

마이크로 채널 내부 전기삼투 유동에 대한 PIV 유동 해석

김양민* · 이상준†

Micro-PIV Analysis of Electro-osmotic Flow inside Microchannels

Yang-Min Kim* and Sang-Joon Lee†

Abstract. Microfluidic chips such as lab-on-a-chip (LOC) include micro-channels for sample delivery, mixing, reaction, and separation. Pressure driven flow or electro-osmotic flow (EOF) has been usually employed to deliver bio-samples. Having some advantages of easy control, the flow characteristics of EOF in microchannels should be fully understood to effectively control the electro-osmotic pump for bio-sample delivery. In this study, a micro PIV system with an epifluorescence inverted microscope and a cooled CCD was used to measure velocity fields of EOF in a glass microchannel and a PDMS microchannel. The EOF velocity fields were changed with respect to electric charge of seeding particles and microchannel materials used. The EOF has nearly uniform velocity distribution inside the microchannel when pressure gradient effect is negligible. The mean streamwise velocity is nearly proportional to the applied electric field. Glass microchannels give better repeatability in PIV results, compared with PDMS microchannels which are easy to fabricate and more suitable for PIV experiments.

Key Words : Micro-PIV(마이크로 PIV), Microchannel(마이크로 채널), Electro-osmotic Flow(전기삼투 유동), EDL(전기적 이중층)

1. 서 론

생명, 의료 분석에 관한 관심의 증대와 MEMS 기술의 발전이 맞물려, lab-on-a-chip (LOC)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. LOC은 마이크로 채널을 통해 용액과 시료를 운반한다. 구동 방법으로는 압력을 이용한 방법과 전기장을 걸어서 전기삼투 (electro-osmosis) 현상을 이용하는 방법이 있다. 전기삼투를 이용한 방법은 펌프와 같은 부차적인 구조물을 설치할 필요 없이 단순히 전기장만 걸어주면 되므로 chip 형상을 단순화할 수 있는 장점이 있다. 또한 채널 내부에서 속도가 폭 방향으로 거의 균일한 유동형태를 가지므로, 원하는 시료를 동일전장에서 운송할 수 있다는 이점도 가지고 있다.

표면에 전하를 띤 채널 내부에 유체를 채우고 거

에 전기장을 걸어주면 전기삼투 현상에 의해 전기장과 평행한 방향으로 유체가 이송되게 된다. 채널 표면이 전하를 띤면, 유체에 존재하는 반이온 (counterions) 을 끌어당겨서 전기삼투 전위(electro-osmotic potential) 가 형성되는데, 이와 같이 이온이 재배치되는 영역을 전기적 이중층(electric double layer, EDL)이라 한다. 여기에 전기장을 걸어주게 되면 전기적 이중층이 전기장에 의해 힘을 받게 되고, 유체는 운동량 전달에 의해 전기장이 가해진 방향으로 움직이게 된다. 이러한 유동 현상을 전기삼투 유동(electro-osmotic flow, 이후 EOF로 표기)이라 한다. 전기적 이중층의 두께는 Debye 길이에 의해 결정되는데, 10 mM 용액에서 대략 3 nm의 두께를 가지며 농도 증가에 따라 두께는 작아진다. 일반적으로 전기적 이중층의 두께는 마이크로 채널 크기에 비해 매우 작다.

Fig. 1에 나타낸 것처럼 전기적 이중층은 다시 stern 층과 확산층(diffuse layer)으로 구성되어 있다. Stern 층은 벽 근처에 반이온들이 강하게 잡혀있는 얇은 층으로 이온들이 거의 움직이지 않는 층이다. 반면 확산

†포항공과대학교 기계공학과 교수

E-mail: sjlee@postech.ac.kr

*포항공과대학교 기계공학과 대학원

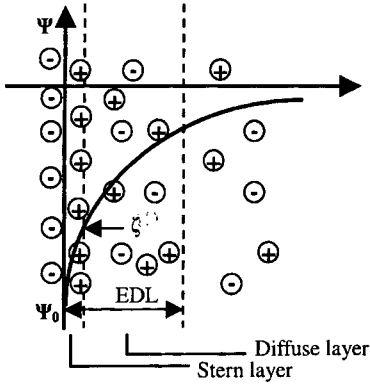


Fig. 1. Schematic diagram of electric double layer.

