

마이크로 채널 내 교류 전기삼투 현상을 이용한 유체 유동 및 혼합에 대한 수치해석적 연구

서 용 권,^{*} 허 형 석¹

A STUDY ON CHARACTERISTICS OF AC ELECTROSMOTIC FLOWS AND MIXING IN A MICROCHANNEL WITH COPLANAR ELECTRODES

Y.K. Suh^{*1} and H.S. Heo¹

This paper presents numerical results of fluid flows and mixing in a microfluidic device with AC electroosmotic flows (AC-EOF) around coplanar electrodes attached on the top and bottom walls. To obtain the flow and mixing characteristics, numerical computations are performed by using a commercial code, CFX10. Experiment was performed to confirm the generation of the drift velocity around the electrodes. It was found that near the coplanar electrodes 3-D complex flows are generated. The AC-electroosmotic flow on the electrodes plays an important role in mixing the liquid.

Key Words : 교류 전기 삼투(AC Electro-Osmosis), 동일 평면 전극(Coplanar Electrodes), 혼합개선(Mixing Enhancement)

1. 서 론

마이크로 기기 내 바이오 입자의 분리나 마이크로 유동 제어 등을 위한 것으로 전기력을 이용하는 방법으로, 전기 삼투, 전기 영동, 유전 영동과 같은 방법 등이 있다. 전기 삼투는 채널의 입출구에 일정한 전위를 인가함으로써 유체내부에 발생하는 전기장을 이용해서 유체를 이동하는 방법이고 전기 영동은 전기 삼투와 같은 조건에서 유체 내에 있는 하전 입자(바이오 입자 포함)가 전기장에 따라 같은 방향 또는 반대 방향으로 이동하게 하는 방법이다. 유전 영동은 일정한 하전을 띠고 있는 입자가 비균일 전기장 내에서 이동하게 하는 방법이다.

각각은 장단점을 가지고 있다. 전기 삼투 유동은 채널의 입·출구에 고전압을 인가할 경우 전극 표면에서 기포가 발생하고 이 기포는 압력구배에 의한 채널 내 유동을 방해한다. 그리고 인가된 고전압은 전극 주위의 전기화학 반응과 채널 내 매질의 pH 변화를 일으키는 주된 요인이 된다. 교류 전기

삼투 유동의 방법은 이러한 단점을 보완해 준다.

다음은 이와 관련된 최근의 연구동향이다. Green 등[1]은 마이크로 채널 내 한 쌍의 바닥 전극에 다양한 크기의 주파수로 교류를 인가하여 그에 따른 전극 주위의 점성유동을 연구하였다. Wu 등[2,3]은 교류 전기 삼투현상을 이용하여 전극 표면에 마이크로 입자와 박테리아 등을 포획하는 방법을 제한하였다. Lian 등[4]은 군집되어 있는 입자들을 전극위에서 재 정렬하는 현상을 보여 주었다. Bhatt 등[5]은 교류 전기 삼투 현상과 유전영동 현상을 같이 이용하여 ITO(Indium Tin Oxide) 전극이 있는 작은 밀폐 공간에서 입자, 세포 등을 수집하는 방법을 제시하였다. 이와 같이 기존의 연구들은 대개 마이크로 입자 및 세포의 포획 또는 추적하는 방법에 집중되어 있고 서로 다른 유체의 혼합에 관한 연구 성과는 전무한 상태이다.

본 논문은 마이크로 채널 내 압력구배에 의한 유동에서 채널 바닥 및 상단에 각각 한 쌍의 전극을 배치하여 그 전극에 교류를 인가하였을 경우에 발생하는 유동의 특성과, 서로 다른 농도의 유체를 채널 내에 흘려 보냈을 경우에 기대되는 혼합효과에 대해서 연구한 것이다.

