

마이크로 PIV 기법을 이용한 미세채널 내부 계면의 electrokinetic 효과 해석

김 국 배* · 이 상 준†

Micro-PIV Measurements of interfacial electrokinetic effects in a microchannel

Guk-bae Kim · Sang-Joon Lee

Abstract

In micro-channels, the electro-viscous effect is caused by the electrical double layer on pressure-driven liquid flow. Velocity fields of flow inside micro-channels were measured using micro-PIV system for investigating the electro-viscous effect. De-ionized water and aqueous NaCl solutions with four different concentrations were used as working fluid in a PDMS micro-channel of 100 μ m width and 66 μ m height. The pressure gradient, dP/dx , was determined from the pre-determined input flow rate Q of syringe pump. The mean velocity u_m used for calculating Reynolds number was obtained from the PIV velocity field data. These are used to plot the pressure gradient as a function of Reynolds numbers. The pressure gradient for lower concentration solution (10^{-5} M) was higher than that for the higher concentration solution. The increase of flow resistance was about 30% and 37.5% at $Re=0.02$ and 0.06 , respectively.

Key Words : Micro-PIV(마이크로 입자영상유속계), Electro-viscous effect(전기적 점성 효과), EDL(전기적 이중층)

1. 서 론

미세 크기의 구조물과 관련된 유동현상은 기존의 매크로(macro) 스케일의 이론과 일부 차이가 있음이 여러 연구를 통해 밝혀지고 있다[1]. 그 중 electro-kinetic effect와 관련된 여러 현상들은 스케일이 작아지게 되면 유동에 대한 영향이 보다 커지게 된다고 알려져 있다[2].

대부분의 고체 표면은 electrical surface potential을 지니고 있다. 만약 매우 적은 양의 이온을 포함하고 있는 유체가 이러한 고체 표면을 흘러 지나가게 되면, 고체 표면의 electrostatic charge는 유체 내부의 반이온(counterion)들을 끌어당기게 되어 전기장을 형성하게 된다. 이때, 고체 표면에서의 electrostatic charges와 유체 속의 전하 사이의 균형으로 인해 생기는 층을 electric double layer(EDL)라고 한다.

EDL은 compact layer와 diffuse double layer의 두 부분으로 나뉘어진다. Compact layer에서는 유체 속의 이온들이 강력하게 고체 벽면쪽으로 끌어당겨 지므로 유체의 움직임이 없는 부분이다. 한편 diffuse double layer구간에서는 이온들이 전기장의 영향을 덜 받기 때문에 이온의 움직임이 존재하게 된다. Compact layer와 diffuse layer의 경계부분에 생성되는 전위(electric potential)를 zeta potential(ζ)이라 부른다.

유체가 일정한 압력차로 마이크로 채널 내부를 흘러갈 때 EDL의 mobile부분에 존재하던 이온들은 채널의 한쪽 끝으로 이동하게 된다. 이러한 이온의 움직임은 유체 진행 방향과 같은 방향으로 흘러가는 streaming current라 불리는 전류를 유발시키게 된다. 이렇게 흘러간 전하는 하류 부분에 축적되게 되고 streaming potential이라고 불리는 전위(electrical potential)와 전기장(electrical field)을 형성하게 된다. 이렇게 형성된 전기장은 conduction current라 불리는 유체의 유동방향과 반대방향으로 흐르는 전류를 생성시키게 되며, conduction current와 streaming current가 같게 될 때 정상상태에 도달

† 포항공과대학교 기계공학과 교수

E-mail : sjlee@postech.ac.kr

* 포항공과대학교 기계공학과 대학원

하게 된다.

한편, 이온들이 diffuse double layer내에서 움직일 때 유체를 자신들의 진행 방향으로 끌어당기게 된다. 그런데 diffuse double layer내부에서 이온 운동은 double layer의 streaming potential에 크게 영향을 받게 된다. 일반적인 macro-scale 유동에서는 채널 유동의 수력직경(hydraulic radius)에 비해 생성되는 EDL의 크기가 상대적으로 매우 작기 때문에 계면의 electro-kinetic effect를 고려할 필요가 없다. 그러나 micro-scale 유동의 경우, 생성되는 EDL의 두께가 수력직경과 같은 유체의 특성 길이와 큰 차이가 없기 때문에 EDL의 형성은 마이크로 채널 내부 유동에 크게 영향을 미친다. 예를 들어, 순수한 물이나 순수한 oil의 경우, EDL 두께가 수 마이크로미터 크기로 나타난다고 한다[2].