층에서는 이온들의 움직임이 존재하게 된다. Stern 층과 확산층의 경계부분에 생성되는 전위를 제타 포텐셜(zeta potential), ζ 라 부르는데 이것이 EOF의 유속을 결정하는 역할을 한다. Helmholtz-Smoluchowski 식에 의하면 EOF 유속은 제타 포텐셜(ζ), electric permittivity(ϵ), 전기장(E)에 비례하고, electric viscosity(μ)에 반비례 한다.

$$U_{eof} = -\frac{\epsilon \zeta E_a}{\mu} \quad (1)$$

기존 연구로 Patankar와 Hu⁽¹⁾는 수치해석을 통하여 EOF 흐름을 예측, 분석하였다. 그러나, Thamida와 Chang⁽²⁾은 마이크로 채널 모서리에서 EOF의 불안정성을 관찰하였고, Chen과 Santiago⁽³⁾는 ‘T’자형 마이크로 채널 내부에서 발생하는 유동의 불안정성에 대해 연구하였는데, 현재 이 분야에 대한 보다 자세한 연구가 요구되고 있다.

실험적 연구로는 Huang 등⁽⁴⁾이 current monitoring 방법을 통하여, EOF 유량을 측정하였고, Paul 등⁽⁵⁾은 형광 염료를 이용하여 EOF의 균일한 속도분포를 가시화 하였다. 그리고, Sinton 등⁽⁶⁾은 위의 두 가지 방법으로 실험하여 서로 일치된 결과를 얻었다.

LOC의 성능을 개선하고 LOC 내부에서의 유체 수송을 원활히 하기 위해서는, 마이크로 채널 내부에서의 EOF 유동 특성을 정량적으로 측정하고 분석할 필요가 있다. 이를 위하여 마이크로 PIV(particle image velocimetry) 속도장 측정기법을 도입하여 유동장을 측정하는 경우에는, 추적 입자(tracer particle)를 유체 속에 주입하게 된다. 이에 따라 마이크로 PIV를 이용

한 EOF 실험에서는 EOF 속도, 채널 내부 압력구배에 기인한 속도, Brown 운동에 의한 속도, 전하를 띤 입자에 작용하는 전기영동(electrophoresis)에 의한 속도가 모두 종합된 속도를 측정하게 된다.

$$\vec{U}_{means} = \vec{U}_{eof} + \vec{U}_{pressure} + \vec{U}_{eph} + \vec{U}_{Brownian} \quad (2)$$

여기서, Brown 운동에 의한 속도는 속도벡터들을 평균함으로써 제거할 수 있으며, 압력구배에 의한 속도는 큰 저장부(reservoir)를 만들어 그 효과를 줄일 수 있다. 따라서, 입자 표면의 전하로 인하여 생기는 전기영동 효과를 고려하여, EOF속도를 구할 수 있다.

Kim 등⁽⁷⁾은 PIV 실험을 통하여 EOF 유동장을 구하고, 이것을 수치해석 결과와 비교하였으나, 사용한 형광 입자의 전하특성을 고려하지 못하였다. Devasenathipathy와 Santiago⁽⁸⁾는 PTV(particle tracking velocimetry)를 사용하여 EOF의 유동특성을 파악하였다. 그들은 음전하를 가진 형광입자를 사용하고 측정한 입자 속도에서 전기영동에 기인한 속도를 빼주었다. 그러나, 마이크로 채널에 걸리는 전기장 분포를 정확히 알아야 하는 등, 실험과정이 복잡해지는 단점이 있다.

