

마이크로 채널 내 교류 전기 삼투 유동에 대한 PTV해석

허형석[†], 강상모^{*}, 서용권^{*}

A Study on PTV analysis of AC Electroosmotic Flows in the Microchannel with Coplanar electrodes

Hyeung Seok Heo, Sang Mo Kang and Yong Kweon Suh

Abstract

AC-electroosmosis is one of the electrokinetic forces leading to phenomena peculiar in the microfluidics. This paper shows particle deformation in the microchannel with rectangular electrodes on the bottom wall for the AC-electroosmotic flows. We make a PDMS microchannel with ITO electrodes. To measure velocity distributions of the particles we used a three-dimensional particle tracking velocimetry (micro-PTV) technique. this method is Particle tracking by interpolation the diffraction pattern ring diameter variations with the defocusing distances of base particle locations. we induce a function of frequency at the electrode. We find the velocity of particles is the most at the edge of the electrodes and Particles move to side wall or center of the channel for the bottom and middle.

Key Words : AC Electroosmosis(교류 전기삼투 유동)

1. 서 론

전기력을 이용하여 마이크로 기기 내 바이오 입자 유동 조정 및 마이크로 유동 조정 방법이 기존의 압력구동력에 비해 많이 연구되고 있다. 전기력을 이용하는 방법은 전기 삼투법, 전기 영동법, 유전 영동법이 있다. 전기 삼투는 채널의 입출구에 일정한 전위를 인가함으로써 유체내부에 발생하는 전기장을 이용해서 유체를 이동하는 방법이고 전기 영동은 전기 삼투와 같은 조건에

서 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 전기장내에서 이동하게 하는 방법이다.

각각의 경우에 따라 장단점을 가지고 있으며 특히 전기 삼투 유동은 채널의 입·출구에 고전압을 인가할 경우 채널 입·출구에 기포가 발생하고 이 기포는 압력구배에 의한 채널 내 유동을 방해한다. 그리고 인가된 고전압은 전기화학 반응과 pH변화를 일으키는 주된 요인이 된다. 이러한 이유 때문에 마이크로 채널 내에서 유체를 이동시키는 방법으로 제안된 것이 교류 전기 삼투 유동이다.

교류 전기 삼투 유동은 채널 내 바닥에 한 쌍의 전극을 일정한 간격으로 떨어지게 두고 일정

[†] 회원, 동아대학교 기계공학부
E-mail : hsheo@donga.ac.kr

^{*} 회원, 동아대학교 기계공학부

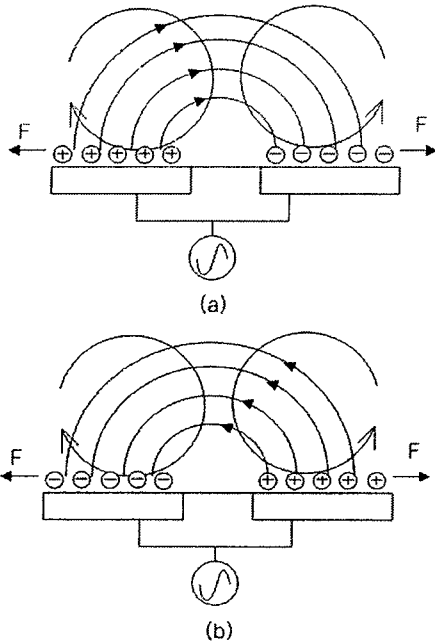


Fig. 1 Schematic diagram of the mechanism of AC electroosmosis

한 교류 전압을 인가하면 전해질이 마주보는 전극의 선단에서 멀어지는 전극의 선단으로 전해질이 흘러가고 채널상부에는 반대방향의 유동이 발생하는 현상이다. 저 전압을 사용하기 때문에 기포가 발생되지 않고 전기화학 반응 및 pH변화에 대한 염려는 하지 않아도 된다.

다음은 이와 관련된 최근의 연구동향이다. Green 등[1]은 마이크로 채널 내 한 쌍의 바닥 전

극 사이에 일정한 간격(25 μ m)을 두고 양 전극에 여러 종류의 주파수를 인가하여 그에 따른 전극위의 유동을 연구하였다. Wu 등[2,3]은 교류 전기 삼투현상을 이용하여 전극위에서 마이크로 입자와 박테리아 등을 추적 또는 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 폐공간에서 입자, 세포 등을 수집하는 방법을 제시하였다. 이와 같이 기존의 연구들은 대개 마이크로 입자 및 세포의 포획 또는 추적하는 방법에 집중되어 있고 서로 다른 유체의 혼합의 관점에서는 거의 전무한 상태이다.