접수일: 2006년 11월 17일, 심사완료일: 2007년 2월 28일

¹ 정회원, 동아대학교 기계공학부

* Corresponding author, E-mail: yksuh@dau.ac.kr

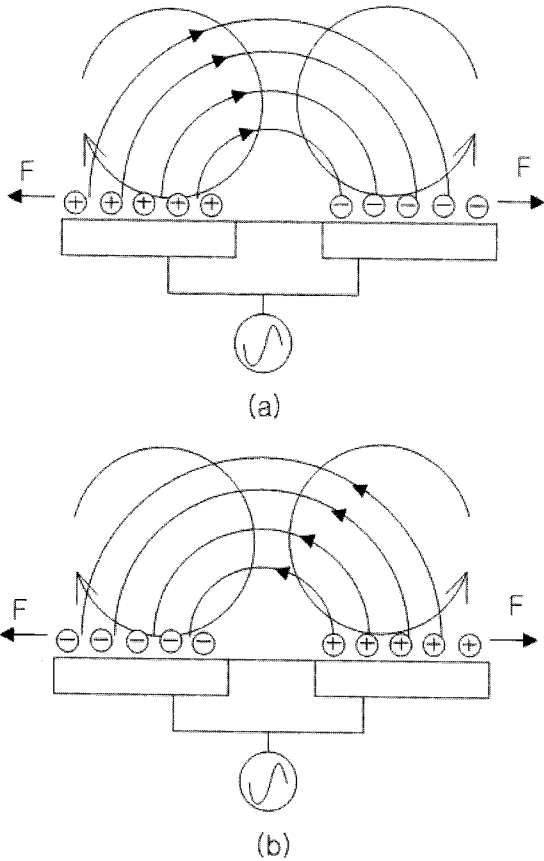


Fig. 1 Schematic diagram for the mechanism of the AC electro-osmotic flow.

2. 교류 전기 삼투 현상

교류 전기 삼투 현상은 동일 평면에서 일정한 간격을 가지는 두 전극사이에 교류를 인가하였을 때 전극 위에 있는 유체가 두 전극의 바깥으로 밀려가는 현상이다.

두 전극사이에 직류를 인가할 경우에는 양 전극에 서로 다른 이온들이 흡착되고 이 이온들이 결과적으로 전극 표면을 도포함으로써 전극으로부터의 포텐셜과 이온에 의해 여기되는 반대 포텐셜이 합쳐져 포텐셜이 0이 되므로 이온의 이동 현상은 발생하지 않는다. 그러나 Fig. 1과 같이 교류를 인가할 경우에는 전극 표면에 인가 전압의 부호에 따라 양이온과 음이온들이 교대로 모이게 된다. 따라서 이온이 전극을 완전히 도포하는 일을 막을 수 있으며, 또한 이온의 부분적인 도포로 인하여 전극 표면에 나란한 방향으로의 전기장(electric field) 성분을 유도할 수 있다. 전기장의 이러한 평행 성분은 결국 이온의 이동에 기여하는데, 이 때 인가 전압의 부호가 바뀔 때 따라 흡착 이온의 부호와 유도 전기장의 부호가 같이 바뀌며

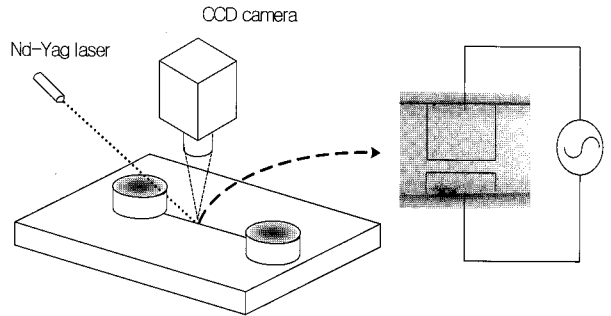


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental set-up for the flow visualization.

로 이온은 항상 한 방향으로 이동하는 현상을 보이게 되는 것이다. 이 이동현상은 두 전극 사이의 거리가 가까운 지역일 수록 증가한다. 즉, 두 전극의 선단 지역에서 이온의 이동은 가장 활발하고 반대 쪽에서 가장 약하다.