본 연구에서는 전하특성이 중성인 형광 입자를 추적입자로 사용하여, 측정한 입자 속도가 EOF 속도를 바로 나타내도록 하였다. 또한, LOC재질로 많이 쓰이고 있는 PDMS와 유리 재질로 만든 두 가지 종류의 마이크로 채널에 대해 EOF 실험을 수행하였다. 마이크로 PIV속도장 측정기법을 사용하여 EOF 유동구조를 가시화하고, 전기장의 세기와 추적입자의 표면 전하특성을 변화시키면서 마이크로 채널 내부 유동특성 변화를 실험적으로 해석하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 마이크로 PIV(micro-PIV)

Fig. 2는 본 연구에 사용되어진 마이크로 PIV 실험 장치의 구성을 나타낸 것으로, Lee 등⁽⁹⁾의 실험에서 사용한 장치를 응용하였다. 레이저 빔으로 채널 시험부 전체를 직접 조명하고 초점 깊이(depth of focus)가 작은 렌즈로 측정단면을 정하였는데, 초점 위치를 바꾸어 가면서 확인했을 때 초점의 깊이는 약 10 μm 이었다. 확대된 입자영상을 얻기 위하여 인버트 형식의 현미경과 40배 대물렌즈를 사용하였다. 본 실험에서는 추적입자로 직경이 1 μm 이고, 표면 전하특성이

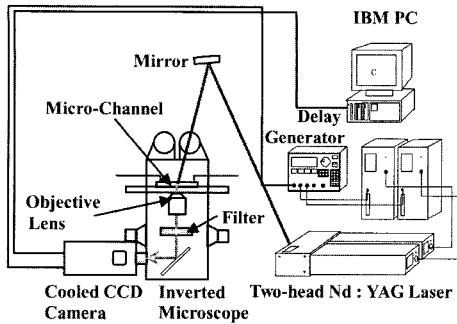


Fig. 2. Micro PIV system and experimental set-up.

중성인 붉은색 형광 폴리머 구형입자를 사용하였다. 이 입자들은 540 nm 파장의 빛에 여기하고, 560 nm 파장에서 최대 형광 빛을 방출하는 형광염료를 라텍스(latex)로 encapsulation한 것이다. 입자의 표면 전하 특성의 영향을 살펴보기 위하여 직경이 약 820 nm이고 음전하를 띤 붉은색 형광 폴리머 구형입자를 사용하였다. 이 입자들은 542 nm 파장의 빛에 여기하고, 612 nm 파장에서 최대 형광 빛을 방출한다. 이들 형광 입자를 여기시키기 위해 Nd:YAG 레이저 (532 nm)를 사용하였으며, 570 nm 고대역 필터를 사용하여 레이저 빔에 의한 산란광은 필터링하고 형광 영상만을 획득하였다. 또한 미세입자로부터 형광된 빛의 강도는 산란광에 비해 상대적으로 적기 때문에 해상도가 1280 × 1024 pixels인 12 bit cooled CCD 카메라를 사용하여 입자영상을 획득하였다.

2.2 마이크로 채널

본 연구에서는 PDMS(poly-dimethyl-siloxane) 재질과 유리 재질의 두 종류의 마이크로 채널을 사용하였다. PDMS 마이크로 채널은 photoresist인 SU-8 재료에 대해 포항가속기연구소의 LIGA 공정을 이용하여 단면이 직사각형 형태인 구조물을 먼저 만들고 그 위에 PDMS를 부어 제작하였다. 유체 출입을 위한 구멍을 뚫고, PDMS로 코팅한 커버글라스와 표면 산화(surface oxidation) 방법을 이용하여 접합시켰다. 채널 높이는 66 μm, 폭은 100 μm, 길이는 3 cm이다. 유체가 한 방향으로 흐르게 됨에 따라 채널 내부에 형성되는 압력차를 무시할 정도로 줄이기 위하여, 채널 입구와 출구에 1 cm × 1 cm 크기의 큰 저장부를 설치하였다.

