

# Micro-PIV를 이용한 마이크로 튜브 /채널 내에서의 혈장유동 측정

고춘식\* · 윤상열\* · 지호성\*\* · 김재민\* · 김경천†

## Measurements of Plasma Flows in Micro-Tube/Channel Using Micro-PIV

Choon Sik Ko, Sang Youl Yoon, Ho Seong Ji, Jae Min Kim, Kyung Chun Kim

### Abstract

In this paper, flow characteristics of plasma flow in a micro-tube were investigated experimentally using Micro-PIV. For comparison, the experiments were repeated for DI-water instead of plasma. Both velocity profiles of Plasma and DI-water are well agreed with the theoretical velocity distribution of newtonian fluid. We also carried out generating plasma-in-oil droplet formation at a Y-junction microchannel. In order to clarify the hydrodynamic aspects involved in plasma droplet formation, Rhodamin B were mixed with plasma only for visualization of plasma droplet.

**Key Words** : Plasma(혈장), Micro-PIV(마이크로 입자영상유속계), droplet formation  
micro-tube(마이크로 튜브), microchannel(마이크로채널)

### 1. 서 론

Bio-technology와 micro-technology를 융합한 microfluidics에 관한 많은 연구가 수행되고 있으며  $\mu$ -TAS(Micro Total Analysis System)에 응용되어 지고 있다. 또한 microfluidics에서 혈류유동(blood flow)이 중요한 분야로 간주되며 multi-phase flow, non-newtonian fluid, cardiac cycle 등과 같은 혈류유동의 비선형 특성에 관한 많은 연구가 진행되고 있다.

최근 개발된 Micro-PIV 기법으로 미소유체소

를 획득하는 것이 가능해졌으며 적용범위에 따라 다양하게 응용 개발되고 있다. Micro-PIV 기법으로 과거 측정이 어려웠던 모세혈관이나 마이크로 채널과 같은 미소단면적에 대한 혈류유동을 측정할 수 있게 되었다.<sup>(1)(2)(3)</sup>

또한 organic phase fluid와 water phase fluid로써 water/oil two phase fluid를 사용하여 Y자형 마이크로채널과 T자형 마이크로 채널에서의 표면장력에 의해서 micro droplet을 발생시키는 연구가 수행되고 있다.<sup>(4)(5)</sup>

본 연구에서는 마이크로 튜브 내부에서 두가지의 작동 유체 즉, 사람의 혈액에서 분리한 혈장(plasma)과 DI-water의 유동 특성을 측정 비교하고, 마이크로 채널 내부에서의 혈장(water phase)과 오일(oil phase)에 의한 blood/oil phase 유체 유동에서의 표면장력에 의해 생성되는 micro-droplet 형성에 관한 가시화를 측정하였다.

---

† 부산대학교 기계공학부

E-mail : kckim@pusan.ac.kr

\* 부산대학교 대학원 기계공학과

\*\* 부산대학교 기계기술연구소

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에 사용된 마이크로 튜브는 300 $\mu\text{m}$ 의 내경과 500 $\mu\text{m}$ 의 외경으로 이루어져 있으며 FEP(Fluorinated Ethylene Polymer)로 제작되었다.

Fig.1은 마이크로 채널의 형상을 나타내며 100 $\mu\text{m}$ (폭) $\times$ 80 $\mu\text{m}$ (높이)를 가진 Y자형 마이크로 채널로써 상부는 300 $\mu\text{m}$  두께의 Pyrex glass로 덮여있으며, 채널은 실리콘 웨이퍼로 제작되었다.

Fig. 2는 본 연구에서 사용된 Micro-PIV장치의 개념도를 나타낸 것으로 Fig. 2(a)는 마이크로 튜브의 측정을 Fig. 2(b)는 마이크로채널의 측정을 위해 사용된 Micro-PIV 장치이다. 본 연구를 위한 Micro-PIV 장치는 형광현미경, Nd-YAG 레이저, 12bit cooled CCD camera, synchronizer로 구성되었다. 형광현미경(BX51, IX51, Olympus)의 내부에는 550nm 이상의 파장을 통과시키는 high pass filter가 장착되어 입자로부터 형광되는 영상만을 투과시켜 획득하도록 하였으며, 20 $\times$ 의 objective lens가 사용되었다. 광원으로는 Nd-YAG 레이저가 사용되었으며 레이저빔은 렌즈의 조합에 의해 확대되어 조사되었다. 화상 획득을 위하여 1280 $\times$ 1024 해상도의 12bit cooled CCD camera (PIVCAM 13-8, TSI)가 사용되었다. Micro-PIV 계측을 위해 사용된 입자는 500nm 직경의 형광입자(Excitation:542nm / Emission :612nm)와 1 $\mu\text{m}$  직경의 형광입자(Excitation: 535nm/Emission: 560nm)가 사용되었으며 유동의 형성을 위해 syringe pump가 사용되었다.