3. 실험장치 및 실험방법

Fig. 2은 본 연구의 실험장치이다. 본 장치는 마이크로 채널과 채널 입출구의 수조 및 교류 입력 장치(NI, PXI-8186,6733)로 구성된다. 마이크로 채널의 본체는 PDMS (Polydimethylsiloxane)로, 전극은 ITO 글래스로 제작하였다. 작동유체는 물(Deionized Water)이며 여기에 유동 가시화 및 속도 측정을 위하여 약 $1\mu\text{m}$ 직경의 형광입자(Molecular Probe, 여기파장: 540nm , 방출파장: 560nm)를 0.5 % 섞어서 사용하였다. Nd-Yag Laser(532nm , 800mW)에 의한 입자의 발출광을 고대역 필터(550nm)를 통해 노이즈를 제거하여 광학현미경(Olympus, BX51)과 CCD 카메라(Photometrics, CoolSNAP cf mono, 12-bit, 해상도; 700×520)로부터 초당 20프레임의 영상정보를 얻었다. 입자 이동 속도는 PTV(Particle Tracking Velocimetry)방법, 즉 실제 이동거리를 입자의 픽셀이동 정보로부터 환산한 뒤 경과시간으로 나누어서 구하였다. 전극 중심선 상의 속도분포를 구하기 위해 중심 선 상의 9곳의 위치에서 속도를 구하였으며 각각의 위치에서는 해당 지점을 지나는 입자의 영상 정보 중 6개의 영상에 의해 평균속도를 얻었다. 교류 삼투유동과는 별도로 채널의 길이 방향으로의 중력에 의한 압력 구배를 주어 채널 길이 방향으로 주 유동을 형성시켰다. 이는 주 유동의 이론해석 결과를 바탕으로 입자의 높이 정보를 획득하기 위함이다. 교류 입력 장치는 교류용 전압의 크기와 주파수를 여러 가지로 변화시킬 수 있으나 본 연구에서는 30Hz , 2Volt (peak to peak)로 일정하게 두었다.

본 실험에 의한 유속 측정의 결과는 수치해석의 경계조건으로 활용된다.

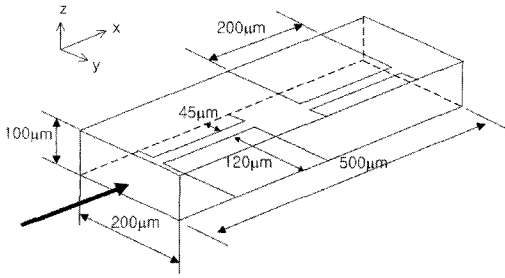


Fig. 3 Perspective view of the flow domain for the 3-D numerical simulation.

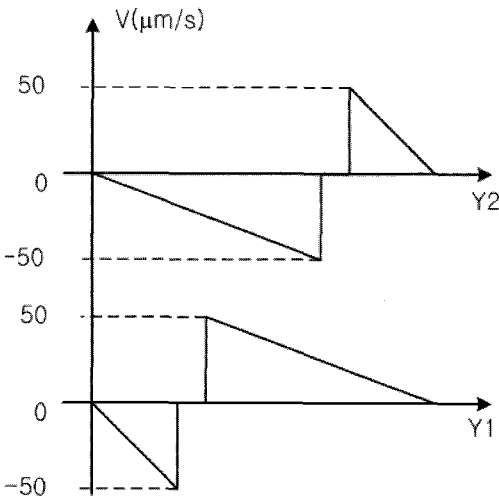


Fig. 4 Velocity conditions at the coplanar electrodes of top and bottom walls.

