

## 마이크로 채널 내 국소적 전위 인가에 따른 전기삼투 유동 및 혼합 특성에 대한 수치해석적 연구

서용권<sup>†</sup> · 허형석<sup>\*</sup>

### A Numerical Study on Electro-osmotic Flow and Stirring Characteristics in a Microchannel with Local Adjustment of Electric Potential

Yong Kweon Suh and Hyeng Seok Heo

**Abstract.** In this study a newly designed electro-osmotic micro-mixer is proposed. This study is composed of a channel and metal electrodes attached locally on the side wall surface ultimately to control the mixing effect. To obtain the flow patterns, numerical computation was performed by using a commercial code, CFD-ACE. The fluid-flow solutions are the cast into studying the characteristics of stirring in terms of the mixing index. It was shown that the local control of the electric potential can indeed contribute to the enhancement of mixing effect.

**Key Words :** Electro-osmotic Flow (전기삼투 유동), Electric Field (전기장), Mixing Index (혼합지수)

#### 1. 서 론

전기삼투 유동은 MEMS기술과 랩온칩 설계에서 마이크로 채널 내 용액 및 시료를 운반하는 방법으로 널리 사용되고 있다. 채널 양 끝에 간단히 전극을 두어 전압을 인가함으로써 유체를 구동하는 전기삼투에 의한 운반법이 기존의 압력차에 의한 마이크로 펌프의 구동방법보다 훨씬 더 간단하다고 볼 수 있다.

마이크로 채널 내 전기삼투 유동에 관한 연구로서, Hong 등<sup>(1)</sup>과 Kim 등<sup>(2)</sup>은 전기삼투 유동 실험으로 측정된 결과를 수치해석을 위한 경계조건으로 사용하여 실험결과와 수치해석의 유효성을 확인하였다. Santiago<sup>(3)</sup>는 전기삼투 유동 중에 전기 이중층(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. Kim 과 Lee<sup>(5)</sup>는 마이크로

PIV기술을 이용하여 전기장의 세기와 EOF (Electro-Osmotic Flow) 유속 사이의 상관관계를 알아보았다. Devasenathipathy 등<sup>(6)</sup>은 마이크로 채널 내 유동 분석을 위한 마이크로 PIV (Particle Image Velocimetry) 방법과 PTV (Particle Tracking Velocimetry) 방법을 비교하여 설명하고 있다.

다음으로, 전기삼투 유동 중 채널 내벽의 성질을 변화시킬 때 나타나는 현상에 대한 연구로서, Molho 등<sup>(7)</sup>은 일반 모세관(유리) 내부에 왁스를 부분적으로 코팅한 후 코팅한 부분과 코팅되지 않은 부분에서 제타 포텐셜이 다른 것을 확인하였고 속도분포에 있어서 변화가 있음을 확인하였다. Herr 등<sup>(8)</sup>은 모세관 내벽이 비균일한 제타 포텐셜의 분포를 가지는 경우에 대하여 유동특성을 분석하였다. Lee 등<sup>(9,10)</sup>은 채널 양쪽 벽면에 제타 포텐셜이 조절될 수 있도록 제작하고 이 포텐셜의 영향에 따른 내부 유동의 변화를 분석하였다. Qian 과 Bau<sup>(11)</sup>는 캐버티 유동에서 제타 포텐셜에 변화를 주었을 때 나타나는 유동 특성을 이론적으로 관찰하고 있다.

그러나 위에서 제시한 대부분의 연구에서는 전극에 박막을 입힌 상태로 제타 포텐셜을 조절하기 때문에 수MV/cm까지의 고압의 전기장이 사용되고 있다. 이

<sup>†</sup>책임저자, 회원, 동아대학교 기계공학부

E-mail : yksuh@dau.ac.kr

<sup>\*</sup>회원, 동아대학교 기계공학부

것은 고전압 전원공급 장치를 별도로 필요로 한다. 따라서 저압의 전기장에서도 조절이 가능한 직접 접촉에 의한 방법을 연구할 필요가 있다.

본 연구는 전기삼투 유동에서 마이크로 채널 내 별도의 전극을 형성하여 전기장을 국소적으로 변경한 뒤 이로부터 형성되는 채널 내 내부 유동 특성을 분석하고 이에 따른 혼합효과에 대해서 연구하고자 한다.

### 2. 전기삼투에 의한 흐름

마이크로 스케일에서는 채널 내 유체수송의 동력원으로 압력을 사용한다. 마이크로 스케일에서는 그러나 이에 필요한 압력이 상대적으로 크게 증가하여 이보다 더 편리한 방법으로 전기력에 의한 방법을 사용하는 경우가 많다. Fig. 1(a)와 같이 채널 내의 유속 분포는 압력차에 의한 유동일 경우 포물선 형태를 하고 있고 중앙 부분에서 가장 강한 유속을 나타낸다. 그러나 Fig. 1(b)와 같이 채널 내에 압력차가 없는 상태에서 채널의 입구와 출구에 전기장을 가했을 경우에는 채널의 벽면에서 가장 강한 유속을 보이고 곧바로 채널 내의 유속분포는 일정한 모양이 된다. 이러한 유동을 전기삼투 유동이라고 한다.