Fig. 3은 test section을 나타낸 그림으로 굴절률에 의한 왜곡현상을 최소화하기 위해서 마이크로 튜브를 물에 잠기게 하였으며 물에서도 사용이 가능하도록 제작된 20 $\times$  Water immersion objective lens를 사용하였다.

마이크로 튜브에서 Micro-PIV에 의해 측정된 화상으로부터 속도벡터의 추출을 위해 2 frame cross correlation 기법을 적용한 PIV-ACE가 사용되었으며

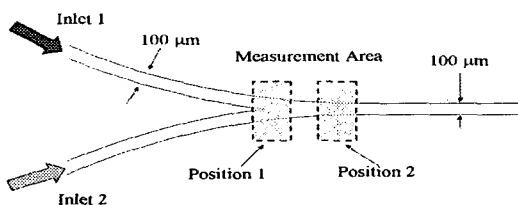


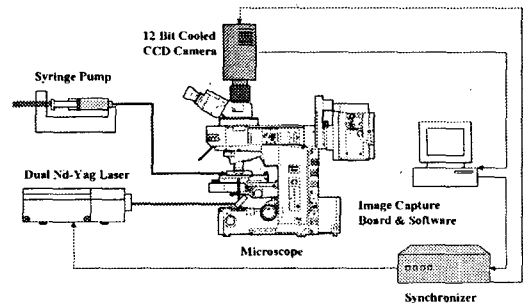
Fig. 1 Schematic of Y-junction microchannel and measurement Area

화상해상도는 350nm/pixel 정도이며 실제 속도벡터장은 가로 11.2 $\mu\text{m}$  $\times$ 22.4 $\mu\text{m}$ 의 벡터간격의 해상도를 가지며 300장의 앙상블 개수로 평균을 구하였다.

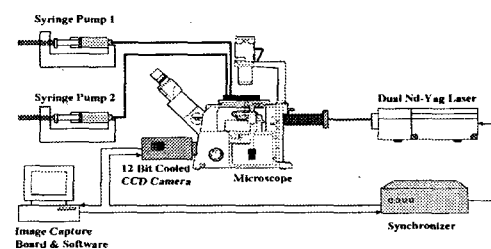
### 2.2 실험방법

본 연구에서 Micro-PIV에 의한 마이크로 튜브 내부에서의 혈장(plasma)의 유동 측정을 위하여 500nm의 형광입자가 사용되었으며, 유동 특성의 비교를 위해서 DI-water에 1 $\mu\text{m}$  형광입자를 혼합하여 유량변화에 대한 속도장을 측정하였다.

또한 Y자형 마이크로채널에서 oil phase와 water phase에 의한 droplet 가시화를 위한 실험으로 oil phase와 water phase에는 혈장을 이용하였으며, 유량비의 조절에 의한 droplet 형성의 변화를 측정하였다. 가시화를 위하여 혈장에 극소량의 Rhodamin-B를 혼합하였다.



(a)



(b)

Fig. 2 Schematic of experimental setup

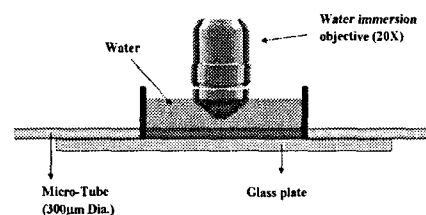


Fig. 3 Geometry of objective lens and test section in Micro-tube

### 3. 실험 결과

Fig. 4는 micro-tube 단면의 중간지점에 대하여 Micro-PIV에 의한 속도를 측정된 그래프이다. 혈장과 DI-water에 대하여 속도분포를 측정하였으며 전체 측정영역은  $430\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$ 이며 각 pixel은  $0.35\mu\text{m} \times 0.35\mu\text{m}$ 의 크기를 가진다. 또한 속도는 혈장과 DI-water 모두 거의 동일한 속도 분포를 갖는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5는 혈장과 DI-water의 측정결과와 이론값의 비교를 나타낸 그림이다. 혈장과 DI-water 모두 이론값과 대체로 일치하지만 벽면에서는 다소 차이를 보이는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 Y자형 마이크로 채널에서의 Droplet 형성 과정을 나타낸 그림이다. 혈장과 오일의 경계면에서 표면장력에 의해 droplet이 발생하고