4. 유동 모델 및 수치해석 기법

Fig. 3은 본 연구에서 혼합해석을 위해 사용한 유동모델이다. x, y, z 는 각각 채널의 길이, 폭, 깊이 방향의 좌표이다. 채널의 길이, 폭, 깊이는 각각 $500\mu\text{m}, 200\mu\text{m}, 100\mu\text{m}$ 이다. 전극은 채널 상단과 하단에 각각 한 쌍씩 배치되어 있다. 전극 표면에 교류를 인가하면 앞의 2절에서 설명한 바와 같이 전극 표면에는 전극 전해로부터 멀어지는 방향으로 유동이 형성된다. 전극 표면에서의 매우 얇은 EDL(electric double layer) 층 내의 가파른 속도분포를 무시하고 단지 표면에서 미끄럼 조건만을 제시함으로써 버크(bulk) 내의 유체혼합을 분석하고자 한다.

전극표면에서의 미끄럼 속도분포는 앞의 실험결과를 참고하여 상하 전극에 대해 각각 Fig. 4와 같이 부여하였다. 이 경계조건은 실험에 의한 결과를 바탕으로 부여한 것이며 결과에서 다시 고찰한다. 전극을 제외한 다른 벽면은 점착조건

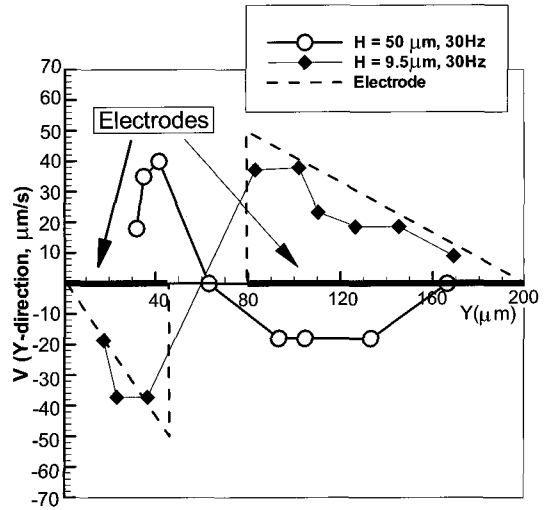


Fig. 5 Experimental results (solid lines) of the v component on the center line of electrodes at the height of $50\mu\text{m}$ and $9.5\mu\text{m}$ at 30Hz . Dashed lines denote the slip velocity profile applied on the surface of the electrodes in the numerical simulations.

(no-slip)으로 하였다. 채널의 입구와 출구는 주기조건이며 압력구배에 의한 흐름을 구현하기 위해 유동 영역내에 물체력을 인가하여 최대 유속 $130\mu\text{m/s}$ 로 흐르게 하였다. 수치해석에 사용한 격자수는 20만개 정도이다.

본 연구에서 작동 유체로는 물을 사용하였으며 밀도 1000kg/m^3 , 동점성계수 $10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ 의 물성치를 정의하였다.

한편, 본 해석을 위하여 보편적인 신뢰성이 입증되어 있는 상용코드(CFX 10)를 사용하였다.

혼합의 정도를 나타내는 양으로서 사용된 혼합지수의 정의는 다음과 같다. 격자선의 교점인 노드에는 계산 결과로 얻어진 농도 값이 정의되어 있다. 이 노드 정보와 요소 정보, 농도 값을 이용하여 아래와 같이 혼합지수 D 를 구할 수 있다 [6].

$$f_i = v_i / \bar{v} \quad (1)$$

$$\bar{C} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I f_i \bar{C}_i \quad (2)$$

$$D = \sqrt{\frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \left(\frac{\bar{C}_i - \bar{C}}{\bar{C}} \right)^2 f_i} \quad (3)$$

여기서 v_i 는 i -번째 요소의 체적, \bar{v} 는 전체 요소의 평균 체적, \bar{C}_i 는 해당 요소의 대표 농도로 요소를 구성하는 육면체 격자계의 8개 노드의 농도평균, f_i 는 요소에 대한 체적 가중치이다. I 는 요소의 전체 개수이다.