채널의 입구와 출구에 전극을 설치하여 채널 내에 전기장을 가했을 때 발생하는 전기삼투 유동의 기본 개념을 설명하면 다음과 같다. 채널 내에 유체를 채우면 채널 표면에는 주로 전자 전하(electronic charge:  $\ominus$ )가 집결하고 이와 접촉한 유체 중에는 반대 이온(counter ion:  $\oplus$ )이 표면 근처로 모인다. 이때 채널 양 끝에 전극으로 전압을 걸어 주면 표면 근처의 유동성이 있는 유체의  $\oplus$ 이온은 음극을 향해 이동한다. 여기서 반대 이온이 모여 있는 표면 근처의 유체 영역을 전기적 이중층이라고 한다. 이 층은 Stern층과 Gouy-Chapman층(확산층)으로 구성되고 Stern층은 채널 표면의 전자 전하와 강하게 연결되어 거의 움직이지 않는 층이고 확산층은 유동성을 가지는 층이다(Fig. 1(c)). Stern층과 확산층의 교차면 즉 전단면(shear plane)에서의 전위를 제타 포텐셜(zeta potential)이라고 한다. 이 제타 포텐셜이 전기삼투 유동을 일으키는 주된 요인이다. 확산층 내의 이온이 이동함에 따라 확산층 밖의 유체도 유체의 점성 작용으로 같이 이동하며 결국 채널 내 전체 유체가 균일한

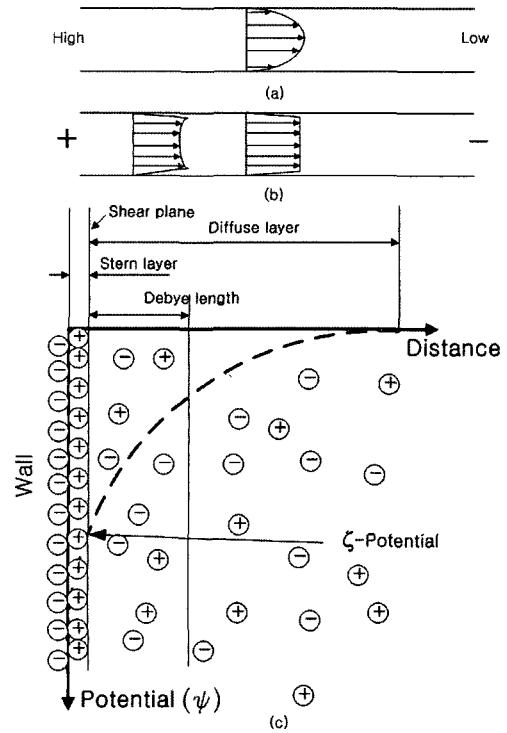


Fig. 1. Typical profiles of pressure-driven flow(a) and electro-osmotic flow(b), and definitions of Stern layer, Debye length, diffuse layer and zeta potential(c):  $\oplus$ , positive ion;  $\ominus$ , negative ion; ----, distribution of electric potential

속도로 이동하는 흐름이 된다. 이때 채널 표면의 유속  $\vec{u}_{EOF}$ 는 유체의 전기 유전율( $\epsilon$ ), 제타 포텐셜( $\zeta$ ), 전기장의 벽면투영 성분( $E_w$ )에 비례하고 점성계수( $\mu$ )에 반비례하는 아래와 같은 Helmholtz-Smolouchowski 식으로 구해진다.

$$\vec{u}_{EOF} = -\frac{\epsilon \zeta E_w}{\mu} \tag{1}$$

Debye 길이는 대칭염(symmetric electrolyte)의 경우, 아래와 같이 정의되며 이중층의 두께에 대한 특성길이이다.

$$\lambda = \sqrt{\frac{\epsilon k_b T}{2z^2 e^2 n_\infty}} \tag{2}$$

$$n_\infty = 1000 N_d M \tag{3}$$

여기서  $\epsilon$ 은 유전율,  $k_b$ 는 Boltzmann 상수,  $T$ 는 절대온도,  $z$ 는 대칭염을 구성하는 각 이온의 원자가 (valence),  $e$ 는 전자의 전하량,  $n_\infty$ 는 고체면에서 먼 곳의 이온농도,  $N_A$ 는 Avogadro 수,  $M$ 은 몰농도이다. 수용액의 경우 25°C에서 Debye 길이는

$$\lambda = \frac{3.04 \times 10^{-10}}{z\sqrt{M}} [m] \quad (4)$$

이다. 예를 들면 NaCl의 경우 농도가 0.1 M이면 Debye 길이는 1 nm이고 농도가 1 mM이면 10 nm 정도로 매우 작다.

### 3. 유동 모델 및 수치해석 기법

#### 3.1 유동 모델

본 연구는 수치해석적인 방법으로 마이크로 채널 내에서 전기삼투 유동 중에 성질이 다른 두 유체를 잘 혼합하기 위한 조건을 찾고자 한다. Fig. 2는 본 수치해석의 유동모델로서 세 가지 전극설치의 구조를 나타낸 것이다. Fig. 2(a)는 채널 한 쪽 벽면 중간의 국소 부분에 일정한 전위를 줄 수 있는 구조이며, Fig. 2(b)와 2(c)는 각각 채널 양쪽 측벽면의 상단과 하단