본 연구는 마이크로 채널 내 압력구배에 의한

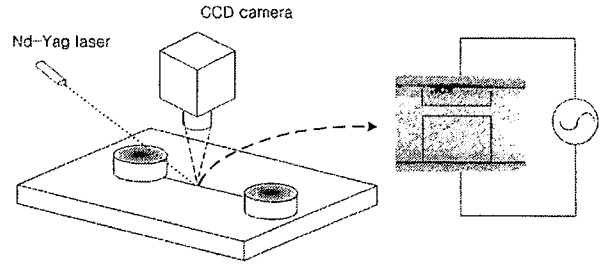


Fig. 2 Schematic diagram of experiment setup

유동에서 채널 바닥 및 상단에 각각 한 쌍의 전극을 배치하여 그 전극에 교류를 인가하였을 경우에 대한 유동 특성과 서로 다른 농도의 유체를 흘러 보냈을 경우에 대한 혼합효과에 대해서 연구하고자 한다.

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 흡착되어 유동이 발생하는 현상을 볼 수 없다. Fig. 1과 같이 교류를 인가할 경우 전극위의 이온들은 인가 교류의 주파수에 따라 양이온 또는 음이온들로 모이게 된다. 이 때 발생한 전극과 평행한 전기장은 일정한 간격사이에서는 거리가 가까워 상대적으로 강한 전기장이 형성되고 반대편에서는 거리가 멀어 상대적으로 약한 전기장이 형성된다. 전극위에 모인 이온들은 강한 전기장영역에서 약한 전기장영역으로 움직이게 된다. 전극위에 이온이 흡착되기 전에 전극의 전위가 바뀌게 되면 위와 같은 현상이 반복된다(Fig. 1(b)).

3. 실험장치 및 실험방법

Fig. 2, 3은 본 연구의 실험장치와 마이크로 채널이다. 마이크로 채널과 채널 입출구의 수조와 교류 전달 장치(LABVIEW)로 구성된다. 마이크로 채널은 채널형성을 위한 PDMS (Polydimethylsiloxane)와 전극이 형성되어 있는 ITO GLASS로 제작되었다. 작동유체는 물

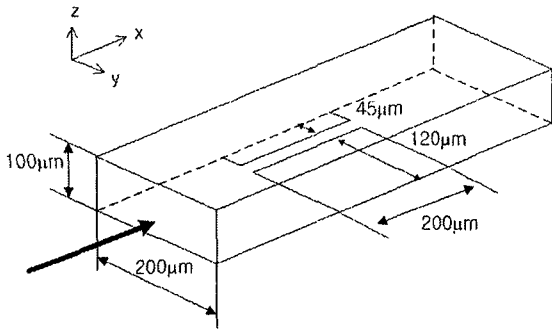


Fig. 3 Perspective view of a channel geometry

(Deionized Water)에 약 $1\mu\text{m}$ 직경의 형광입자 (Molecular Probe, 여기파장: 540nm , 방출파장: 560nm)를 0.5 % 섞어서 사용하였고 Nd-Yag Laser(532nm , 800mW)에 의한 입자의 발출광을 고대역 필터($550 < \text{nm}$)를 통해 노이즈를 제거하였고 광학현미경(Olympus, BX51)을 통해서 획득한 입자의 움직임에 대해서 PTV(Particle Tracking Velocimetry) 해석하였다. 교류 전달 장치는 여러 가지 주파수 및 전압 교류를 줄 수 있으나 본 연구에서는 30Hz , 2Volt (peak to peak)로 한정한다.

채널의 깊이방향에 대한 입자의 추적방법으로 회절직경 변화를 활용하였다. 먼저 채널바닥에 초점을 맞추어 선명하게 하면 채널의 바닥과 천정에 있는 입자는 서로 다른 회절 특성을 나타낸다. 바닥입자는 선명하지만 천정에 있는 입자는 회절현상에 의해서 크게 보이며 회절직경은 바닥에 있는 입자에 대해서는 최소 직경, 천정에 있는 입자에 대해서는 최대 직경을 한다. 채널내부에 흐르는 입자는 z -방향으로 움직이면서 회절직경이 다르게 된다. 이 때 각 시간스텝에 따라 얻어진 입자 영상의 회절직경을 채널 높이에 대해서 보간법을 적용하면 입자가 어떤 높이의 위치에 있는지 알 수 있다.

4. 결과 및 검토

PTV 해석의 유효성을 확인하기 위해서 채널 깊이 $z = 50\mu\text{m}$ 평면의 유속을 측정하였다. Fig. 3은 이론해와 실험결과를 비교한 것이다. $y = 100\mu\text{m}$ 주변을 제외하고는 PTV해석 결과와 이론결과와 잘 일치하고 있다. 중심부분에서의 편차

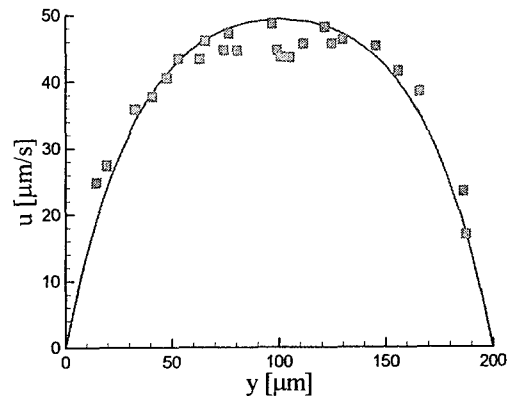


Fig. 3 Comparison of the velocity profiles obtained from theory (solid line) and PTV measurement (symbols) for the case of pressure-driven flow

