

# 마이크로채널 내부의 혈류 유동장 측정에 관한 연구

박철우\*\* · 김국배\*\*\* · 이상준\*\*\*

## 1. 서 론

혈류는 인체내부의 혈관(blood vessel)을 통하여 물질전달, 체온유지 및 병균방어 등의 중요한 기능들을 수행하고 있다. 혈액은 많은 구성요소(composite)들과 혈장(plasma)으로 이루어져 있으며 역학적으로 고체와 액체의 성질을 동시에 지니는 유변학적 특성을 가지고 있다. 구성요소의 대부분은 적혈구(red blood cell)로 이루어져 있으며 혈액의 점도(viscosity)는 물의 약 4.5-5.5 배 정도인 것으로 알려져 있다.<sup>(1)</sup>

이처럼 인체에 있어서 매우 중요한 부분을 차지하고 있는 혈류의 통로가 되는 순환계(circulatory system)에 대한 연구들은 오래전부터 많이 수행되어져 오고 있다. 예를 들면 인공심장 개발과 관련된 대동맥 내부유동이나 관상동맥 내부의 협착(stenosis) 등에 기인한 유동특성 변화와 관련된 연구들이 수행되어지고 있다. 특히, 이러한 혈류 유동은 맥동성 유동이므로 시간 및 공간적 상태에 따라 큰 차이를 보이고 측정과 해석에 많은 어려움이 따른다. 따라서 아직까지는 실험보다는 수치해석 연구들이 수행되고 있는 실정이며 최근 들어서는 보다 정확한 실험적 연구들이 수행되고 있다.<sup>(2,3,4)</sup>

따라서, 본 연구에서는 이러한 혈관계 중에서 관성력과 맥동성의 영향이 매우 적은 미세혈관계 내부의 혈류 유동장 특성을 Micro-PIV (Particle Image Velocimetry) 속도장 측정 기법을 적용하여 실험적으로 해석하고자 한다. 세동맥 및 세정맥 같은 미세크기의 혈관계를 모델링하기 위해서 최근 초소형기계 기술로 각광을 받고 있는 microfluidics 기술을 적용하여 마이크로채널을 제작하였다. 또한 혈액의 구성요소인 적혈구 등이 포함되어진 상태에서 혈류의 유동특성을 연구할 수 있는 기법을 개발하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 two-frame cross-correlation PIV

\* 포항공과대학교 기계산업공학부 연구원

\*\* 포항공과대학교 기계공학과 대학원

\*\*\* 포항공과대학교 기계공학과

기법을 사용하여 마이크로채널 내부 혈류 유동의 정량적인 속도장 결과를 구하였다. Fig. 1은 Micro-PIV 속도장 측정시스템을 나타낸 것이다. 유동 영상은 Microscope의 측면에 수직으로 장착된 Cooled CCD 카메라를 사용하여 영상을 취득하였으며, 50 장의 순간 속도장을 평균하여 평균속도의 공간 분포를 측정하였다.

마이크로채널은 LIGA 기법으로 제작된 마스터를 사용하여 PDMS 플라스틱 재질로 제작하였으며, 슬라이드 유리 위에 접착하였다. 미세채널의 폭은 200 $\mu\text{m}$  이고 높이는 50 $\mu\text{m}$  이다. 사각채널 내부유동에 평균직경이 820nm 인 red fluorescence polymer sphere 입자를 tracer 입자로 seeding 하였다. 사용된 형광 입자는 Nd:Yag 레이저의 파장인 532nm 에서 전체 조명(volume illumination)으로 여기시켰고, 612nm 로 방출되는 형광된 빛은 파장 570nm 의 고대역필터를 사용하여 형광된 입자영상만을 취득하였다.

작동유체로는 순수한 3 차 증류수인 deionized (DI) water 및 DI water 와 혈액 10%를 혼합한 용액 두가지를 사용하였다. 채널내부의 유량은 syringe pump 를 이용하여 조절하였으며, DI water 의 경우 미세채널의 hydraulic diameter 에 기초한 레이놀즈수는 약  $Re=0.34$  이었다.

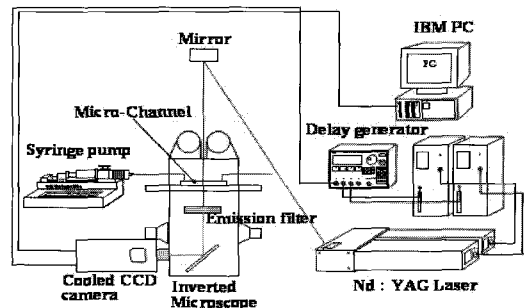


Fig. 1 Schematic diagram of Micro-PIV system

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 2 는 두가지의 다른 작동유체에 대한 미세 채널 내부 유동의 평균속도장 및 주유동방향 속도

