

유정란 배아의 다양한 혈관 내부 혈액유통의 in-vivo 계측

이정엽*, 지호성**, 이상준**

In-vivo Measurements of Blood Flow in Various Extraembryonic Blood Vessels of a Chicken Embryo

Jung-Yeop Lee*, Ho-Seong Ji** and Sang-Joon Lee**

1. 서론

최근 들어 순환기 질환(circulatory disorder)에 대한 진단과 예방을 위해 유체역학에 기초를 둔 유변학(hemorheology)적 관점에서 접근하고자 하는 연구가 활발히 이루어 지고 있다. 혈관(blood vessel)을 따라 흐르는 혈류(blood flow)에 의해 혈관 내벽에 작용하는 전단응력(shear stress)은 내피 세포의 형상변화에 영향을 주어, 혈관의 생성(genesis)과 병리학적 관점에서 동맥경화 및 혈관의 협착 등에 많은 영향을 미친다고 알려져 있다(1). 이처럼 전단응력은 생체조직의 발달과 성장에 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 혈류유통과 벽면 전단응력 분포에 대한 정량적인 정보는 순환기 질환의 연구에 있어서 매우 중요하다. 그러나 혈액유통의 유체역학적 정보를 획득하기 위해 살아있는 생체를 대상으로 연구를 수행하는 것은 쉽지 않다.

따라서 본 연구에서는 적혈구를 추적입자로 사용하는 in-vivo micro-PIV 혈류유통 계측기법에 높은 시간분해능을 가지는 dynamic PIV 측정 기법을 접목하여 다양한 형태의 유정란 태아의 부혈관의 혈액유통에 대한 정량적인 유통정보를 획득하고, 이를 바탕으로 혈류유통의 특성을 분석하고자 하였다.

2. 실험장치 및 구성

본 연구에서는 in-vivo 방식의 생체 혈액유통 측정 대상으로 발생단계 20(72 hours of incubation)(2)에 해당하는 유정란을 이용하였는데, 유정란의 경우 태아 및 태아의 부혈관이 난황 위 표면 근처에 주로 분포하여 in-vivo micro-PIV 기법을 이용한 혈류유통의 가시화가 용이하다. 유정란은 신진대사가 이루어지는 살아있는 생체이며 혈액은 내피세포가 존재하는 실제의 혈관을 따라 흐르므로, 여기서 얻어지는 혈류 유통의 정보는 인공적인 혈관이나 마이크로 채널을 흐르는 혈

류의 유통정보보다 더 큰 의미를 가진다고 할 수 있다.

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 micro-PIV 속도장 측정시스템의 개략도를 나타내고 있다. 그림에서 보이는 바와 같이 micro-PIV 시스템은 현미경, CMOS 고속카메라, 할로겐 램프, 제어용 컴퓨터 등으로 이루어져 있다. 본 실험에서는 시간에 따라 변화하는 맥동성이 있는 동맥류의 속도정보를 획득하기 위해 고속카메라를 사용하여 dynamic PIV 기법으로 속도장을 측정하였다.

실험시 혈액속의 적혈구 입자영상을 1280×1024 픽셀 해상도로 유통조건에 따라 초당 200~250 프레임씩 취득하였다. 그리고 연속광인 할로겐 램프를 광원으로 사용하였으며, 초당 획득되는 프레임 수를 제어함으로써 시간간격(Δt)을 조절하였다. 관찰영역(field of view)의 크기는 1.561×1.249mm²이고, 공간해상도는 1.219 μ m/pixel이다. 입자영상에서 속도성분을 추출하기 위해 FFT에 기초한 상호상관(cross-correlation) 기법을 이용하여 순간속도장을 추출하였으며, 이때 미소조사구간의 크기는 24×24 pixels 이고, 50% 중첩하였다. 연속적으로 얻어진 500~1000장의 순간속도장을 평균하여 평균속도장을 구하였으며, 시간에 따라 얻어진 속도성분을 바탕으로 동맥에서의 맥동주파수를 구하기 위해 FFT 분석도 수행하였다.