2. 실험장치 및 실험방법

Fig.1은 본 연구에 사용되어진 실험장치의 구성을 나타낸 것으로, 레이저 빔을 채널의 아래쪽에서 위로 쬐어올려 시험부를 직접 조명하고, 렌즈 앞에 emission filter를 설치하여 입자의 형광 영상을 획득하였다. 이미지를 확대하기 위해 long distance microscope를 사용하였다. 입자의 형광 영상을 얻기 위해서 직경이 약 3 μ m인 붉은색 형광 폴리머 입자를 사용하였다. 이 입자들은 542nm파장의 빛에 excitation하고, 612nm파장에서 형광 빛을 방출한다. 광원으로는 Nd:YAG 레이저(532nm)를 사용하였으며, 몇 가지 고대역(long pass) 필터를 사용하여 입자의 형광 영상을 획득하였다. 또한 미세입자로부터 형광된 빛의 광량은 산란광에 비해 약하기 때문에 해상도가 1280x1024 pixels²인 12bit ICCD 카메라를 사용하여 입자영상을 획득하였다. 사용한 마이크로채널은 SU-8 (photoresist)로 채널 형상을 만든 후, PDMS(poly-dimethyl-siloxane)로 molding하여 제작하였다. 채널 폭은 100 μ m이며, 높이는 66 μ m이다. 마이크로 채널 내부로 유체를 주입하기 위해 주사기 펌프를 사용하였다. 측정구간의 크기는 1040mm x 142mm이며, 공간분해능은 20 μ m x 13 μ m이었다. 20장의 순간속도장을 앙상블 통계처리하여 평균속도장을 구하였다.

농도에 따른 electro-viscous effect를 관찰하기 위해 DI(De-ionized) water, 10⁻⁵, 10⁻⁴, 10⁻³, 10⁻² M NaCl 용액을 사용하였으며, 각각의 경우마다 주사기 펌프를 사용하여 15.28, 30.57, 61.14, 122.27kPa/m의 압력구배를 채널 내부에 형성시키고 마이크로 PIV 기법을 이용으로 속도장을 측정하였다. 획득한 속도장으로부터 평균 유속을 구한 후 Re 수를 계산하였으며, 압력 구배에 따른 Re 수를 도시하였다. (Fig. 2)

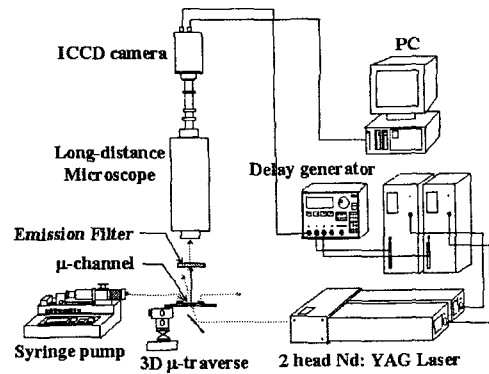


Fig. 1 Schematic diagram of Micro PIV system

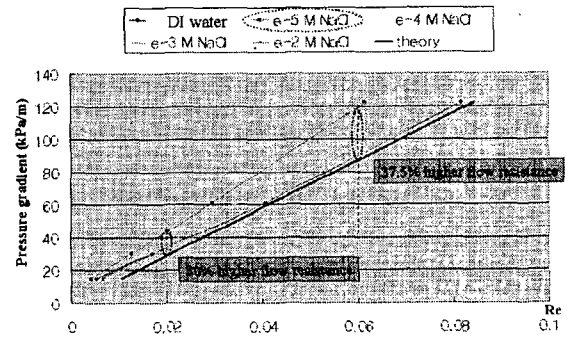


Fig. 2 Variation of Pressure gradient with respect to Re number

3. 결과 및 토의

본 실험으로부터 electro-viscous 효과에 의해 유동 저항이 발생함을 볼 수 있었으며, NaCl수용액의 농도가 감소함에 따라 압력구배(dP/dx), 즉 유동저항이 점차 증가하였다. DI(De-ionized) water, 10⁻⁵, 10⁻⁴, 10⁻³, 10⁻² M NaCl 용액 중 10⁻⁵ M NaCl인 경우, 유동저항이 가장 크게 나타났으며, electro-viscous effect가 없을 때와 비교했을 때 Re=0.02에서 30%, Re=0.06에서 37.5% 유동저항이 증가하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다

참 고 문 헌

- 1) Tuckerman, D. B., Pease, R. F. W., 1981, IEEE Electron Device Lett. Vol. 2, pp.126
- 2) Ren, L., Qu, W., Li, D., 2001, "Interfacial electrokinetic effects on liquid flow in microchannels", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 44, pp.3125~3134.