

X-ray PIV 기법을 활용한 생쥐 혈관 협착 모델의 속도장 측정에 관한 연구

박한욱* · 박준홍* · 이상준*

In vivo X-ray PIV measurements of blood flows in a rat stenosis model

Hanwook Park*, Jun Hong Park*, Sang Joon Lee*

Abstract : To investigate hemodynamic information in blood vessels, X-ray PIV technique have been used in a nondestructive manner. Recently, a time-resolved X-ray PIV technique was used to obtain hemodynamic information of rat without changing of hemorheological properties. Blood flows in stenosed vessel which is one of the hemodynamic disease models is highly related with disorders in the circulatory vascular disease. Therefore, measurements of blood flows in the stenosed vessels with high measurement accuracy is one of the important issues to understand hemodynamic and pathologic characteristics of cardiovascular disease. In this study, we obtained hemodynamic information in the stenosed vessels using time-resolved X-ray PIV technique. To induce stenosis in the blood vessels, we installed the stenosis clip outside of blood vessels. This study would be helpful to investigate blood flows in the stenosed vessels using time resolved X-ray PIV measurement system.

1. 서 론

심혈관계 질환은 현대 주요 사망원인중 하나인데, 이러한 심혈관계 질환의 발생기전을 이해하고 조기 진단하는 것은 중요한 문제이다. 특히 이러한 심혈관계 질환의 경우 유체역학 측면에서 발생기전을 밝히는 연구가 많이 진행되었는데 다양한 변수 중 벽면전단응력이 중요한 역할을 한다고 알려져 있다. 혈관 벽면에 작용하는 전단응력 및 혈액의 속도장을 정확히 측정하기 위해 많은 비 침습적인 기법들이 개발되었는데, 본 연구에서는 그중 높은 공간, 시간분해능을 가진 X-ray PIV 기법을 이용하여 혈액의 속도장을 획득하고자 한다. X-ray PIV 기법의 경우 처음 개발된 이래로 점진적으로 기법이 개선되어져 왔으며 ⁽¹⁾, 최근에는 이러한 X-ray PIV 기법을 이용하여 생쥐 내부 혈관의 속도장 정보 획득에 관한 feasibility를 *in vivo* 조건 하에서 측

정하는 연구가 수행되었다 ⁽²⁾.

순환기 질환의 경우 비 정상적인 혈액의 흐름으로 인해 야기된다고 알려져 있는데, disturbed flow를 야기하는 다양한 geometry 중 본 연구에서는 협착된 혈관 주위 유동을 관측하였다. 협착된 혈관 전후에는 recirculation zone과 같은 특이한 유동 구조가 나타나는데, 이러한 협착된 혈관 내에서 혈류의 속도장을 정확히 측정하는 것은 매우 중요한 문제이다. 하지만 혈관 및 혈액의 불투명한 특징으로 인하여, 기존의 연구들은 *in vivo* 상태에서 협착된 혈관 내부의 혈액유동을 관측하는데 한계가 있었다. 본 연구에서는 이를 극복하기 위해, 쥐의 혈관에 clip을 설치하여 다양한 severity를 가진 stenosis 내부 혈액의 속도장 및 벽면전단응력을 X-ray PIV 기법으로 측정 하였다. 또한 제한된 조건 하에서 *in vivo* 측정도 진행하였다.

2. 본 론

2.1. 생쥐 협착 모델의 제작

Fig. 1은 생쥐 협착 유발 clip이 설치된 복부대동맥을

* 포항공과대학교 기계공학과

나타낸다. Stenosis clip은 3D printer로 제작하였다. 근육이완제와 마취제를 12주령 쥐에 주입한 뒤, 쥐의 경

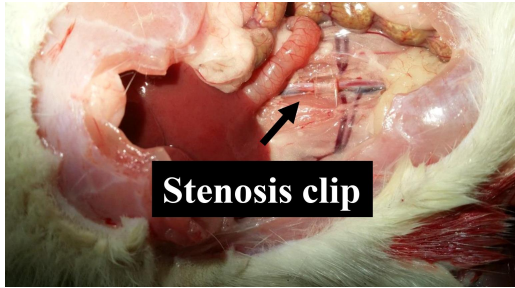


Fig. 1 Stenosis clip and abdominal aorta.

정맥에 PE-50튜브를 연결하여 혈액의 응고를 막기 위해 헤파린 나트륨을 주입한다. 헤파린 나트륨을 주입한 10분 뒤 우측대퇴동맥에 PE-50튜브를 연결하여 쥐의 혈액을 모두 추출한다. 추출한 쥐의 혈액에 CO₂ microbubbles을 균일하게 섞은 후 이를 시린지 펌프를 이용하여 대퇴동맥에 다시 주입한다. Stenosis clip은 쥐의 복부대동맥에 설치할 하였는데, 협착모델을 장착할 혈관의 위치는 생쥐의 혈관크기 및 3D 프린터의 해상도를 고려하여 복부대동맥으로 정하였다.

2.2. X-ray imaging and image processing

본 연구는 포항 가속기 연구소의 6C 빔라인에서 수행하였다. Beam current는 320 mA 이며, 빔 에너지는 3 GeV 이다. X선 광은 24 KeV의 단색광을 사용하였으며 사용된 섬광결정(500 μ m)을 사용하였다. 섬광결정에서 가시광선으로 변환된 영상은 고속 카메라(SA1.1, Photron, Japan)를 이용하여 획득하였으며, 10배 렌즈를 사용하여 field of view가 1945 \times 1945 μ m 로 관측되었다. 획득된 영상은 불균일한 빔의 조사로 인한 효과를 최소화하기 위하여 background 제거 기법중 하나인, flat field correction을 사용하였으며, noise로 인한 효과를 최소화하기 위하여 spatial frequency filter(CLAHE algorithm)를 사용하였다⁽¹⁾. 연속된 두장의 영상에 마스크를 씌운 후 two frame cross-correlation PIV algorithm을 적용하여 stenosis 내부 혈액의 속도장을 성공적으로 획득하였다. Fig.2 는 획득된 혈액의 instantaneous 속도장을 나타낸다.

3. 결론

본 연구에서는 생쥐 cadaver 모델 및 살아있는 생쥐

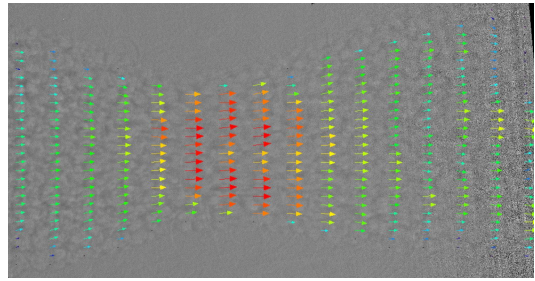


Fig. 2 Instantaneous velocity vector fields obtained in stenosed abdominal aorta.

내부 혈관에 stenosis clip을 장착하여 다양한 혈류역학 정보를 X-ray PIV 기법을 이용하여 획득하였다. 본 연구를 통해 제안된 생쥐 협착 모델을 이용하여 다양한 유동조건과 협착된 혈관의 형상이 혈류역학에 미치는 영향에 대해 체계적인 연구를 할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2008-0061991).

참고 문헌

- (1) Jung, S. Y., et. al., 2012, "Time-resolved X-ray PIV technique for diagnosing opaque biofluid flow with insufficient X-ray fluxes," *Journal of Synchrotron Radiation*, pp. 498-503.
- (2) Park, H., et. al., 2015, "Measurement of real pulsatile blood flow using X-ray PIV technique with CO₂ microbubbles," *Scientific Reports*, pp. 8840.