

X-ray PIV 기법을 이용한 생쥐 복부대동맥 내부 혈류의 속도장 측정

박한욱* · 염은섭* · 이상준*

Measurement of blood flows in an abdominal aorta of rat cadaver using X-ray PIV

Hanwook Park, Eunseop Yeom, Sang Joon Lee

Abstract : Measurements of velocity fields of blood flow in the body is important to understand the role of hemodynamic features in circulatory diseases. Although x-ray PIV technique can measure opaque blood flows non-invasively, it is difficult to measure real pulsatile blood flows in the vessels located in a deeper position of the body because the attenuation caused by surrounding tissues significantly degrades the contrast of x-ray images. In this study, the attenuation effects of x-ray beam caused by the surrounding tissues were investigated for measuring velocity fields of blood flows in a rat cadaver. In order to minimize decrease in the image contrast deterioration, biocompatible CO₂ microbubbles were used as tracer particles. Through this study, the range of measurable velocity was determined based on the PIV measurement accuracy and the level of image contrast according to blood flow rate supplied into the abdominal aorta of the rat model. This study would be helpful to carry out *in vivo* x-ray measurements for animal disease models and to understand the relation between hemodynamic characteristics and circulatory vascular diseases.

1. 서 론

심혈관계 질환은 주요한 사망 원인 중 하나로 알려져 있다. 이러한 심혈관계 질환을 일으키는 다양한 원인 중 하나인 벽면전단응력은 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있으며, 이에 관한 많은 연구가 수행되고 있다⁽¹⁾. 벽면전단응력은 벽면 부근의 속도분포를 측정하여 값을 구하기 때문에, *in vivo* 상황에서의 속도장을 정확하게 측정하기 위해서는 비침습적 계측기법을 사용하여야 한다. 비침습적 PIV 기법 중, X-ray PIV 기법의 경우, 최근 CO₂ microbubbles을 추적입자로 사용하여 생체 내부에서 X선 감쇄로 인한 효과를 줄이고, 보다 정확하게 유동을 측정할 수 있게 개발되었다⁽²⁾. 그럼에도 불구하고, 혈관 주변의 조직으로 인

한 X선 intensity 감쇄는 speckle contrast를 감소시켜 PIV 측정의 정확도에도 영향을 끼친다. 이에 따라 x-ray PIV 기법을 이용하여 혈관과 주변 조직이 존재하는 상태에서 생쥐 내부 혈액유동을 정확하게 측정하는 것은 신뢰성 있는 진단기법으로 개발하는데 있어서 매우 중요하다. 본 연구에서는 죽은 쥐의 정맥과 동맥을 외부 도관으로 연결하고 정맥으로 혈액과 CO₂ microbubbles을 주입하여 몸체 내부에 혈액 유동을 인위적으로 유발하였다. 그리고 복부 대동맥을 흘러지나는 혈류의 속도장을 측정하고, 주위 조직으로 인한 contrast 감소 효과와 PIV 기법의 측정정확도에 대한 연관성을 연구하였다. 그리고 혈관에 공급하는 유량을 조절하여 본 x-ray PIV 기법으로 측정 가능한 최대 속도범위를 밝힘으로써, 실제 *in vivo* 조건에서 측정가능한 혈류역학적 정보의 범위를 제시하였다.

* 포항공과대학교 기계공학과

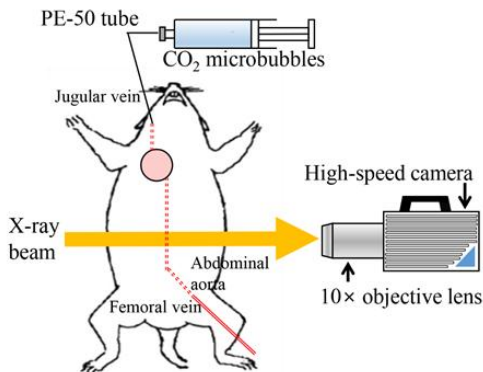


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup with a rat model.