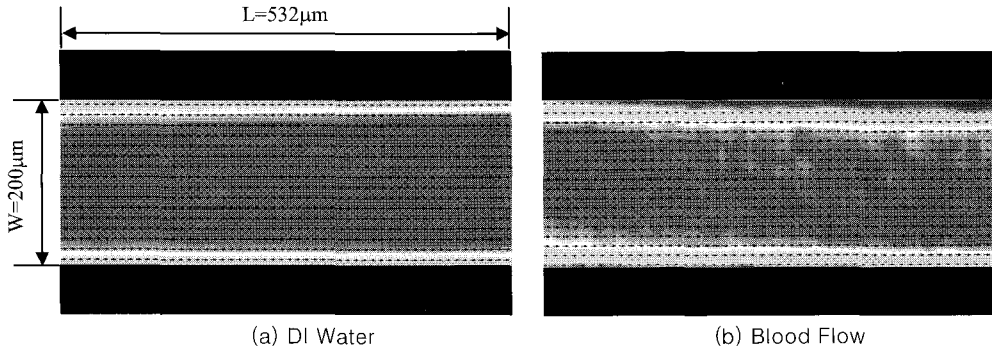


Fig. 2 Mean velocity fields and contour plot of streamwise velocity

성분의 등속 contour를 나타낸 것이다. 먼저 순수한 DI water 유동의 경우, 나노 스케일의 형광 입자의 입자 영상이 상대적으로 깨끗하고 입자 들이 유동을 잘 추적하고 있어 정확한 속도 벡터를 얻을 수 있었다. 그러나 혈액이 혼합된 유동의 경우에는 적혈구가 유동속에 포함되어 있어 주유 동방향의 속도 변동성분이 상대적으로 증가하였다.

일반적으로 중간 크기의 미세혈관에서는 적혈구의 기하학적 형상으로 인해 채널 중심에서 농도가 증가하는 axial migration 현상이 나타난다고 알려져 있다. 본 연구의 경우, Fig. 2(b)에서 보는바와 같이 혈류유동의 경우를 보면 벽면보다 채널 중심 영역에서 속도가 다소 증가하는 경향을 보여주고 있으며 등속영역의 폭이 DI water의 경우에 비해 약간 좁아졌음을 알 수 있다.

이러한 혈류를 이용한 속도장 측정시 발생하는 문제점으로는 채널 중심부에서의 적혈구의 농도 증가로 인해 평균속도의 변동성분이 존재하는 것을 확인할 수 있기는 하였지만, Fig. 3에서 볼 수

있는 것처럼 형광입자들이 적혈구와 서로 결합되는 현상이 생기게 되어 정확한 속도벡터를 구하는데 어려움으로 작용하는 것으로 생각되어진다. 이것은 속도측정을 위해 삽입된 음전하를 띠고 있는(negatively charged) 형광입자와 적혈구 내부를 이루고 있는 헤모글로빈의 +2 가 철이온이 포함 되어져 있기 때문으로 보인다. 따라서 혈류 유동 측정시에는 전하특성이 중성(neutral)인 입자를 사용하고 또한, cohesion 성질이 가능한 적은 tracer 를 사용하여야 보다 정확한 속도벡터를 추출할 수 있을 것이다.

또한, 일반적인 레이저 조명으로는 산란특성이 없는 적혈구의 거동을 정확히 가시화하기가 어렵다. 따라서 적혈구내의 헤모글로빈을 detergent 등에 포함된 염기성 이온들과 결합시킨 후 흡광특성을 이용하여 PTV 방식으로 적혈구 각각의 움직임을 정량적으로 측정하여 속도를 보상해주게 되면 보다 정확한 유동특성을 파악할 수 있을 것으로 판단되어진다.

## 후 기

본 연구는 국가지정연구실(NRL)사업 지원에 의하여 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Martini, F. H., 1989, "Fundamentals of Anatomy and Physiology", Prentice Hall, pp. 641~669.
- (2) Meinhart, C. D., et al., 1999, "PIV Measurements of a Microchannel Flow", Exp. in Fluids, Vol. 27, pp. 414~419.
- (3) Borg, A., et al., 2002, "LIF Study of Mixing in a Model of a Vein Punctured by a Cannula", Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 23, pp. 664~670.
- (4) Ernst, H., et al., 2002, "High Resolution Flow Characterization in Bio-MEMS", Sensors and Actuators A, Vol. 100, pp. 54~62.

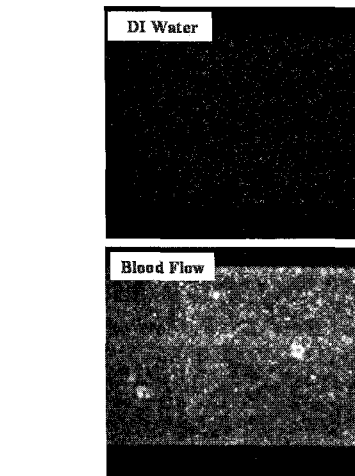


Fig. 3 Raw images of fluorescent particles