

초음파 SIV 기법을 이용한 체내 판막 후방의 나선유동 측정

박준홍* · 김정주* · 염은섭** · 이상준*

In vivo measurement of helical valvular flows using ultrasound speckle image velocimetry

Jun Hong Park*, Jeong Ju Kim*, Eunseop Yeom**, Sang Joon Lee*

Abstract : Several experiment techniques have been utilized to analyze the flow characteristics of valvular flows. Conventional methods have technical limitations in acquiring accurate velocity information in the region near the valve. In this study, ultrasound speckle image velocimetry (SIV) technique was employed to investigate helical valvular flows in human. The proposed technique was validated by measuring helical flows in a phantom model and comparing the experimental results with those from CFD and color doppler imaging methods. Thereafter, helical valvular flow behind a venous valve was measured using the ultrasound SIV technique. The rotational direction and magnitude of the valvular flow were reasonably evaluated. Consequently, characteristic features of the helical valvular flow were examined. The measurement of helical flows using the present ultrasound SIV would be helpful for early diagnoses of valve-related cardiovascular diseases.

1. 서 론

정맥 및 심장에 존재하는 판막은 혈액의 역류를 방지하는 역할을 수행하는데, 판막 후방에는 나선유동 및 Dean 유동과 같은 다양한 형태의 유동현상이 나타난다.⁽¹⁾ 대부분의 경우, 판막의 기능이상에 기인한 유동특성들에 의해 판막 관련 질환들이 발생한다. 이에 따라 판막 주위 유동특성을 분석하여 이들 질환을 진단하고 있다. 판막 주위 유동을 가시화하기 위해 여러 가지 방법들이 사용되고 있는데, 사용의 편의성과 비침습적인 측정방식으로 인해 초음파 영상 기법이 널리 사용되고 있다. 기존의 도플러 초음파 기법을 이용하면 판막 후방에 발생하는 유동을 파악할 수 있지만, 기준 방향의 속도 크기만을 얻을 수 있어, 정확한 유동특성을 분석하기 어렵다는 한계점을 갖는다.

본 연구에서는 판막 후방에서 나타나는 나선 유동을 정량적으로 분석하기 위해 초음파에 의해 발생하는 적혈구들의 스펙클 신호를 이용하는 스펙클 영상속도계(SIV) 기법을 활용하였다.⁽²⁾ 본 연구에서 사용된 초음파

SIV 기법을 검증하기 위해 *in vitro* 모델에서 실험을 진행하였으며, 측정된 속도 결과를 CFD simulation 및 도플러 초음파 결과와 비교하여 검증하였다. 그리고 검증된 SIV 기법을 사람의 허벅지 대복재정맥의 판막 후방에 형성된 유동에 적용하여 속도 정보를 얻고 유동특성을 분석하였다.

2. 본 론

2.1. 초음파 SIV 기법 검증

2.1.1. In vitro model 실험

초음파 SIV 기법의 성능을 검증하기 위해 3D 프린터로 나선 유동을 형성시키는 나선형 insert를 제작하고 이를 3% agarose phantom에 장착한 후 SIV 기법으로 실험을 수행하였다. PBS 용액과 전혈을 3가지 다른 유량($Q=15, 20, 25\text{ml/min}$) 조건으로 흘려주면서 나선형 insert로부터 $L=1, 2, 3D$ 만큼 떨어진 횡단면 내부의 속도장을 측정하였다.