유리 재질의 마이크로 채널은 BOE(buffered oxide

etch) 용액으로 등방 식각(isotropic etching)하여 채널 형상을 만들고 유체 출입을 위한 구멍을 뚫었다. 그리고, 평평한 유리와 열을 가하여 접합(thermal bonding)하였다. 채널 높이는 50 μm, 바닥의 폭은 200 μm, 길이는 2 cm이다. 그런데, 등방 식각을 이용하여 채널을 만들었기 때문에 단면 형상이 D자 모양이었다.

유리 마이크로 채널은 사용하기 전에 황산과 과산화수소를 3:1비율로 섞어 만든 piranha 용액과 DI(de-ionized) water로 두 번 번갈아 가면서 세척하여 균일한 표면 조건을 유지하도록 하였다.

2.3 실험조건 및 데이터 처리

작동유체로는 DI water를 사용한 40 mM Tris 용액(pH=9.16)을 사용하였다.

백금 전극을 마이크로 채널 양 끝에 설치하고, 직류전압을 가함으로써 채널 내부에 전기장을 형성하였다. 2, 4, 6, 10, 20, 30 V/cm로 전압을 변화시켜 가면서 마이크로 PIV 시스템을 이용해 채널 내부 속도장 변화를 측정하였다.

측정 영역의 크기(field of view)는 332 μm × 265 μm이며, 뒤집어 설치되어 평평한 채널 밑바닥으로부터 10 μm 높이에서 속도장을 측정하였다. 측정된 속도장의 공간분해능은 128 × 64 pixels이었다. 속도장은 상호상관 PIV 방식으로 구하였는데, 50% overlapping 방식으로 계산되어졌다. 10장의 순간 속도장을 연속적으로 얻고 이들을 앙상블 통계 처리하여 평균속도장을 구하였다.

3. 결과 및 토의

Fig. 3은 유리로 만든 마이크로 채널에 전기장을 걸고 처음 5초 동안 얻은 10개의 순간 속도장을 앙상블 평균하여 얻은 평균 속도장 결과이다. 전기삼투 현상에 의해 형성된 EOF 유동은 압력 차에 의해 형성되는 속도분포와는 달리, 거의 균일한 속도분포를 가진다. 하지만, 전기장을 건 후, 25초에서 30초 사이에 얻은 10개의 순간속도장 결과를 평균한 경우, Fig. 4(b)에 나타난 것처럼 벽면 부근에서 중심영역 보다 빠른 유동 형태를 보인다. 이것은 전기삼투 효과에 의해 유체가 한 방향으로 계속적으로 흘러감에 따라 하류에 위치한 저장부의 수두가 채널 입구쪽 저장부의 수두보다 높아지게 되고, 이로 인해 채널 내부에 역압력

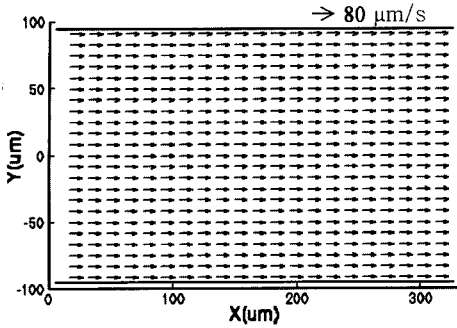


Fig. 3. Mean velocity field at 10 μm above the bottom of glass micro-channel ($E=50\text{ V/cm}$).

구배가 형성되어 EOF 흐름과 반대 방향으로 압력구동 흐름 (pressure-driven flow) 효과가 나타나기 때문으로 보인다. 저장부의 크기가 작을 경우, 이 효과는 보다 크게 나타났다.

벽면 근처에서의 속도 크기를 비교해 보면, Fig. 4(b)의 결과가 Fig. 4(a)에 비해 벽면 속도가 약간 크게 나타나고 있다. 벽면에서의 속도는 no-slip 조건에 의해 압력에 의한 속도성분은 없으며, EOF 흐름에 의한 속도만 존재 하므로, EOF 속도가 증가했다고 볼 수 있다. 이러한 원인을 보다 자세히 밝히기 위한 추가적인 연구가 필요하다. 현재로서는 전기장이 유리 표면에 영향을 주어, 유리 표면의 제타 포텐셜을 변화시킨 것으로 추측되어진다.