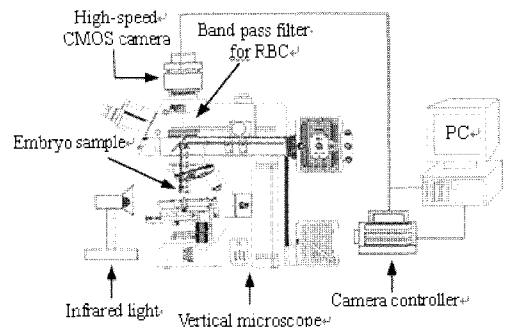


Fig. 1 Schematic diagram of a micro-PIV system for in-vivo measurements

* 포항공과대학교 기계공학과 대학원

** 포항공과대학교 기계공학과

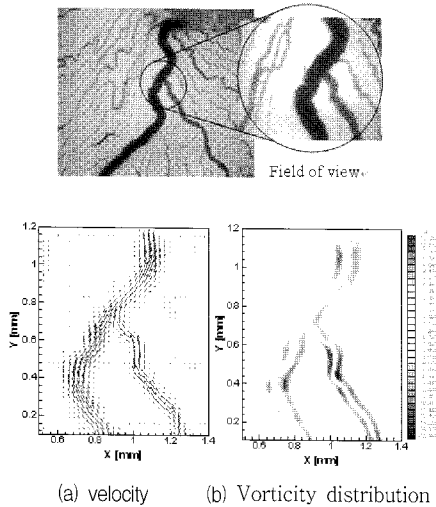


Fig. 2 Mean velocity field and vorticity distribution of vein.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 정맥을 흐르는 혈류유동의 평균속도장(a)과 와도장(b)을 속도벡터와 등고선(contour)으로 나타낸 것을 보여주고 있는데, 혈관 내부를 흐르는 혈류유동의 공간분포를 잘 나타내고 있다. 혈관벽면에 가까운 위치에서의 속도벡터의 크기는 0에 가까우며 중심부에서 최고속도가 관찰된다. 그리고 혈관이 합쳐지는 부분에서는 상대적으로 높은 유속에도 불구하고 혈관벽면에 작용하는 전단력의 큰 변화를 수반하는 유동박리(flow separation)나 혈관의 막힘 현상 없이 유선이 깨끗이 흘러가며 부드럽게 합쳐지는 현상을 볼 수 있다. 이것은 혈구를 포함하고 있는 비뉴턴 유체(non-Newtonian fluid)인 혈액의 유동특성과 점성의 영향에 기인한 것으로 생각되어진다. Fig. 2(b)를 보면, 혈관벽면에서의 큰 속도구배에 기인하여 벽면 근처에서 높은 와도값이 분포하고 있음을 알 수 있다. 특히 혈관의 굽곡이 크게 변화하는 부분에서 더 높은 와도값이 관찰되는데, 이러한 와도 분포의 특징은 혈관 내부에서 높은 전단력이 발생하는 위치를 예측하는데 유용하게 사용될 수 있다고 판단되어진다.

Fig. 3은 동맥에서 혈액의 속도분포를 dynamic PIV 속도장 측정기법을 이용하여 얻은 후, 혈관 중심부의 속도성분을 추출하여 얻은 시간에 따라 변화하는 속도 신호(Fig. 3(a))와 이를 FFT(fast Fourier transform) 분석한 결과(Fig. 3(b))를 보여주고 있다. Fig. 3(b)에 보이는 바와 같이 PSD(power spectrum density) 상에 뚜렷한 정점(peak)을 보이는 맥동주파수(1.953Hz)를 얻을 수 있었으며, 이것은 보통 1~1.2Hz인 사람의 맥박보다 상대적으로 빠름을 알 수 있다. 일반적으로 유정란 태아의 맥동주파수는 2Hz로 알려져 있는데, 위의 FFT 결과를 통해 본 연구에서 수행된 in-vivo 속도장 측정 결과가 타당함을 확인할 수 있다. 이와 같이 시

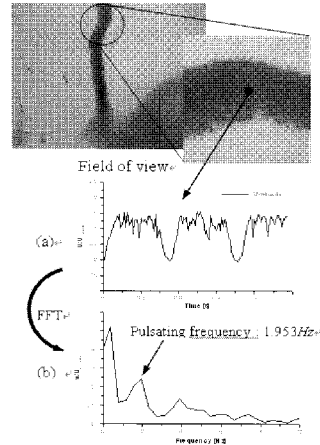


Fig. 3 Temporal variation of U-velocity (a) and its power spectrum density distribution (b) at the center location of the artery.

간에 따라 변화하는 맥동류의 유동정보를 정량적으로 측정하는 기법은 향후 심장 내부 유동특성 규명, 심장 박동 주기에 따른 유동특성 변화 등을 관찰하는 연구에서도 활용되어질 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 유정란 태아의 외부혈관에 대한 in-vivo 계측을 수행하여 혈류의 유동정보를 정량적으로 획득하였다. 연구결과 혈액유동은 비뉴턴 유체의 유동특성을 가지고 있으며, 상대적으로 빠른 유속에도 불구하고 곡선 혈관 및 분지관 형태 등 혈관 형상의 다양한 인자에 상관 없이 유동박리나 2차 유동의 발생 없이 유선이 부드럽게 형성되어 혈액이 매끄럽게 흘러가는 것을 관찰하였다. 그리고 동맥에서 시간에 따라 변화하는 맥동류의 속도장 정보를 획득하였으며, 맥동주기를 분석하여 1.953Hz의 맥동주파수를 얻어내었다.

후 기

본 연구는 과기부(과학재단)에서 지원한 특정기초연구(R01-2004-000-10500-0)와 시스템바이오다이나믹스 국가핵심연구센터의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) Malek, A. M., et. al., 1999, "Hemodynamic Shear Stress and Its Role in Atherosclerosis," Journal of American Medical Association, pp. 2035~2042.
- (2) Hamburger V., Hamilton H., 1951, "A series of normal stages in the development of the chick embryo," Journal of Morphology, pp. 49 - 92.