 단면에서의 모서리 효과도 감소되고, 전위 층이 표면으로 이동하면서 압축되는 모습을 보였다. 이는 전기이중층의 압축으로 연결되어, 제타 전위의 증가를 가져올 것으로 사료된다.

#### 5. 참고문헌

1. Y. Gao, T. N. Wong, C. Yang, and K. T. Ooi, "Two-fluid electroosmotic flow in microchannels", *Journal of Colloid and Interface Science*, **284**, 306-314 (2005).
2. Y. Hu, C. Werner, and D. Li, "Influence of the three-dimensional heterogeneous roughness on electrokinetic transport in microchannels", *Journal of Colloid and Interface Science*, **280**, 527-536 (2004).
3. N. Ichikawa, K. Hosokawa, and R. Maeda, "Interface motion of capillary-driven flow in rectangular microchannel", *Journal of Colloid and Interface Science*, **280**, 155-164 (2004).
4. C. Y. Soong and S. H. Wang, "Analysis of rotation-driven electrokinetic flow in microscale gap regions of rotating disk systems", *Journal of Colloid and Interface Science*, **275**, 670-678 (2004).
5. Y. Liu, J. C. Fanguy, J. M. Bledsoe, and C. S. Henry, "Dynamic Coating Using Polyelectrolyte Multilayers for Chemical Control of Electroosmotic Flow in Capillary Electrophoresis Microchips", *Anal. Chem.*, **72**, 5939-5944 (2000).
6. D. Belder, K. Elke, and H. Husmann, "Influence of pH\*-value of methanolic electrolytes on electroosmotic flow in hydrophilic coated capillaries", *J. Chromatography. A*, **868**, 63-71 (2000).
7. C. M. Brotherton and R. H. Davis, "Electroosmotic flow in channels with step changes in zeta potential and cross section", *Journal of Colloid and Interface Science*, **270**, 242-246 (2004).
8. L. M. Fu, J. Y. Lin and R. J. Yang, "Analysis of electroosmotic flow with step change in zeta potential", *J. Colloid Interface Sci.*, **258**, 266-275 (2003).
9. D. Erickson and D. Li, "Analysis of Alternating Current Electroosmotic Flows in a Rectangular Microchannel", *Langmuir*, **19**, 5421-5430 (2003).
10. D. Sinton, L. Ren, and D. Li, "Visualization and numerical modelling of microfluidic on-chip injection processes", *Journal of Colloid and Interface Science*, **260**, 225-233 (2003).