사용한 추적입자의 표면이 지니고 있는 전하 특성에 따른 영향을 알아보기 위하여 PDMS 마이크로 채널 내부에 앞에서 설명한 두 종류의 입자를 주입하고 전기장을 가하였다. 이 때, 전기적으로 중성인 입자는 EOF 흐름을 따라 양극에서 음극방향으로 이동하는 반면, 음전하를 띤 입자는 전기영동 효과로 인하여 거

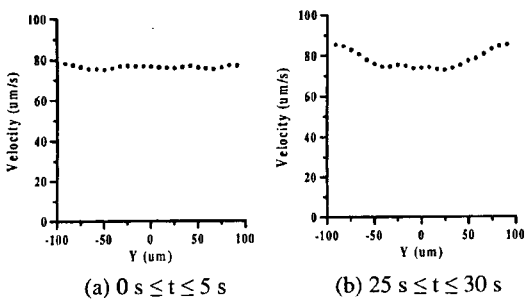
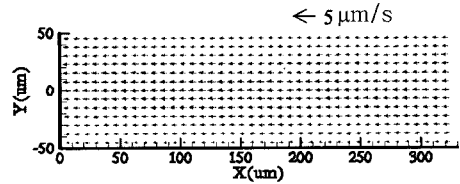
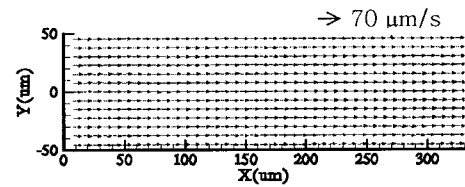


Fig. 4. Streamwise mean velocity profiles measured at different time periods.



(a) negatively charged particles



(b) neutral particles

Fig. 5. Effect of surface electric charge on mean velocity field in a PDMS micro-channel ($E=30\text{ V/cm}$).

꾸로 양극방향으로 이동하였다. Fig. 5(a)는 음전하를 띤 입자들로부터 구한 순간속도장을 평균한 속도장 결과이며, Fig. 5(b)는 중성 입자들로부터 구한 평균 속도장 결과이다. Fig. 5(b)의 경우는 전기삼투 효과에 의한 EOF 유동장을 나타내고 있다. 그러나, 전하 특성이 중성이 아닌 경우는 Fig. 5(a)처럼 전기영동에 의한 효과가 커서 PIV로 측정된 입자 속도가 EOF 유동을 대변할 수 없음을 단적으로 보여 주고 있다.

전기장의 세기와 EOF 유속 사이의 상관관계를 알아보기 위해 전기장의 세기를 변화시키면서 구한 평균속력 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 여기서 보면, Helmholtz-Smoluchowski식처럼 걸어준 전기장의 세기에 비례하여 평균유속이 증가하는 경향을 보였다. 이것으로부터, 전기장의 세기를 조절함으로써, EOF 유속을 선형적으로 조절할 수 있음을 알 수 있다.

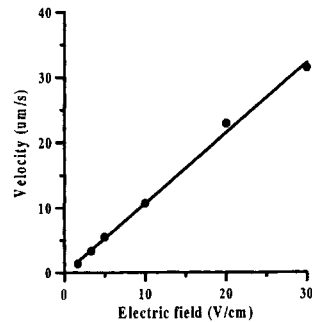


Fig. 6. Relationship between electric field and flow velocity in a PDMS microchannel.

