

# 전기삼투 유동 중 마이크로 채널 내 곡률 변화에 따른 혼합특성에 대한 연구

허형석<sup>†</sup>, 서용권<sup>\*</sup>

## A Study on the curvature Effect of microchannel within Electroosmotic Flow

Hyeung Seok Heo and Yong Kweon Suh

### Abstract

In this study a newly designed and electro-osmotic micro-mixer is proposed. This design is comprised of a channel and metal electrodes attached in the local side wall surface. To investigate the flow patterns a numerical method is employed. To obtain the flow patterns numerical computation are performed by using a commercial code, CFD-ACE. The fluid-flow solutions are then cast into studying the characteristics of stirring with aid the Mixing index. Focus is given the effect on the electro osmotic flow characteristics under the curvature variation in the microchannel with the local of the electric field

**Key Words** : Electro Osmotic Flow (전기삼투 유동), Mixing index(혼합지수)

### 1. 서 론

전기삼투 유동은 MEMS기기 내의 유체를 이동하는 방법이다. 일반적으로 압력에 의한 이동방법을 많이 이용하고 있지만 시료의 양이 더욱더 작아지면서 전기적인 방법을 도입하고 있다. 전기적인 방법을 통하면 유체의 이송과 동시에 혼합효과도 얻을 수 있는데 이것은 MEMS기기의 성능을 결정하는 가장 중요한 부분이라고 할 수 있다. 다음은 전기삼투 유동에 연구 예이다.

Hong 등<sup>(1)</sup>과 Kim 등<sup>(2)</sup>은 전기삼투 유동을 실험으로 측정된 결과를 수치해석을 위한 경계조건으로 사용하여 실험결과와 수치해석의 유효성을 확인하였다. Santiago<sup>(3)</sup>는 전기삼투 유동 중에 전기이중층(Electric Double Layer; EDL) 주변의 유동을 유체의 관성력과 압력에 대한 영향의 관점에서 이론적으로 분석하였다. Kang 등<sup>(4)</sup>은 농도가 다른 두 수용액을 "T"형 채널 내에서 혼합할 때 강한 와류가 발생하는 것을 수치해석과 실험을 통해서 확인하였다. Kim과 Lee<sup>(5)</sup>는 마이크로 PIV기술을 이용하여 전기장의 세기와 EOF 유속 사이의 상관 관계를 알아보았다. Devasena thipathy 등<sup>(6)</sup>은 마이크로 채널 내 유동 분석을 위한 마이크로 PIV 방법과 마이크로 PTV (Particle tracking velocimetry)방법을 비교하여 설명하고 있다.

이와 같이 전기삼투 유동특성 연구뿐만 아니라 혼합효과를 분석하는 연구도 진행 중이다. 그

---

<sup>†</sup> 회원, 동아대학교 대학원 기계공학과  
E-mail : hsheo@donga.ac.kr

<sup>\*</sup> 회원, 동아대학교 기계공학부

러나 위에서 제시한 대부분의 연구에서는 전극에 박막을 입힌 상태로 제타 포텐셜을 조절하기 때문에 수 MV/cm까지의 고압의 전기장이 사용되고 있다. 이것은 에너지 낭비를 초래한다. 따라서 저압의 전기장에서도 조절이 가능한 직접 접촉에 의한 방법을 연구할 필요가 있다.

본 연구는 전기상투유동에서 마이크로 채널 내 별도의 전극을 형성하여 전기장을 국소적으로 변경한 뒤 이로부터 형성되는 채널 내 내부 유동 특성을 분석하고 이에 따른 혼합 효과의 향상에 대해서 수치해석 적으로 연구하고자 한다.