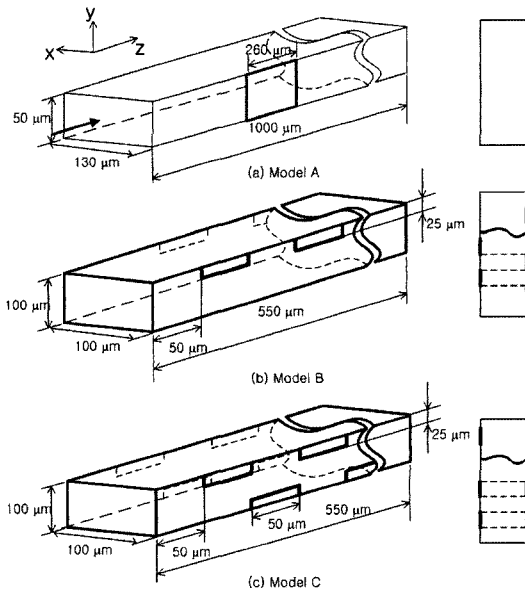


Fig. 2. Perspective view of the three channels having the third, local electrodes on the side walls.

에 국소적으로 전위를 가할 수 있는 구조를 하였다. 본 연구에서 사용된 유동모델의 지배방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{D\rho\vec{u}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + F \quad (6)$$

여기서,  $\vec{u}$ 는 유속,  $p$ 는 압력,  $\rho$ 는 유체밀도,  $\mu$ 는 유체의 점성계수,  $F$ 는 체적력이며,  $t$ 는 시간을 나타내고 공간좌표는  $x, y, z$ 이다. 식 (5)는 연속방정식, 식 (6)은 운동량 방정식이다. 식 (6)의 마지막 항은 전기력에 해당하며 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$F = \rho_e \vec{E} \quad (7)$$

여기서  $\rho_e$ 는 공간 전하밀도이다.  $\vec{E}$ 는 전기장으로 서 총 전위  $\Phi$ 와의 관계는  $\vec{E} = -\nabla\Phi$ 이다.

한편 총 전위  $\Phi$ 는 외부 전극(즉 채널 양 끝에 설치한 전극과 채널 측면 벽에 설치한 전극; bulk 영역) 전위로부터 형성되는 전위  $\phi$ 와 앞에서 언급한 이온전하의 불균일 분포로 야기되는 전위(EDL 영역)  $\psi$ 의 합으로 생각할 수 있다;  $\Phi = \phi + \psi$ . 그러나 bulk 영역에서는  $\psi = 0$ 인 반면 EDL 영역에서는  $\psi \ll \text{grad } \phi$ 이기 때문에  $\phi$ 에 대한 영향을 무시할 수 있다. 따라서 식 (7)의 우변에 있는 전기장은  $E = -\nabla\phi$ 의 식으로 구하여도 무방하다.

$\phi$ 는 Laplace 방정식

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (8)$$

으로 구해진다. 여기서, 경계조건은 각 전극 표면에 서 주어지는 전위와 같다. 이온 전하의 분포 즉 전하 밀도  $\rho_e$ 에 따른 유동장 내 전위  $\psi$ 는 아래의 Poisson 방정식으로 결정된다.

$$\nabla^2 \psi = -\rho_e / \epsilon \quad (9)$$

한편 Boltzmann의 분포 이론에 의하면 전하 밀도와 전위와의 관계는 아래와 같다.

$$\rho_e = -2ze n_\infty \sinh\left(\frac{ze\psi}{k_b T}\right) \quad (10)$$

이것을 식 (9)에 대입하면 아래와 같은 Poisson-Boltzmann 방정식을 얻을 수 있다.

$$\nabla^2 \psi = \frac{2ze n_{\infty}}{\epsilon} \sinh\left(\frac{ze\psi}{k_b T}\right) \quad (11)$$

이 식의 경계조건은, 채널 벽면에서의 전위 값이 벽면에서의 제타 포텐셜  $\zeta$ 와 같다는 것이다. 물론 이 식 그대로를 수치해석적으로 풀 수는 있으나, 일반적인 경우로서 Debye 길이가 충분히 작을 때에는 우변을 선형화한(Debye-Huckel 선형화)

$$\nabla^2 \psi = \frac{2z^2 e^2 n_{\infty}}{\epsilon k_b T} \psi = \frac{1}{\lambda^2} \psi \quad (12)$$

을 사용하는 것이 편리하다. 여기서  $\lambda$ 는 식 (2)과 같은 Debye 길이이다. 식 (12)와 (9)를 비교하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\rho_e = -\frac{\epsilon}{\lambda^2} \psi \quad (13)$$

결과적으로 이온 전하의 분포에 따른 유체의 체체력은 다음과 같이 주어진다.

$$F = \frac{\epsilon}{\lambda^2} \psi \nabla \phi \quad (14)$$

종합하면, 식 (14)에서  $\phi$ 는 식 (8)을 풀어서 구하며,  $\psi$ 는 식 (12)를 풀어서 구한다. 그러나 마이크로 채널은 수십~수백  $\mu\text{m}$ 의 폭을 가지며 Debye 길이는 수 nm의 크기이므로 마이크로 채널 내 유동장을 구하기 위해 EDL 층까지 포함하여 격자계를 구성하는 것은 비효율적이다. 따라서 이 경우는 식 (12)를 1차원화한 근사식으로 해를 구한 뒤 그것으로부터 EOF 속도를 구하고 이를 채널 벽면에서의 속도 경계조건으로 하여 마이크로 채널 내 유동장을 해석하는 것이 보편적이다. 이 때 표면에서의 EOF 속도를 해석적으로 구해보면 식 (1)과 같음을 확인할 수 있다.