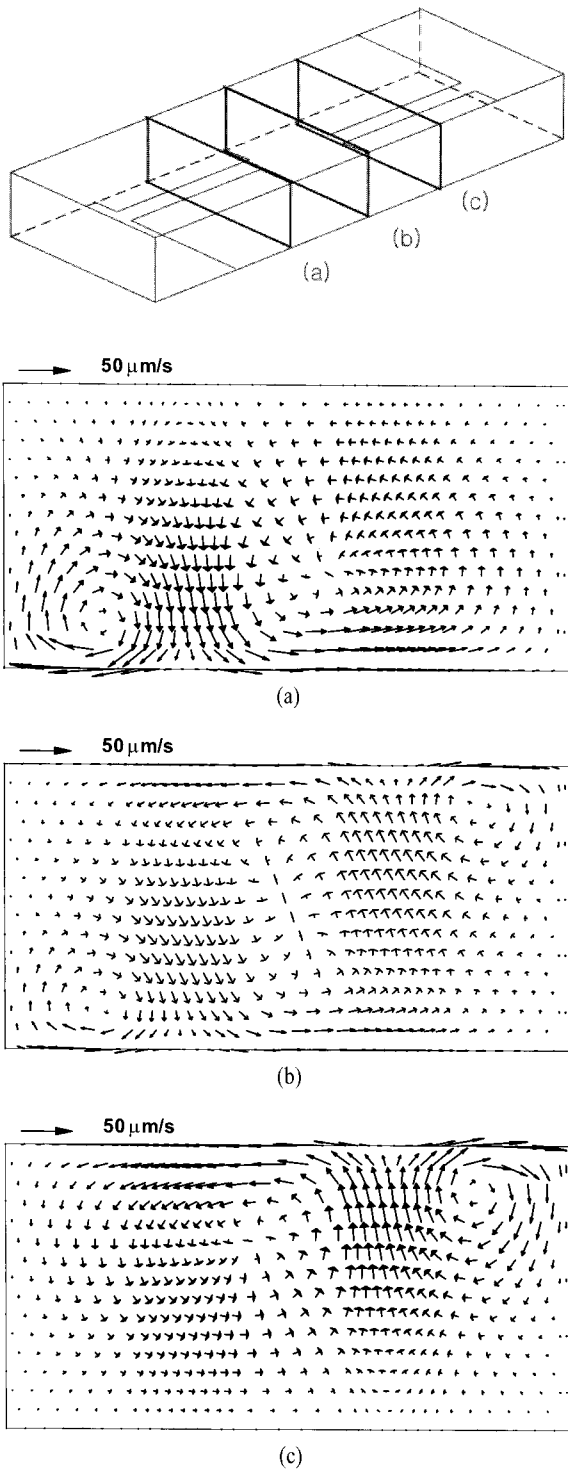


Fig. 6 Sectional view of velocity vectors in the channel: (a)x=150 μm, (b)x=250μm, (c)x=350μm. These fields are viewed from upstream.