## 2. 유동 모델 및 수치해석 기법

### 2.1 유동 모델

본 연구는 수치해석적인 방법으로 마이크로 채널 내에서 전기상투 유동 중에 성질이 다른 두 유체를 잘 혼합하기 위한 조건을 찾고자 한다. Fig. 1은 본 수치해석의 유동모델을 나타낸 것이다. Fig. 1(a)는 채널의 단면을 나타낸 것이다. 직사각형 채널의 곡률을 R00로 하고 점점 곡률을 증가시켜 R40까지 변화시킨 것이다. 한편 Fig. 1(b)는 채널 양쪽 벽면에 전위를 인가할 수 있는 구조와 거리를 나타내고 있다. 직사각형 채널의 곡률을 R00로 하고 점점 곡률을 증가시켜 R40까지 변화시킨 것이다. 한편 Fig. 1(b)는 채널 양쪽 벽면에 전위를 인가할 수 있는 구조와 거리를 나타내고 있다.

본 연구에서 사용된 유동모델의 지배방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\rho\vec{U}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu\nabla\vec{U}) + \rho \cdot \vec{F} \quad (2)$$

여기서  $\vec{U}$ 는 유속,  $\rho$ 는 밀도,  $\mu$ 는 점성 계수이다. 식 (1)은 연속방정식이고, 식 (2)는 운동량 방정식이다. 식 (2)의 마지막 항은 전기력에 해당하며 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\rho \cdot \vec{F} = \rho_e \vec{E} \quad (2-1)$$

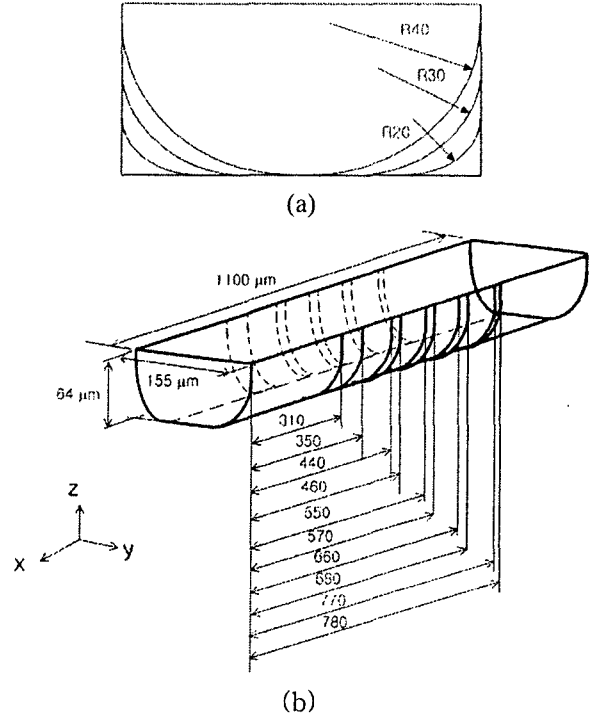


Fig. 1 Perspective view of the flow domain surrounded by a channel

여기서  $\rho_e$ 는 공간전하 밀도,  $\vec{E}$ 는 전기장이다. Maxwell 방정식을 도입하면

$$\nabla^2\phi = -\rho_e/\epsilon \quad (3)$$

여기서  $\phi$ 는 전위,  $\epsilon$ 는 유전율이다.

한편 Poisson-Boltzman 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla^2\phi = \frac{2ze n_\infty}{\epsilon} \sinh\left(\frac{ze\phi}{k_b T}\right) \quad (4)$$

여기서  $z$ 는 원자가,  $e$ 는 양성자 전하,  $n_\infty$ 는 고체 면에서부터 먼 곳의 이온농도,  $k_b$ 는 Boltzman 상수,  $T$ 는 절대온도이다.

Debye-Hückel 가정으로 식 (4)를 선형화하면

$$\nabla^2\phi = \frac{2z^2 e^2 n_\infty}{\epsilon k_b T} \phi = \frac{1}{\lambda^2} \phi \quad (5)$$

여기서  $\lambda$ 는 Debye 길이이다. 식 (3)의 Maxwell 방정식과 비교하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

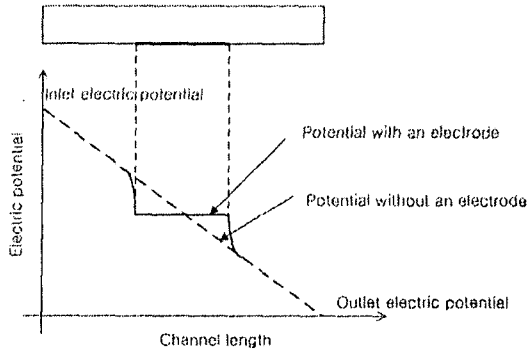


Fig. 2 Electric potential difference at a local electrode

$$\rho_e = -\frac{\epsilon}{\lambda^2} \psi \quad (6)$$

결과적으로 전기력은 다음과 같다.

