

열림판이 지지대에 고정되지 않은 폴리우레탄 인공판막 하류의 유동장 측정

김중경*, 성재용#, 장준근†, 민병구°, 유정열§
 *서울대 대학원 협동과정 의용생체공학전공, #대학원 기계공학과,
 †정밀기계설계공동연구소, °의대 의공학교실, §기계공학과

Measurement of Flow Field Downstream of Polyurethane Artificial Heart Valve with Floating Valve Leaflet

J. K. Kim*, J. Sung#, J. K. Chang†, B. G. Min° and J. Y. Yoo§

*Interdisciplinary Program in Medical and Biological Engineering Major, Graduate School,
 #Department of Mechanical Engineering, Graduate School, †Institute of Advanced Machinery
 and Design, °Department of Biomedical Engineering, College of Medicine,
 §Department of Mechanical Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

The effect of unattached valve leaflet on flow field downstream of a floating and flapping polyurethane heart valve prosthesis was investigated. With a triggering system and a time-delay circuit the instantaneous velocity field downstream of the valve was measured by particle image velocimetry (PIV) in conjunction with the opening posture of a flexible valve leaflet during a cardiac cycle. Reynolds shear stress distribution was calculated from the velocity fields and wall shear stress was directly measured by hot-film anemometry (HFA). The floating motion of the valve leaflet resulted in the reduction of pressure drop and recirculating flow region downstream of the valve.

서론

기계식 판막과 조직 판막이 가지고 있는 여러 문제점을 해결하기 위하여 고분자 재료를 사용한 고분자 판막의 개발이 진행되어왔다. 고분자 판막은 일반적으로 누수량이 적고, 유연한 재질을 사용하므로 cavitation이 발생하지 않으며, 표면처리가 가능하므로 항혈전성 및 항감염성을 향상시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 현재 상품화 되어 있는 기계식 판막에 비하여 쉽고 저렴하게 제작할 수 있다는 특징이 있다. 반면에 고분자 판막의 내구성은 금속이나 세라믹 재질을 이용한 기계식 판막에 비하여 떨어지므로, 기능이 저하된 인체내의 자연 판막을 치환하려는 목적보다는 인공심장 또는 좌심실보조장치에 비교적 단기간동안 안전하게 사용될 수 있도록 하여 인공장기의 제작비용을 낮추려는 목적으로 개발되고 있는 추세이다. 서울대학 병원의 의공학과에서 개발한 폴리우레탄 판막은 열림판이 지지대에 고정되어 있지 않아서 수축기의 초기에 유동의 진행방향에 따라 병진운동을 한 뒤에 접히게 되는 특징을 가지고 있는데, 이는 판막 중

양부의 혈전 생성을 방지하기 위해서 고안된 디자인이다. 그동안 폴리우레탄 판막의 성능평가에 대한 연구들을 살펴보면, 다른 판막에 비해서 누수량은 적으나 상대적으로 큰 압력강하가 발생함을 알 수 있다 [1, 2, 3]. 한편, 이러한 결과들은 정상유동 조건에서 측정된 것이므로 부유하는 열림판이 판막의 성능에 미치는 영향을 알아볼 수 없었다. Suh 등은 수축기가 시작될 때 발생하는 열림판의 병진운동이 열림면적을 증가시켜 결과적으로 유동에 대한 저항을 감소시키고 혈전생성을 방지하는 역할을 한다고 보고하였다 [4]. 본 연구에서는 유동가시화를 통한 속도 측정기법인 PIV와 이의 단점을 보완할 수 있는 HFA를 사용하여 맥동유동 조건에서 폴리우레탄 판막 하류의 유동장의 구조를 한 주기 동안 측정하고 이로부터 고정되지 않은 열림판이 유동장에 미치는 영향을 분석하였다.

실험 방법

생체를 모사한 모의 순환 장치를 Fig. 1과 같이 구성하였다. 맥동성 유동을 발생시키기 위하여 시험부 상류에 전기유압식 좌심실 보조장치(Biomedlab Co., Hemopulsa)를 설치하였다. 분당 박동수는 70, 수축기는 300 ms, 평균 대동맥압은 100 mmHg로 설정하였고, 시험유체로는 36% 글리세린 수용액을 사용하였다. 판막 열림판의 주기적인 여닫힘 동작을 파이프의 축에 대하여 수직으로 설치된 CCD 카메라로 관찰하였다. 판막으로부터 0.36D에서부터 1.25D까지의 측정단면을 카메라로 촬영하여 2장의 연속적인 입자 영상을 획득한 뒤, 상호상관법으로 구한 입자의 변위와 영상 사이의 시간 간격으로부터 축방향과 반경방향의 2차원 속도 벡터를 계산하였다. 한 주기의 임의의 순간에 영상을 획득하기 위하여 좌심실 보조장치의 제어기로부터 수축기의 시작시에 나오는 trigger 신호와 시간 지연 회로를 이용하였다. 본 실험에서는 20 ms의 시간 간격으로 한 주기를 분할하고 100주기 동안 앙상블 평균한 속도장을 얻었다. 그리고 판막으로부터 충분히 떨어진 지점에서 위와 같은 방법