### 3.2 경계조건

본 연구의 지배방정식을 위한 경계조건은 다음과 같다. 입출구 경계조건으로 입출구의 압력차는 0이다. 전위조건으로서, 모델 A의 상류 전극 전위는 10V, 하류 전극 전위는 0V, 벽면의 제3의 국소 전극 전위는 5V이며, 다른 벽면에서의 제타 포텐셜은 -15mV로 설

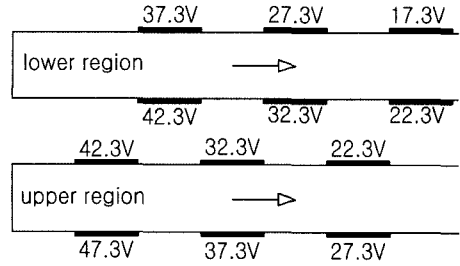


Fig. 3. Arrangement of electrodes and the corresponding potentials applied on each electrode for the model C.

정하였다. 모델 B에서는 상류 전극 전위를 55V로, 하류 전극 전위를 0V로 설정하였으며, 채널 벽면의 전극 전위는 첫 전극이 47.3V로 설정되며 이후 하류에 배치된 전극은 5V씩 순차적으로 줄여 가면서 설정하였다. 모델 C의 경우에도 상류 전극 전위는 55V, 하류 전극 전위는 0V로 설정되어 있다. 그리고 측면벽의 제 3의 전극 전위는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 설정하였다. 전극 이외의 벽면에서의 제타 포텐셜은 -100mV로 설정하였다. 모든 경우에 대해 Debye 두께는 1 nm로 하였다.

측면 벽에서의 제3의 전극에 상기와 같은 국소전위를 각각 설정하는 요령은 다음과 같다. 우선, 채널 상하류의 수조(reservoir)에 있는 두 전극의 전위 만에 의한 채널 내 전위는 직선분포를 이룬다(Fig. 4의 쇄선). 이 때 채널 내의 어떤 지점  $x_p$ 에다 제 3의 전극을 설치하였다면, 이 지점에서의 전위는 해당 전극이

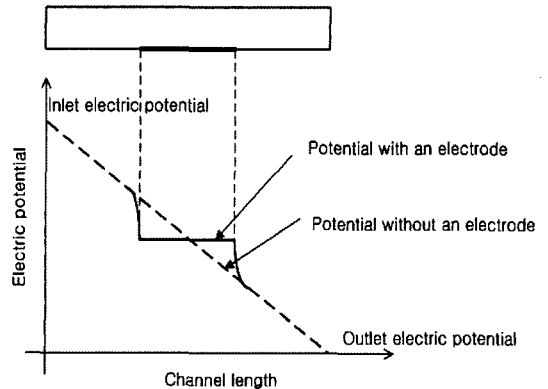


Fig. 4. Electric potential distribution in a channel having a local electrode.

없을 때의 원래의 전위  $V_p$ 와 동일한 값으로 설정한다. 그러나 이렇게 한다하더라도 제3의 전극 표면에는 균일한 전위가 설정되기 때문에  $x_p$ 지점을 제외한 다른 전극표면 지점에서는 기존의 전위와 차이가 생기며, 이로 인하여 채널 내 유동양상은 달라지는 것이다 (Fig. 4 참조).

채널 내 혼합 효과를 알아보기 위해서 수동적 유체 입자를 입구에 분포시켰으며, 영역의 반은 농도 0로, 나머지 반은 농도 1로 설정하고 이후의 농도 변화를 관찰하였다.

본 연구에서 작동 유체로서는 물을 사용하였으며 밀도  $1000\text{kg/m}^3$ , 동점성 계수  $10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ , 상대 유전율 78.5의 물성치를 가정하였다.

### 3.3 사용코드 및 격자구성

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

### 3.4 혼합지수와 평균농도

본 연구에서는 농도가 다른 두 유체의 혼합 정도를 나타낼 수 있는 혼합지수를 다음과 같은 방법으로 얻었다. Fig. 4는 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(15), (16)은 임의의 요소에 대한 면적과 대표 농도를 나타낸 것이고 식(17), (18), (19), (20)은 각각 면적 가중치, 요소의 평균 면

적, 평균 농도, 혼합지수를 나타낸다.

$$A_i = \frac{1}{2} \{ |(x_2-x_1)(y_4-y_1) - (x_4-x_1)(y_2-y_1)| + |(x_2-x_3)(y_4-y_3) - (x_4-x_3)(y_2-y_3)| \} \quad (15)$$

$$\bar{C}_i = \frac{1}{4} (C_1 + C_2 + C_3 + C_4) \quad (16)$$

$$f_i = A_i / \bar{A} \quad (17)$$

$$\bar{A} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I A_i \quad (I; \text{number of elements}) \quad (18)$$

$$\bar{C} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I f_i \bar{C}_i \quad (19)$$

$$D = \sqrt{\frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \left( \frac{\bar{C}_i - \bar{C}}{\bar{C}} \right)^2 f_i} \quad (20)$$