$$\rho \cdot \vec{F} = \frac{\epsilon}{\lambda^2} \psi \nabla \phi \quad (2-3)$$

벽면근처 이온분포에 의해 형성되는 전위  $\psi$ 는 식 (5)에 의해 해석적으로 구할 수 있다. 이 분포로부터 식 (2)를 적분할 수 있으며, 격자 간격이 일반적으로  $\lambda$ 에 비해 매우 크므로 보통 첫 격자선에서 제타 포텐셜의 영향이 나타난다.

## 2.2 경계조건

본 연구의 지배방정식을 위한 경계조건은 다음과 같다. 입구와 출구 경계조건으로 입출구의 압력차는 0이고 전위차는 11V이다. 벽면 경계조건으로 Debye 두께는  $10^{-9}m$ , 제타 포텐셜은  $-100mV$ 로 정의하였고 벽면전극의 첫 번째 국소 전위는 7.8V이고 1.1V씩 순차적으로 줄여 가면서 전위를 인가하였다. Fig. 2와 같이 채널 내에서 일정하게 감소하는 전위 분포에서 국소적으로 일정한 간격의 임의의 벽면전위가 분포한다. 그리고 혼합 효과를 알아보기 위해서 입구 영역의 반을 농도 0, 나머지 반을 농도 1로 하였다.

본 연구에서 작동 유체는 물을 사용하였으며 밀도는  $1000kg/m^3$ , 동점성 계수는  $10^{-6}m^2/s$ , 상대 유전율은 78.5의 물성치를 가정하였다.

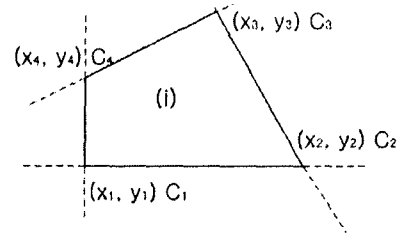


Fig. 3 Element number, node number positions and concentration

## 2.3 사용코드 및 격자구성

본 해석을 위하여 보편적인 신뢰성이 입증되어 있는 상용코드(CFD-ACE)를 사용하였고, 격자수는 약 25만개의 격자를 형성하였다.

## 2.4 혼합지수와 평균농도

본 연구에서는 농도가 다른 두 유체의 혼합 정도를 나타낼 수 있는 혼합지수를 다음과 같은 방법으로 얻었다. Fig. 3은 채널 유로 방향의 수직 단면에 대한 임의의 한 격자를 나타내고 있다. 격자선의 교점인 노드(node)에는 계산 결과로 얻어진 농도값이 정의되어 있다. 이 노드 정보와 요소 정보, 농도값을 이용하여 혼합지수를 구할 수 있다. 식 (7), (8)은 임의의 요소에 대한 면적과 대표 농도를 나타낸 것이고 식 (9), (10), (17), (11)는 각각 면적 가중치, 하나의 요소 평균 면적, 평균 농도, 혼합지수를 나타낸다.

$$A_i = \frac{1}{2} \{ |(x_2 - x_1)(y_4 - y_1) - (x_4 - x_1)(y_2 - y_1)| + |(x_2 - x_3)(y_4 - y_3) + (x_4 - x_3)(y_2 - y_3)| \} \quad (7)$$

$$\bar{C}_i = \frac{1}{4} (C_1 + C_2 + C_3 + C_4) \quad (8)$$

$$f_i = A_i / \bar{A} \quad (9)$$

$$\bar{A} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I A_i \quad (I; \text{number of elements}) \quad (10)$$

$$\bar{C} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I f_i \bar{C}_i \quad (11)$$

$$D = \sqrt{\frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \left( \frac{\bar{C}_i - \bar{C}}{\bar{C}} \right)^2} f_i \quad (12)$$