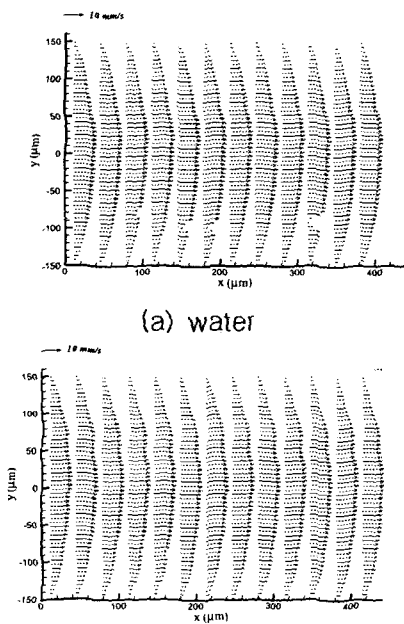


Fig. 4 Ensemble averaged velocity distributions in the center plane ( $Q=25\mu\text{l}/\text{min}$ )

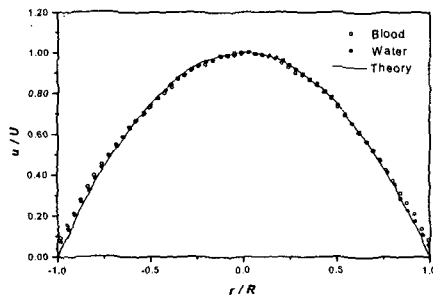


Fig. 5 Ensemble averaged velocity profiles at the center of the micro-tube ( $Q=25\mu\text{l}/\text{min}$ ) 있음을 확인할 수 있으며 규칙적으로 발생함을 실험과정에서 확인하였다.

Fig. 7은 혈장의 유량 변화에 따른 droplet의 크기 변화를 보여 주고 있으며, droplet의 크기는 유량의 증가에 비례하여 증가하였다. 또한 droplet의 형상을 볼 때 선단과 후미의 경계면 형상의 차이가 있으며 이는 벽면전단응력에 의한 것이다.

Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10에서는 혈장의 유량변화에 따른 droplet의 크기, 공간적인 주기, 그리고 공간적인 주기와 평균유속에서 유추한 생성주파수를 나타낸 결과이다. 유량이 증가함에 따라 droplet의 크기와 생성주파수는 선형적으로 증가하는 반면 공간적인 주기는 비선형적으로 줄어 들고 있음을 알 수 있다.

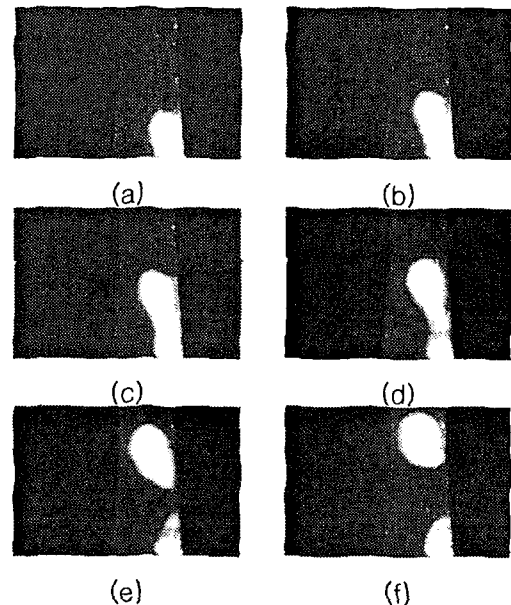


Fig. 6 Visualization of droplet formation (olive oil :  $3\mu\text{l}/\text{min}$ , Plasma :  $1.5\mu\text{l}/\text{min}$ )