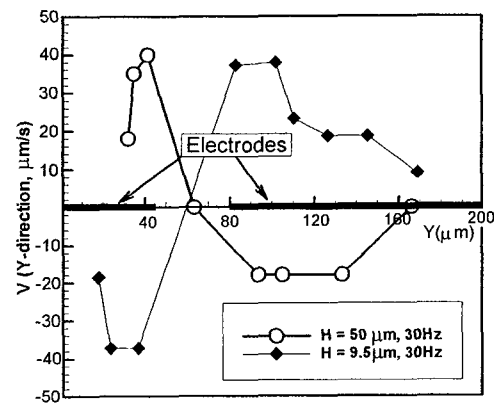
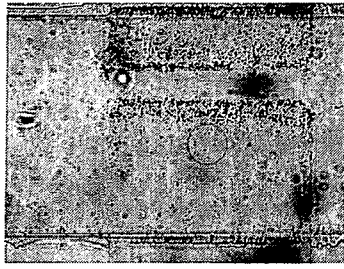


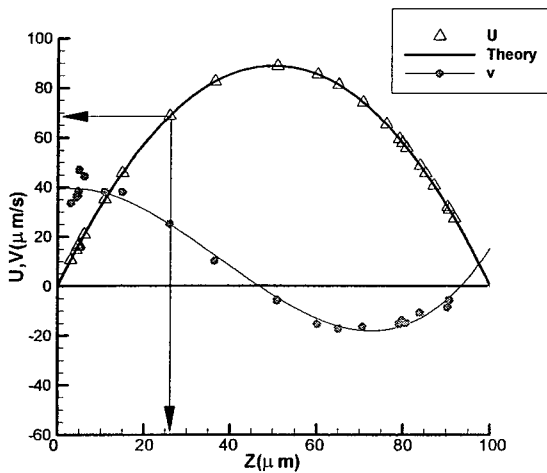
Fig. 4 Distribution of the v -velocity component on the center line of electrodes at the height of $9.5\mu\text{m}$ and $50\mu\text{m}$ at 30Hz

는 초점 심도에 의한 결과로 추측된다.

Fig. 4는 채널 내 바닥 양 전극에 30Hz 와 2V (peak-to-peak)의 전압을 인가하였을 때 채널의 바닥과 중심부분을 PTV 해석한 결과이며 y -방향으로 v 속도 성분을 나타내고 있다. 바닥 가까이 있는 입자의 유동(기호: \blacklozenge)은 작은 사각형의 전극과 큰 사각형의 전극으로 크게 분리되면서 서로 마주보는 전극의 선단에서 채널벽면 방향으로 강한 유동이 발생한다. 그리고 벽면 가까이 갈수록 유동이 점점 느려지고 있다. 그러나 채널 중심의 유동(기호: \circ)은 바닥과 반대 현상이 나타나고 있는 것을 볼 수 있는데 전극의 선단에서 채널의 중심방향으로 유동이 발생하고 있다. 이



(a)



(b)

Fig. 5 Comparison of the velocity profiles obtained from theory (solid line) and PTV measurement (symbols) for the z -direction

또한 채널벽면으로 갈수록 유동이 점점 느려지고 있다. 이 결과 전극이 있는 채널 내에서 바닥과 중심부가 서로 반대방향의 유동이 발생하고 있는데 이것으로 2차 유동이 한 쌍의 와류가 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 교류 전기 삼투 유동의 특징을 나타내고 있으며 Green 그룹⁽¹⁾의 연구와 정성적으로 일치한 결과를 보이고 있다.

Fig. 5는 Fig. 5(a)의 ○위치에서 채널의 z -방향에 대해서 PTV해석 한 것이다. 각 깊이에 대한 입자의 u , v 속도성분은 ○위치에서 획득한 7개의 영상을 평균한 것이다. 압력에 의한 이론 유동 곡선과 비교하였는데 중첩원리를 이용하면 입자의 위치를 재확인 할 수 있다. 한 입자의 u , v 성분을 알고 있을 때 ○위치에서의 이론적인 속도분포 곡선을 얻을 수 있고 이를 바탕으로 화살표를 따라 가면 입자의 채널의 깊이방향의 위치를 알 수 있다. 결과적으로 채널 바닥의 벽면방향으로 채널 윗부분은 채널 중심방향으로 유동이

발생한다.

5. 결론

본 연구에서는 마이크로 채널 내 하부 벽면에서 서로 다른 크기의 마주보는 사각 전극을 형성하여 교류를 인가한 후 그에 따른 입자의 유동변화를 분석하였으며 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) 채널 하부 동일 평면상의 한 쌍 전극에 교류를 인가하면 전극 선단에서 채널벽면으로 유동이 발생하고 동시에 한 쌍의 와류가 발생한다.

(2) 입자의 회절 직경을 이용하여 채널 내 입체적인 거동을 파악할 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 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.