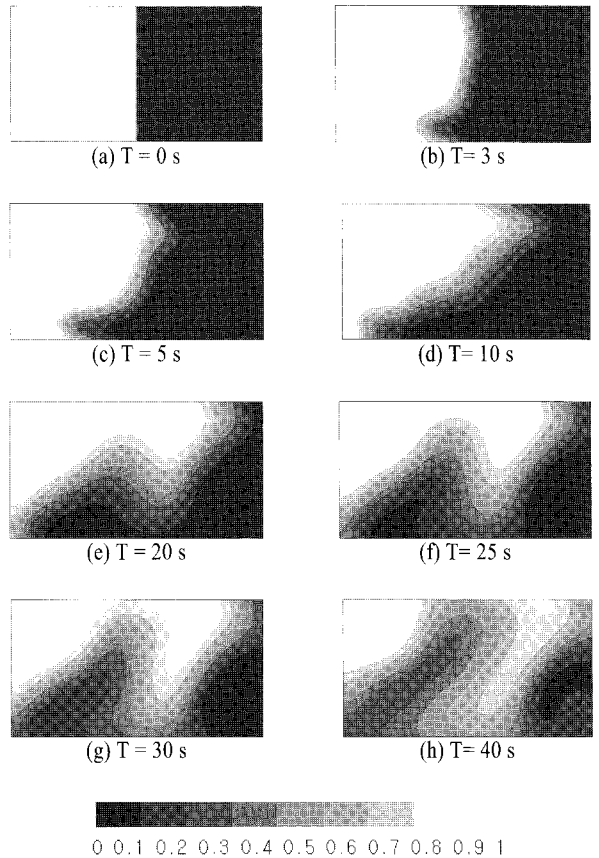


Fig. 7 Development of the concentration distribution in time at the downstream end section (viewed from downstream).

5. 결과 및 검토

본 연구에서 레이놀즈 수는 대표 길이 133μm(채널 단면의 수력직경), 동점성 계수 $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 대표 속도 130μm/s로 하여 0.017로서 마이크로 기기 유동의 전형적인 값의 범위에 들어가는 매우 낮은 값을 보인다. Fig. 5는 채널 바닥에만 전극이 있는 경우에 대해서 측정된 실험결과로서, 전극 중심 라인에서 높이 9.5μm, 50μm의 지점을 통과하는 입자에 대해 PTV방법으로 측정된 y-방향의 속도성분의 분포를 나타내고 있다(기호: ◆, ○). 전극과 가까운 9.5μm높이에서는, 마주보는 전극의 선단에서 가장 강한 흐름을 보이며, 유동의 방향은 전극 틈새로부터 멀어지는 방향임을 확인할 수 있다. 50μm 높이에서는 9.5μm 높이의 유동과 반대방향으로 흐르고 있는 것을 알 수 있다. 이것으로 전극주위 유동으로서 한 쌍의 와류를 상상할 수 있다. 이것은 Green 그룹의 가시화 실험결과와도 같은 경향이다. 점선은 수치해석의 조건으로 사용될 바닥전극에서의 속도성분이다.

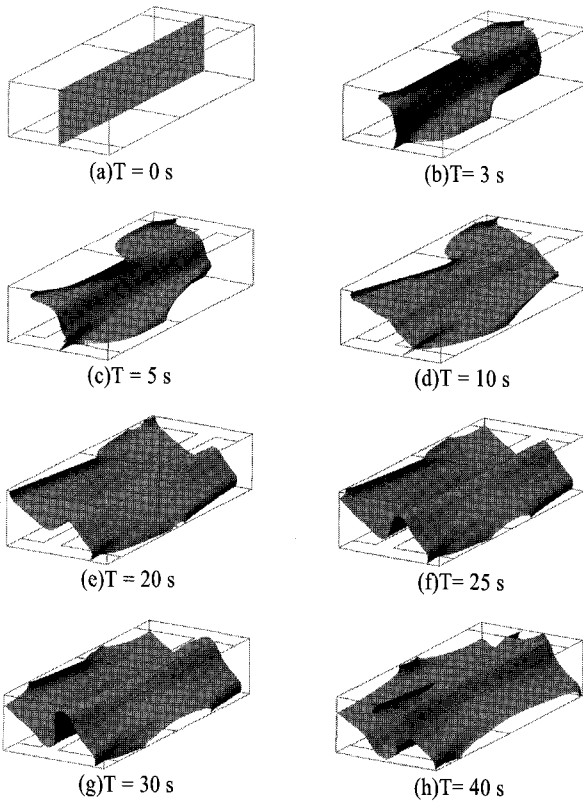


Fig. 8 Development of the iso-surface of the concentration (0.5) in time.

위 실험결과는 채널의 바닥에만 한 쌍의 전극이 있는 경우에 대한 것이다. 그러나 채널 내의 이러한 단순한 전극배치만으로는 양호한 혼합효과를 기대할 수 없다는 판단 하에 Fig. 3과 같이 채널의 상단과 하단에 전극을 서로 엇갈리게 그리고 주기적으로 배치함으로써 혼합효과를 꾀하고자 하였다.