## 4. 결과 및 검토

### 4.1 유동 모델 A

Fig. 6은 유동모델 A에 대한 수치해석 결과로서 바닥에서 높이  $25\ \mu\text{m}$ 만큼 떨어진 단면에서의 전위분포, 전기장, 속도장을 나타낸 것이다. Fig. 6(a)는 입구와 출구에 10V전위차를 준 경우이며 벽면전극의 전위는 5V이다. 이 때 등전위 분포는 벽면전극 중심을 기준으로 대칭형 쌍곡선 분포를 보이고 있다. 채널의 입구에서 일정한 간격의 등전위 분포가 채널 벽면전극 주위에서 휘었다가 벽면 중심면을 지나서는 다시 회복되는 형태를 하고 있다. Fig. 6(b)의 전기장은 Fig. 6(a)의 등전위선에 수직이며, 채널 진행방향이던 전기장 분포가 측면 전극을 만나면서 전극방향으로 휘었다가 중심 면을 지나면서 다시 반대방향으로 휘는 것을 확인할 수 있다. 이것으로 Fig. 6(c)와 같은 속도장의 결과가 나타나는데, 입구에서 채널 진행방향으로 균일한 분포로 진행하던 유체는 측면전극이 있는 지점에서 전극과 멀어지는 방향으로 휘어지는 것을 볼 수 있다. 전극 표면에서는 전위값이 균일하므로 전기장의 벽면투영성분  $E_w$ 는 0이고, 따라서 전기삼투에 의한 표면속도  $u_{EOF}$ 도 0이다. 이에 따라 전극에 인접한 지점의 속도는 작다. 한편 전극의 양끝에는 전

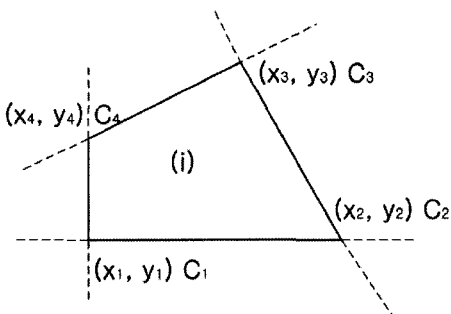


Fig. 5. Coordinate and corresponding concentration defined at each node of the  $i$ th element in the flow domain at a channel cross-section.

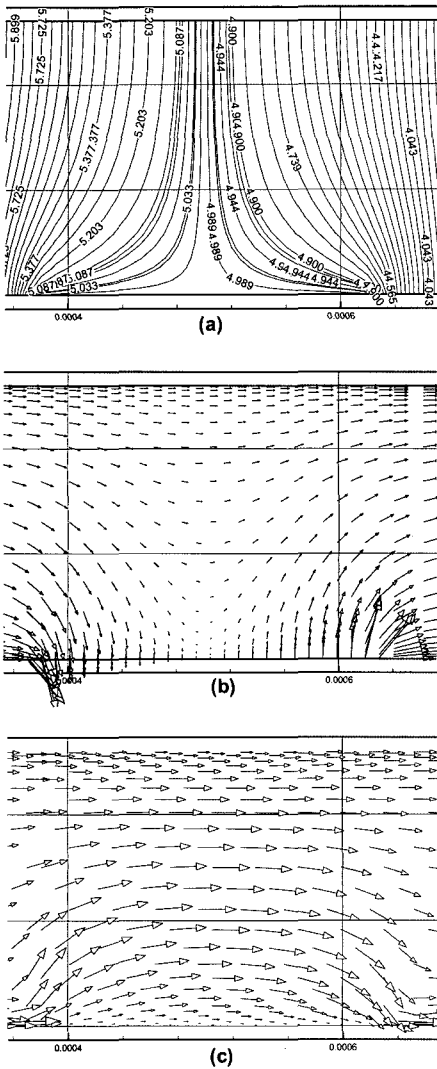


Fig. 6. Distributions of the electric potential(a), the electric field(b), and the velocity field(c) at 25  $\mu\text{m}$  above the bottom wall for model A.

기장이 크게 형성되므로 흐름도 강하게 나타난다.

Fig. 7은 채널 내부에서 발생하는 2차 유동을 각각의 채널 수직단면에서 나타낸 것이다. Fig. 7(a)는 국소전극이 시작되는 위치에서의 분포를 나타내고 있다. 상하 벽면 근처에서는 우측의 측면전극 방향으로 흐르고 있는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 채널 상하 표면에서 전기장이 측면전극을 향하고 있기 때문에 체적력이 이 방향이기 때문이다(Fig. 6(b) 참고). 그리고 이러한 영향으로 채널의 중심에서는 측면전극과는 반