PDMS 마이크로 채널의 경우, 직사각형 단면을 가지기 때문에 PIV 실험에 보다 적합하고, SU-8로 만든 기본 금형(master)으로부터 몰딩 방식으로 똑같은 PDMS 채널을 여러 개 손쉽게 제작할 수 있는 장점을 지니고 있다. 그러나, 산화처리과정을 통하여 친수성을 띠게 된 채널 표면이 시간 경과에 따라 점차 소수성으로 바뀌어 가는 성질에 기인하여, 실험 때마다 EOF 유속이 일정하지 않는 단점이 있고 이에 대한 개선이 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 마이크로 채널 내부 EOF 유동 특성을 마이크로 PIV 시스템을 이용하여 연구하였다. 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 전기적으로 중성인 형광입자를 이용하여 측정된 PIV 속도장 결과는 EOF 유동 특성을 잘 보여주었다. 반면, 음전하를 띤 입자는 전기영동 효과로 인해 EOF 흐름을 제대로 나타내지 못하였다.

2. 마이크로 채널 내부 유동에 압력구배가 없는 경우, EOF 흐름은 균일한 속도분포를 가지며, EOF의 평균유속은 전기장의 세기에 선형적으로 비례하여 증가하였다.

3. 유리로 만든 마이크로 채널은 PDMS 마이크로 채널에 비해 반복 실험시 높은 재현성을 보였다. PDMS 마이크로 채널은 표면의 불안정성으로 인하여 실험의 재현성이 떨어지므로 이에 대한 보완이 필요하다.

4. 전기장을 가한 시간의 경과에 따라 벽면 가까운 영역에서 EOF 유속이 약간 증가하였다. 이것은 전기장이 채널 표면에 영향을 준 것으로 예상된다. 이 부분을 자세히 분석하기 위한 추가적인 연구가 요구되어진다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한 유리 마이크로 채널을 제작해 주신 포항공대 화학공학과 신

상민씨께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Patankar, N.A. and Hu, H.H., 1998, "Numerical Simulation of Electroosmotic Flow", *Anal. Chem.*, Vol. 70, pp. 1870~1881.
- 2) Thamida, S.K. and Chang, H., 2002, "Nonlinear Electrokinetic Ejection and Entrainment due to Polarization at Nearly Insulated Wedges", *Phys. Fluids*, Vol. 14, pp. 4315~4328.
- 3) Chen, C. and Santiago, J.G., 2002, "Electrokinetic Flow Instability in High Concentration Gradient Microflows", *Proc. of IMECE2002 ASME International Engineering Congress & Exposition, New Orleans, Louisiana, USA, November 17-22.*
- 4) Huang, X., Gordon, M.J. and Zare, R.N., 1988, "Current Monitoring Method for Measuring the Electroosmotic Flow Rate in Capillary Zone Electrophoresis", *Anal. Chem.*, Vol. 60, pp. 1837~1838.
- 5) Paul, P.H., Gargulio, M.G. and Rakestraw, D.J., 1998, "Imaging of Pressure- and Electrokinetically Driven Flows through Open Capillaries", *Anal. Chem.*, Vol. 70, pp. 2459~2467.
- 6) Sinton, D., Escobedo-Canseco, C., Ren, L. and Li, D., 2002, "Direct and Indirect Electroosmotic Flow Velocity Measurements in Microchannels", *J. Colloid Interf. Sci.*, Vol. 254, pp. 184~189.
- 7) Kim, M.J., Beskok, A. and Khim, K.D., 2002, "Electro-osmosis-driven Micro-channel Flows: A Comparative Study of Microscopic Particle Image Velocimetry Measurements and Numerical Simulations", *Exp. in Fluids*, Vol. 33, pp. 170~180.
- 8) Devasenathipathy, S. and Santiago, J.G., 2002, "Particle Tracking Technique for Electrokinetic Micro-channel Flows", *Anal. Chem.*, Vol. 74, pp. 3704~3713.
- 9) Lee, S.J. and Kim, G.B., 2003, "Micro-PIV Analysis of Flow Resistance inside Microchannels with Different Inlet Configuration", *Proc. 1st int. Conf. On Microchannels, Rochester, USA, April 24-25*, pp. 823~827.