Fig. 6은 전극 표면에 Fig. 4의 경계조건을 부여한 해석 결과로서, $x=150\mu\text{m}$, $250\mu\text{m}$, $350\mu\text{m}$ 의 평면에 대한 속도장(2차 유동)을 나타낸 것이다. Fig. 6(a)는 $x=150\mu\text{m}$ 평면인데 채널 하단 벽면에 한 쌍의 와류가 생겨나 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 6(b)는 $x=350\mu\text{m}$ 평면의 속도장이며 전체적으로 3개의 와류가 생겨나 있다. Fig. 6(c)의 $x=350\mu\text{m}$ 평면에서는 채널 상단에 한 쌍의 와류가 생겨나 있는 것을 확인할 수 있으며, 낮은 레이놀즈 수와 기하학적 대칭성에 의해 Fig. 6(a) 6(c)의 결과는 상호 점대칭의 특징을 보이고 있다. 특히 Fig. 6(b)에서 3개의 와류는 원래 상하단의 교류 전기 삼투에 의해 발생한 4개의 와류에서 가운데 서로 만나는 와류가 서로 합쳐지면서 상대적으로 강한 와류가 형성된 것으로 생각되면 이것은 나중에 서로 다른 유체를 혼합하는데 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

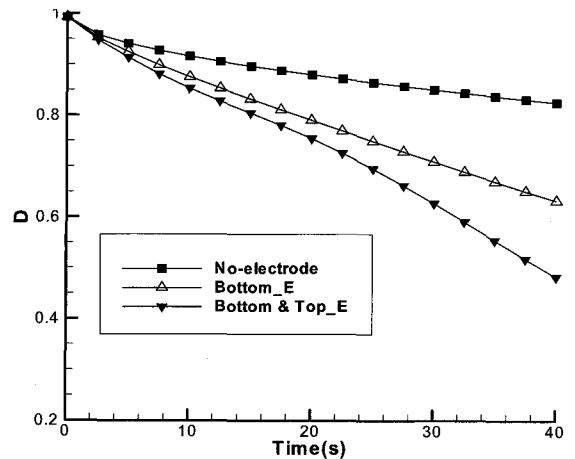


Fig. 9 Variation of mixing index in time for three different electrode settings.

Fig. 7은 채널의 반을 농도 0, 나머지 반을 농도 1로 두고 시간을 점차 증가시키면서 해석한 결과로서 출구측 단면에서의 농도분포를 나타내고 있다. 본 해석에서 확산계수는 $10^{-11}\text{m}^2/\text{s}$ 를 적용하였다. Fig. 7(a)의 입구단면에서 정확히 반으로 나뉘어진 농도분포는 시간이 지남에 따라 상부에 있는 유체는 채널의 우측 벽면으로 이동하고 하부에 있는 유체는 채널의 좌측벽면으로 이동함으로써 그림과 같은 형태의 분포를 보인다. 개략적으로, T=40s의 상태는 유체가 시계방향으로 거의 1회전한 결과를 볼 수 있다. 이와 같이 거동한 유체는 서로 다른 농도의 접촉면 면적이 넓어지게 하고 이에 따라 혼합효과가 높아진다.

Fig. 8은 농도가 0.5인 농도장인 면(즉 농도 0과 1의 경계면)을 시간변화에 따라 입체적으로 나타낸 것이다. 출구 측의 농도장 분포는 Fig. 7에서 제시한 것에 해당한다. 특히 하단 및 상단의 전극에서 교류 전기 삼투 현상으로 채널 측면 방향으로 미는 힘에 의해서 경계면이 측면으로 밀려가고 있는 것을 확인할 수 있다(Fig. 8(b)-(d)). 그 이후에서는 채널의 중심부에 있는 물질이 계속하여 접히는 현상을 보이고 있다(Fig. 8(e)-(h)). 이것은 앞서 Fig. 6에서 나타낸 바와 같이 채널 상하부 네 개의 와류 중에 중심부의 두 와류가 합치면서 상대적으로 강한 와류를 형성하고 이 와류는 채널중심부의 유체가 서로 접히게 하는 원동력이 된다.