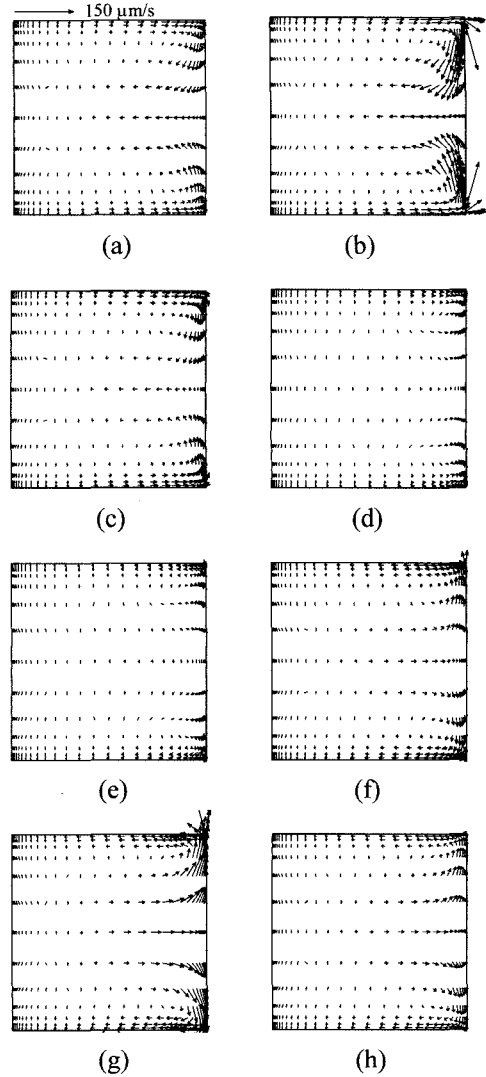
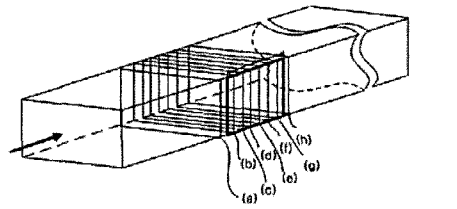


Fig. 7. Sectional view of velocity vectors in the cross-section of the channel of model A.

대 방향으로 흐르면서 전체적으로 볼 때 두 개의 와류가 발생한 유동양상을 확인할 수 있다. Fig. 7(b)는 Fig. 7(a)보다는 약간 더 하류지점에서의 속도장으로, Fig. 7(a)에 비해 상대적으로 강한 유속을 보이고 있

다. 흐름은 Fig. 7(c)에서 보다 약한 2차 유동을 보이다가 전극 중심 위치에서 가장 약한 흐름이 나타난다 (Fig. 7(d)). 중심에서 보다 더 하류에 있는 (e), (f), (g), (h)의 위치에서는 앞과 대칭적이면서도 반대 방향의 흐름이 형성된다. 이것은 Fig. 6(b)의 전기장 분포가 대칭이기 때문이다.

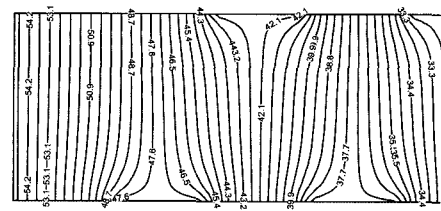
그러나 유체 혼합의 관점에서는 이 같은 흐름의 대칭성이 전혀 도움이 되지 못할 것으로 예측된다. 그것은, 시계방향으로 회전하던 유체가 다시 같은 경로를 따라 반시계 방향으로 회전함으로써 유체의 변형이 잠시 일어났다가 다시 원래의 상태로 복귀하기 때문이다.

#### 4.2 유동 모델 B, C

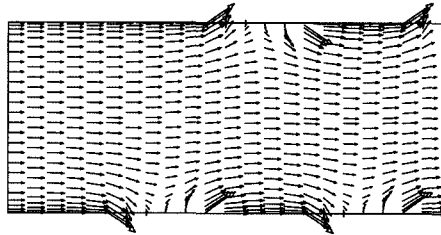
Fig. 8, 9는 각각 채널모델 B, C에 대하여 채널입구 영역에서 바닥으로부터 90  $\mu\text{m}$ 만큼 떨어진 단면에서의 전위, 전기장, 속도분포를 보여 주고 있다. Fig. 8(a)의 모델 B에서는 전극이 측면 상단에 서로 엇갈리게 부착된 구조를 보이고 있다(Fig. 2(b)). 여기서도 각 전극에 설정된 전위는 전극 없는 경우의 선형 분포에서 얻어지는 해당 지점의 전위와 같도록 하였다. 이에 따른 전기장의 분포(Fig. 8(b))는 앞의 경우(즉, Fig. 6(b))와 같이 전극의 두 끝단 근처에서 큰 값을 보이며 전극표면에서는 표면에 수직인 방향을 보인다. 이로 인한 흐름의 양상(Fig. 8(c))은 앞과 같이 전극의 양 끝단 근처에서 강하고 표면에서는 약한 흐름을 나타낸다. 그리고 전체적으로 흐름은 지그재그 형태이므로 앞의 모델 A와 같이 2차 유동은 같은 경로를 따라 왕복운동하는, 그래서 혼합효과의 측면에서는 좋지 못한 형태로 예측된다.

Fig. 9는, 채널의 같은 벽면에서는 전극을 상하에 서로 엇갈리게 하였지만 서로 다른 벽면의 전극들은 서로 마주보도록 한 모델 C에 대한 수치해석 결과이다. 여기서는, 전극의 설치는 서로 마주보도록 하였지만 전극전위의 값은 서로 다르게 설정하였기 때문에 Fig. 9(a)와 같이 채널 전체에 걸쳐 등전위선이 휘어지는 모양을 보인다. 이에 따라 전기장 Fig. 9(b)와 속도장 Fig. 9(c)도 전체 채널에 걸쳐 같은 방향으로 거의 일정하게 휘어지는 모양을 나타내고 있다.

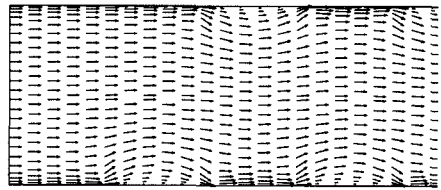
Fig. 10은 모델 C에 대해서 일정한 간격의 채널수직 단면에서의 속도장을 보여주고 있다. Fig. 10(a)와 (e)의 결과가 비슷한 것은 본 유동이 일정한 주기성을



(a)



(b)



(c)

Fig. 8. Distribution of the electric potential(a), the electric field(b), and the velocity field(c) at 90  $\mu\text{m}$  above the bottom wall for model B.