2.1.2. 전산수치해석 결과 비교

In vitro 실험에 사용한 3D printing 모델과 phantom

* 포항공과대학교 기계공학과 생체유체연구단

** 부산대학교 기계공학과

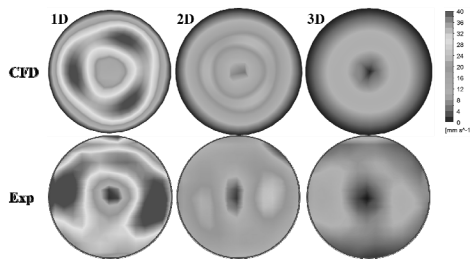


Fig. 26 Comparison of cross-sectional velocity magnitude at different positions behind the helical insert, evaluated by CFD and SIV experiment

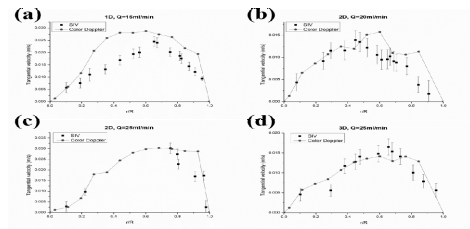


Fig. 27 Variations of circumferential velocity along the normalized radius according to position and flow rate. (a) 1D, 15ml/min (b) 2D, 20ml/min (c) 2D, 25ml/min (d) 3D, 25ml/min.

형상을 이용하여 상용코드인 ANSYS CFX v.17 (ANSYS Inc., USA)를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 유동은 층류로 가정하였으며, 벽면에서 no-slip 조건, 출구 압력값은 대기압으로 하였다.

PBS 용액을 작동유체로 사용한 경우, 위치변화에 따른 속도값 및 속도장 contour가 실험 결과와 잘 일치하였다. (Fig. 1)

2.1.2. 도플러 초음파 결과와의 비교

전혈을 작동유체로 하여 각각의 유량 조건에서 위치변화에 따른 SIV기법과 컬러 도플러 기법으로 각각 취득한 circumferential 속도 크기를 비교한 결과, 속도 profile이 유사한 경향을 보인다는 사실을 확인하였다. (Fig. 2)

2.2. 체내 판막 후류 측정

건강한 20대 남성의 허벅지 안쪽 대복재정맥 판막 주변의 혈류를 B-mode 초음파로 측정하였다. 스펙클 영상은 18MHz Linear probe, SmartUS EXT-1M (Teledyne Medical Systems, Milano, Italy) 로 취득하고 SIV 기법을 적용하여 속도장 정보를 구하였다.

나선유동의 크기를 정량화하기 위하여, 취득한 속도장을 이용하여 시간에 따른 각속도 contour를 나타냈다. 판막과의 거리가 멀어질수록 각속도 값은 감소하고, 같은 값을 나타내는 contour의 크기가 넓어짐을 확인하였다.

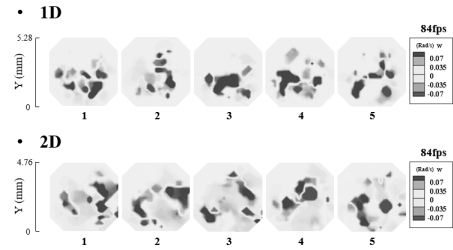


Fig. 28 Spatial distributions of angular velocity at different positions behind the valve

(Fig. 3)

3. 결론

본 연구에서는 수치해석과 도플러 초음파를 이용하여, 초음파 SIV 기법을 사용하여 나선유동을 정확하게 측정할 수 있음을 검증하였다. 검증한 SIV 기법을 체내 판막 후방 유동에 적용하여 판막 후방에 형성되는 나선 유동을 측정하고 판막으로부터의 거리가 멀어질수록 속도가 감소함을 확인하였다. 또한 본 연구를 통해 초음파 SIV 기법이 판막유동을 가시화하는데 유용하다는 것을 확인하였다.

후 기

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

참고 문헌

- (1) Stonebridge, P., et al., 2016, "Spiral Laminar Flow: a Survey of a Three-Dimensional Arterial Flow Pattern in a Group of Volunteers.", Eur J Vasc Endovasc Surg, pp. 674~680.
- (2) Nam, K. H., et al., 2012, "Velocity field measurements of valvular blood flow in a human superficial vein using high-frequency ultrasound speckle image velocimetry", Int J Cardiovasc Imaging, pp. 67~77.