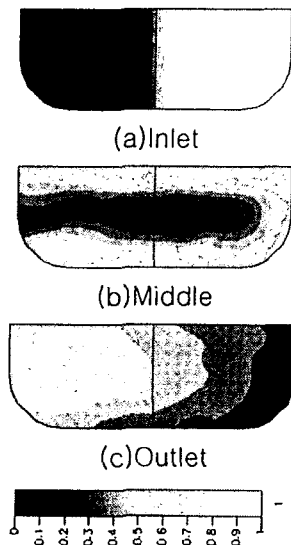


Fig. 5 Dye deformation at each position

### 3. 결과 및 검토

Fig. 4는 곡률R20인 경우에 대한 채널입구(a)와 중간(b), 출구(c)에서의 농도분포를 나타내고 있다. 채널입구에서 반으로 나누어진 농도분포는 벽면전극을 지나면서 점점 섞여지는 볼 수 있다.

Fig. 5는 여러 가지 곡률반경을 적용한 채널에 대하여 각각의 혼합지수를 채널길이에 따라 나타내었다. 직사각형 채널(R00)의 경우 채널 출구에서 0.46의 혼합지수를 나타내고 있고 곡률반경이 40인 경우에는 0.16을 나타내고 있다. 이것으로 곡률이 크면 클수록 혼합효과가 개선됨을 알 수 있다.

### 4. 결론

전기삼투 유동 중에 채널 곡률을 변화시킬 때의 내부 유동을 분석하고 혼합효과에 대해서 연구하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 벽면전극에 직접적으로 전기를 인가하여 유동을 제어 할 수 있다.
- 2) 채널곡률을 높일수록 혼합효과는 향상된다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

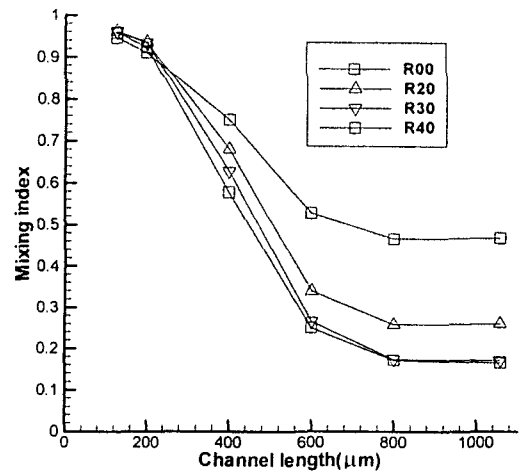


Fig. 5 Comparison of Mixing index among R00, R20, R30 and R40

### 참 고 문 헌

- 1) Hong, S.B., Tang., Djukic, D. and Modi, V., 2001, "Simulation and Experimental Validation of Electro-osmotic Flow in a Microfluidic Channels," *Proc. Int. Conf. of MEMS*, Berkely, California.
- 2) Kim, M.J., Beskok, K. and Kihm, K.D., 2002, "Electro-osmosis-driven Micro-channel Flow: A Comparative Study of Microscopic Particle Image Velocimetry Measurements and Numerical Simulations," *Exp Fluids*, Vol. 33 pp. 170-180.
- 3) Santiago, J.G., 2001, "Electroosmotic Flows in Microchannels with Finite Inertial and Pressure Forces," *Anal. Chem*, Vol. 73(10), pp. 2353-2356.
- 4) Kang, K.H., Shin, S.M. Lee, S.J. and Lang, I.S., 2003, "Visualization of the Two-layered Electroosmotic Flow and its EHD instability in T-channels by micro PIV," *Proc. KSV*, Postech, Pohang, Korea, pp.75-78.
- 5) Kim, Y.M. and Lee, S.J., 2003, "Micro PIV Analysis of Electro-osmotic Flow inside Microchannels," *KSV J*, Vol. 1(2), pp. 47-51.
- 6) Devasenathipathy, S. and Santiago, J. G., 2002, "Particle Tracking Techniques for Electrokinetic Microchannel Flows," *Anal. Chem*, Vol. 74, pp. 3704~3713.