가지고 있기 때문이다. 여기서도 벽면전극의 양끝단에서 유속이 강한 것을 확인할 수 있다. (a)위치에서는 좌측상단에서 우측하단방향으로 가로질러 내려오는 형태이며 (c)위치에서는 좌측 하단에서 우측 상단을 향하는 형태이다. 이같은 유동양상이 혼합에는 어떠한 효과를 나타낼 것인지에 대해서는 유동장만으로는 쉽게 예측할 수 없다. 다만, 앞의 모델 A, B와는 달리 2차 유동의 형태가 단순한 왕복운동의 특징은 아님을 확인할 수 있다.

#### 4.3 혼합특성

Fig. 11은 모델 B, C에 대한 채널의 입구와 중간 그리고 출구 부분에서 혼합효과를 나타내기 위한 수동 유체입자의 농도분포(앞으로 편의상 염료라 칭함)를

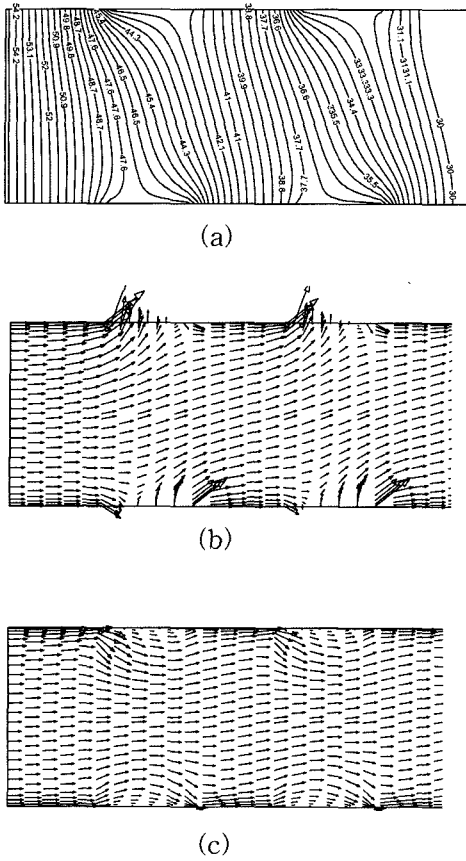


Fig. 9. Distributions of the electric potential(a), the electric field(b), and the velocity field(c) at 90  $\mu\text{m}$  above the bottom wall for model C.

보여준 것으로서, Fig. 11(a), (b), (c)는 모델 B에 대한 결과이며 Fig. 11(d), (e), (f)는 모델 C에 대한 결과이다. 모델 B의 경우는, 입구에서 일정하게 반으로 구분된 염료가 벽면 전극이 위치한 채널 상단에서 약간 혼합한 것외에는 별다른 혼합효과가 없는 것으로 확인할 수 있다. 하지만 모델 C에서는 입구에서 출발한 염료가 벽면전극을 지나면서 상당한 변형을 일으키고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 12는 이러한 혼합효과를 정량화한 혼합지수 (mixing index)를 보여준 것이다. 혼합지수의 값이 작을수록 혼합효과는 뛰어나다. 모델 B에 대한 혼합지수는 입구에서 약 0.98(이론적으로는 이 값이 1이 되어야 하지만, 농도 1의 유체와 농도 0의 유체 사이 경계에서 농도 값이 0.5로 처리되기 때문에 정확히 1이

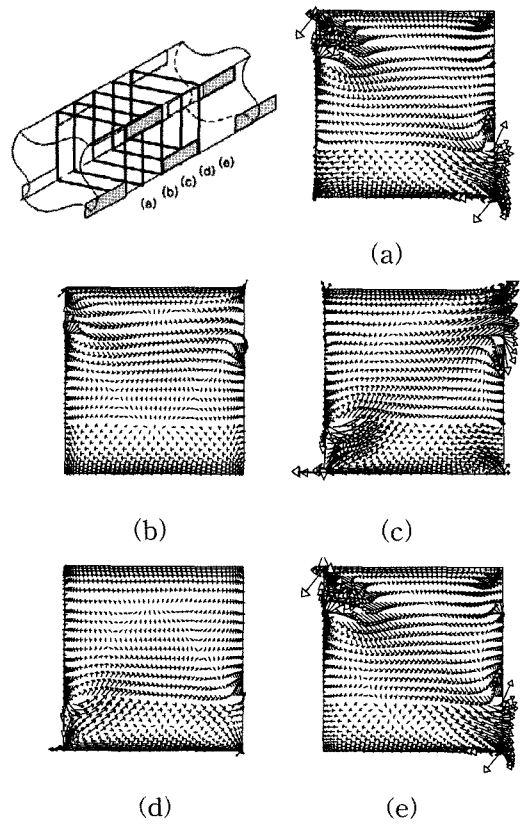


Fig. 10. Velocity vectors in the channel cross-sections for model C.

되지 않는다), 출구에서 약 0.925의 혼합지수를 나타내고 있고 모델 C는 입구에서 약 0.98, 출구에서 약 0.70의 혼합지수를 나타내고 있다. 이 결과에 의해서 모델 C가 더욱더 혼합이 잘 되는 채널임을 확인할 수 있다.