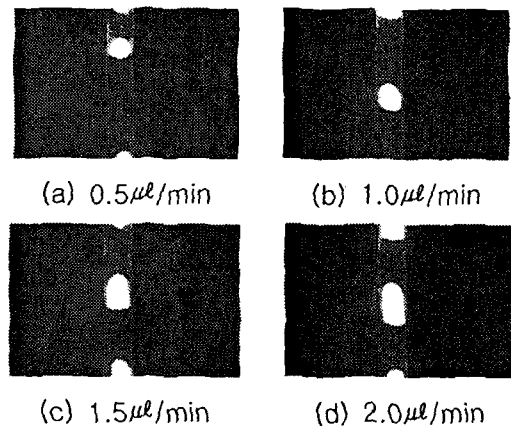


Fig. 7 Variation of droplet length according to plasma flow rate

#### 4. 결론

마이크로 튜브/채널에서의 혈장 유동에 대한 Micro-PIV 계측이 수행되었다. 마이크로 튜브에서의 유동 측정으로 혈장이 newtonian 유체의 특성을 가진다는 것을 알 수 있었다. 그러나 벽면에서의 실험값과 이론값의 오차의 원인과 혈장 내에서의 형광입자의 응집현상에 대한 추가적인 분석이 필요하다고 판단된다.

마이크로 채널에서의 혈장과 오일간의 높은 전단력과 표면장력으로 인하여 규칙적으로 droplet이 형성되는 것을 볼 수 있었다. droplet의 형상은 유량의 증가에 따른 벽면 전단응력의 영향으로 원형에서 탄환형으로 변화하는 것을 확인하였

고, droplet의 크기와 생성주파수는 선형적으로 증가하는 반면 공간적인 주기는 비선형적으로 줄어들고 있음을 알 수 있다.

이러한 droplet의 크기, 공간적인 주기, 생성주파수는 이를 활용한 Lab-on-a-chip 또는  $\mu$ -TAS의 설계에 중요한 기초자료가 될 수 있다. 그리고 이러한 혈장의 균일한 droplet 생성은 혈장을 이용한 혈액분석 시스템에 이용될 수 있다

#### 후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실(NRL) 사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- 1) J.G. Santiago, S.T. Wereley, C.D. Meinhart, D.J. Beebe, R.J. Adrian, 1998, "Particle image velocimetry system for microfluidics", *Experiments in Fluids*, Vol 25, pp. 316-319
- 2) Nakano A, Minamiyama M, Sugii Y and Nishio, S, 2001, "Measurements of red blood cell velocity profile in microvessels using particle image velocimetry combined with high-speed digital camera", *Microcirc. Annu*, Vol. 17, pp. 159-160
- 3) L. Bitsch, L.H. Olesen, C.H. Westgaard, H. Bruus, H. Klank and J.P. Kutter, 2003, "Micro Particle-image velocimetry of bead suspensions and blood flows", *Experiments in Fluids*, submitted 8 July 2003
- 4) Nisisako T, Torii T, Higuchi T, 2002, "Preparation of Picoliter-sized Reaction/Analysis Chambers for Droplet-based Chemical and Biochemical Systems", *Micro Total Analysis Systems 2002*, 3 vol.1, pp 362-367A
- 5) S.Y. Yoon, K.C. Kim, 2003, "Micro-PIV Measurement of Water/Oil Two Phase Flow in a Y-Junction Microchannel", 5th International symposium on Particle Image Velocimetry

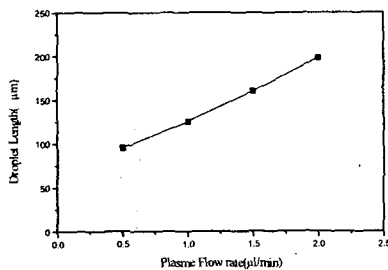


Fig. 8 Variation of droplet length according to plasma flow-rate

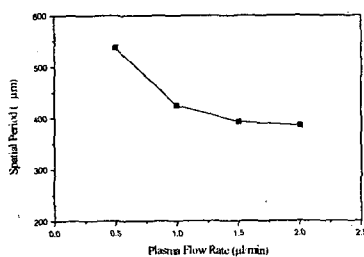


Fig. 9 Variation of spatial period according to plasma flow-rate

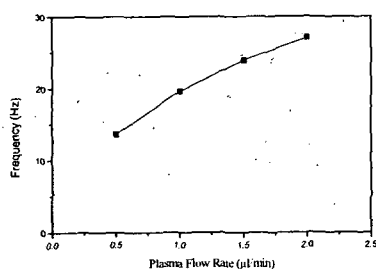


Fig. 10 Variation of Frequency according to plasma flow-rate