2. 본 론

2.1 실험방법

본 연구는 다양한 X선 발생장치 중 높은 위상대비 영상을 얻을 수 있는 포항 가속기 연구소의 6C Biomedical imaging 빔라인에서 수행하였다. X선 영상은 고속카메라(SA 1.1, Photron)를 이용하여 취득하였다. X선 영상의 질을 높이기 위해 flat field correction, background 제거, spatial frequency filtering 등과 같은 영상처리기법을 사용하였다. Fig. 1은 본 실험에서 사용된 실험장치와 쥐 모델의 도해를 나타낸다. 근육 이완제와 마취제를 12주령 쥐에 주입한 뒤, 쥐의 경정맥에 PE-50튜브를 연결하여 혈액의 응고를 막기 위해 헤파린 나트륨을 주입한다. 항응고제를 주입하고 난 10분 뒤 대퇴동맥에 PE-50튜브를 연결하여 쥐의 혈액을 모두 추출한다. 추출한 쥐의 혈액에 CO₂ microbubbles을 균일하게 섞은 후 이를 경정맥을 통해 다시 주입한다. 주입된 혈액이 쥐의 혈관중 가장 복잡하고 깊은 부분인 복부대동맥을 지날 때 혈액의 속도장을 측정하고, 측정 가능한 최대 속도를 확인하였다.

2.2 실험결과

Fig. 2는 본 실험기법을 통해 획득한 복부대동맥을 흘러지나는 CO₂ microbubbles 영상 및 속도장 분포를 나타낸다. 시린지 펌프로 공급된 유량은 0.3 ml/min 이었으며, 속도장 측정을 통해 관측된 유량은 0.25 ml/min이다. 공급유량과 관측유량의 경우 차이가 있는데, 이는 혈관 network로 인해 공급된 유량이 복부대동맥이외에도 수많은 분지 혈관으로도 흘러 가기

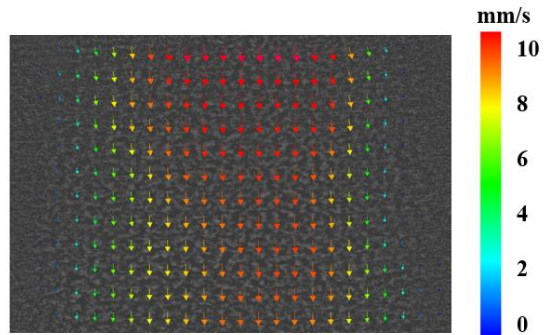


Fig. 2 Typical velocity field obtained in the abdominal aorta.

때문이다. 본 실험에서는 유량을 0.3, 3, 10 ml/min 로 바꾸어 가면서 혈액을 주입하여 속도장을 획득했으며, 10 ml/min일때 관측된 최대속도는 74.64 mm/s이었다.

3. 결 론

본 연구에서는 죽은 쥐의 복부대동맥 내부 속도장 분포를 CO₂ microbubbles과 x-ray PIV기법을 이용하여 획득하였으며, x선영상의 개선 정도와 PIV 정확도를 고려하여, 본 측정기법을 이용하여 관측할 수 있는 혈액의 최대속도는 74.64mm/s 이었다. 본 연구를 통해 위상대비 X선 영상기법에 기반한 X-ray PIV 기법에 CO₂ microbubbles을 함께 적용할 경우, 동물 내부 혈류의 속도장을 측정하는데 유용할 것으로 확인되었다.

후 기

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

참고 문헌

- (1) Malek, A. M., et. al., 1999, "Hemodynamic shear stress and its role in atherosclerosis," *The Journal of the American Medical Association*, pp. 2035-2042,
- (2) Lee, S. J., et. al., 2014, "Usage of CO₂ microbubbles as flow-tracing contrast media in X-ray dynamic imaging of blood flows," *Journal of Synchrotron Radiation*, pp. 492-497.