본 연구에서 취급한 단순한 형상의 마이크로 채널 유동의 경우 혼합효과는 2차유동의 양상에 의해 지배된다. 모델 B의 경우 혼합효과가 거의 없는 것은, 앞에서 언급한 바와 같이, 국소전극 및 그 전위의 규칙적이면서도 대칭적인 배열로 인하여 2차 유동이 단순히 왕복운동만 되풀이하는 특징을 보이기 때문이다. 이에 비해 모델 C에서는 채널 수직단면 상에서의 2차 유동이 위치에 따라서 서로 교차하는 대각선 방향의 흐름이 나타나므로 단순한 왕복운동과는 달리 유체혼합을 증진시키는 효과가 나타나지 않나 생각된다.



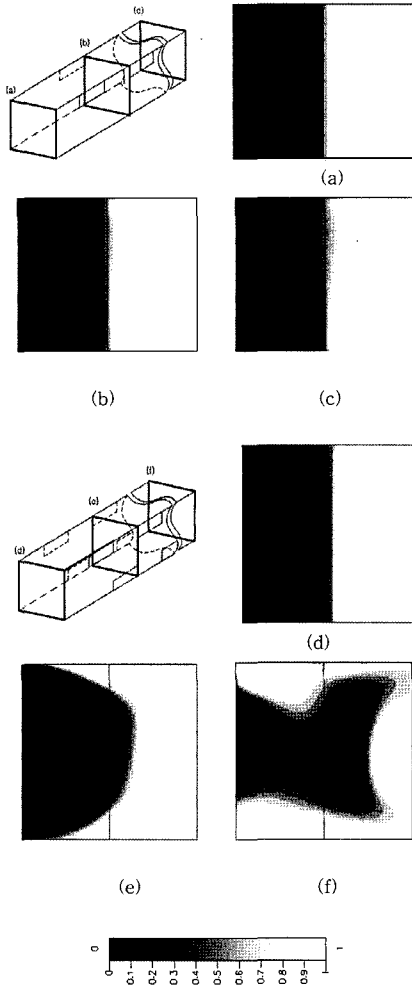


Fig. 11. Dye deformation at each cross-section of the channels of model B and model C.

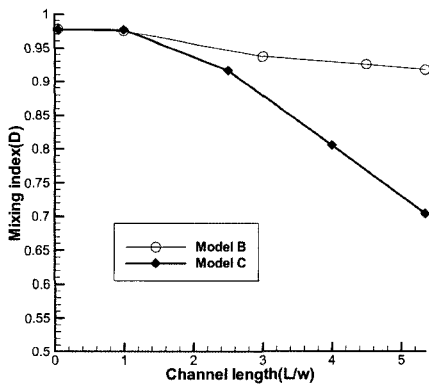


Fig. 12. Comparison of the mixing index obtained for model B- and model C-channels.

#### 4. 결 론

본 논문에서 수치해석을 이용하여 마이크로 채널 내 국소적 전위 인가에 따른 전기삼투 유동 및 혼합 특성에 대하여 분석하였다. 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) 채널 벽면의 국소전극 주위의 유동은 채널 벽면의 제타 포텐셜과 국소전극의 전위차에 의해 전단유동이 발생하였다.

(2) 채널의 상단과 하단의 공간주기적 전극의 전위를 조절하면 유체의 늘임과 접힘 효과를 얻을 수 있다.

(3) 혼합효과를 높이기 위한 전극 설치 방법은 벽면의 상단에만 엇갈림구조로 하기보다는 상단과 하단에 전극을 마주 보게 설치하고 상단과 하단이 서로 엇갈리도록 하는 것이 보다 효과적이다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학기술재단의 국가지정연구실사업에 의한 지원으로 수행되었음.

#### 참고문헌

- 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, "Electro-osmotic 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 Micro-channel Flows," *Anal. Chem*, Vol.74, pp. 3704-3713.
- 7) Molho, J.I., Herr, T.W. and Gilvert, J.R., 1998, "Fluid Transport Mechanisms in Microfluidic Devices," (*MEMS*) *ASME IMECE*, Vol.66, <http://micromachine.stanford.edu/~jmolho/research/research.html>.
- 8) Herr, A. E., Molho, J. I., Santiago, J. G., Mungal, M. G. and Kenny, T. W., 2000, "Electroosmotic Capillary Flow with Nonuniform Zeta Potential," *Anal. Chem*, Vol.72, pp. 1053-1057.
- 9) Lee, G. B., Fu, L. M., Lin, C. H., Lee, C. Y. and Yang, R. J., 2004, "Dispersion Control in Microfluidic Chips by Localized Zeta Potential Variation Using the Field Effect," *Electrophoresis*, Vol.25, pp. 1879-1887.
- 10) Lee, C. Y., Lee, G. B., Fu, L. M., Lee, K. H. and Yang, R. J., 2004, "Electro-Kinetically Driven Active Micro-mixers Utilizing Zeta Potential Variation Induced by Field Effect," *J. Micromech. Microeng*, Vol.14, pp. 1390-1398.
- 11) Qian, S. and Bau, H. H., 2005, "Theoretical Investigation of Electro-Osmotic Flows and Chaotic Stirring in Rectangular Cavities," *Applied Mathematical Modelling*, Vol.29, pp. 726-753.