Fig. 9는 식 (3)으로 구한 혼합지수를 채널 내 전극이 없는 경우와 바닥에만 전극이 있는 경우 그리고 상하단에 전극이 있는 경우에 대해서 나타낸 것이다. 처음에 혼합지수가 1인 것은 서로 다른 농도의 유체가 전혀 혼합이 되지 않을 때의 지수에 해당한다. 시간이 경과되면서 혼합지수가 낮아지는 것은 혼합효과 결과이며 그 값이 낮을 수록 더 좋은 혼합효과를 나타낸다. 전극이 없는 경우는 오로지 확산효과에 의

해서 혼합이 이루어지기 때문에 혼합효과를 기대 할 수 없으며 당연히 상하단의 전극이 있는 경우가 하단에만 전극이 있는 경우보다 혼합효과가 좋은 결과를 나타내고 있다. 이것으로 상하 벽면에 전극을 주기적으로 설치하면 양호한 혼합효과를 기대할 수 있다는 사실을 알 수 있다.

앞으로 추가적인 연구에서는 파라미터를 다양하게 변화시켜 가면서 혼합효과를 정량화하고 가장 양호한 혼합효과를 주는 설계 조건을 찾아 내야 할 것이다.

6. 결 론

본 연구에서는 마이크로 채널 내 상하부 벽면에 전극을 형성하여 교류를 인가한 후 그에 따른 전극벽면의 유속분포에 의한 유동양상과 이에 따른 유체의 혼합효과를 분석하였으며 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 채널 하단에 한 쌍의 전극을 설치하여 교류 삼투 유동의 가시화 실험을 성공적으로 수행하였으며 PTV를 통해 유속의 데이터를 획득하였다.
- (2) 채널 상부 혹은 하부의 전극에 교류를 인가하면 전극 선단에서 채널 측면 쪽으로 흘러가는 유동이 발생하고 이로 인해 한 쌍의 와류가 발생하며 이러한 와류의 엇갈림 발생은 혼합효과에 중요하게 기여한다.

후 기

이 논문은 2005년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 국가지정연구실사업으로 수행된 연구임(과제번호 2005-01091).

참고문헌

- [1] Green, N. G., Ramos, A., Gonzalez, A., Morgan, H. and Castellanos, A., 2002, "Fluid Flow Induced by Nonuniform AC Electric Fields in Electrolytes on Microelectrodes. III. Observation of Streamlines and Numerical simulation," *Phys. Rev. E*, Vol.66, pp.L25-L30.
- [2] Wu, J., Ben, Y., Battigelli, D. and Chang, H. -C., 2005a, "Long-range AC Electroosmotic Trapping and Detection of Bioparticles," *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol.44, pp.2815-2822.
- [3] Wu, J., Ben, Y. and Chang, H.-C., 2005b, "Particle detection by electrical impedance spectroscopy with asymmetric-polarization AC electroosmotic trapping," *Microfluid Nanofluid*, Vol.1, pp.161-167.
- [4] Lian, M., Islam, N. and Wu, J., 2006, "Particle Line Assembly/Patterning by Microfluidic AC Electroosmosis," *J. Phys: Conf. Series*, Vol.34, pp.589-594.
- [5] Bhatt, K. H., Grego, S. and velev, O. D., 2005, "An AC Electrokinetic Technique for Collection and Concentration of Particles and Cells on Patterned Electrodes," *Langmuir*, Vol.21, pp. 6603-6612.
- [6] 서용권, 허형석, 강금분, 2006, "마이크로 채널 내 사다리꼴 전극의 제타 포텐셜 변화에 따른 혼합효과 증대에 대한 수치해석적 연구," *한국전산유체공학회지*, 제11권, 제3호, pp.46-51.