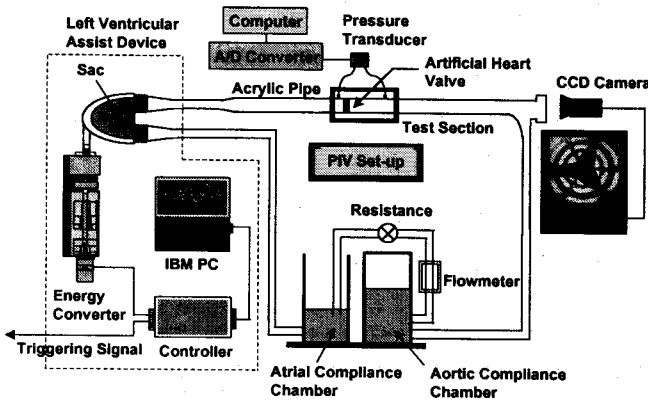


Fig. 1 Mock circulatory system for the PIV measurement of pulsatile flow through heart valve prosthesis

으로 평균속도장을 얻은 후, 단면속도를 적분하여 유량을 계산하였다. 순간속도장과 평균속도장에서부터 레이놀즈 전단응력을 구하였다. 벽 전단응력을 측정하는 데에 사용되는 hot-film 센서의 보정 작업은 완전히 발달된 난류 정상 유동 조건에서 실시하였으며, 벽 전단응력은 A/D 변환기(Keithley Instruments, DAS 1602)를 사용하여 1 kHz로 샘플링해서 얻은 값을 500주기동안 앙상블 평균하여 구했다.

결과 및 고찰

열림판이 고정되지 않은 판막에 대하여 PIV로 구한 속도장의 단면속도를 적분하여 구한 한 주기 동안의 유량곡선과 판막으로 인한 압력 강하를 Fig. 2에 나타내었다. 판막이 완전히 닫힌 후에 판막과 지지대의 틈 사이로 누수되는 유량은 극히 적음을 알 수 있다. 수축기 동안의 평균 압력 강하는 16.7 mmHg였다. 20 ms 간격으로 획득한 판막 하류의 속도장을 분석한 결과 시간에 따라 매우 복잡하게 변화하는 난류 유동장이 형성된다는 것을 알 수 있었다. 열림판이 고정되지 않은 경우에는 수축기에서 유동이 최대에 가속되는 시점인 $t = 140$ ms 이후에 유량이 급격히 증가함에 따라 열림판이 접히기 시작하면서 $t = 180$ ms일 때의 속도 벡터장에서는 열림판을 지나는 유동이 박리되면서 와류가 형성되는 현상을 볼 수 있었다. 유량이 최대가 되는 $t = 200$ ms에서는 열림판의 열림 면적이 가장 큰 값을 가지게 되며, 시계방향과 시계반대방향으로 회전하는 2개의 와류가 중심축을 기준으로 양쪽에 뚜렷하게 형성되었다. 유속은 열림면적이 보다 큰 좌측벽 쪽에서 최대 1.8 m/s까지 도달하게 되며, 와류와 체트류의 경계 지역에서 속도구배가 크게 나타나게 되는 것을 알 수 있었다. 이 때의 속도분포와 레이놀즈 전단응력 분포를 Fig. 3에 나타내었다. 최대 레이놀즈 전단응력은 700 dynes/cm²까지 도달하였다. 한편, 열림판이 고정된 판막의 경우에는 보다 일찍 유동의 박리현상이 일어나게 되며 재순환영역이 넓게 형성되는 것을 관찰할 수 있었다.

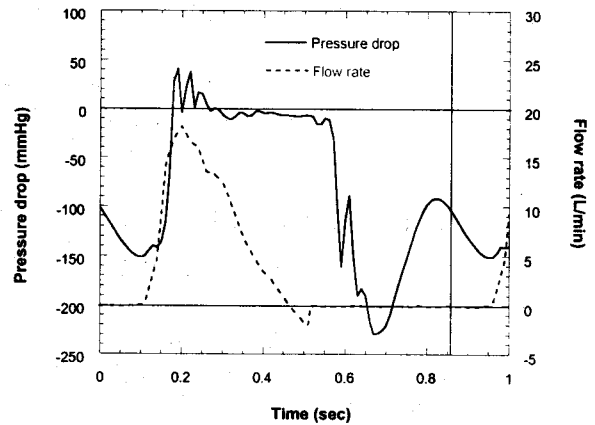


Fig. 2 Pressure drop and flowrate curve of the valve for a cardiac cycle

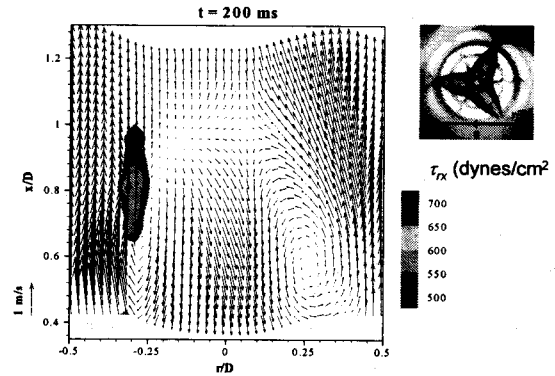


Fig. 3 Regions of high Reynolds shear stress overlaid on velocity vector field and corresponding opening posture of the valve leaflet at the peak systolic phase

결론

본 연구를 통하여 폴리우레탄 인공판막의 고정되지 않은 열림판이 열림 면적을 증가시켜 결과적으로 유동에 대한 저항을 감소시키고 판막 하류의 재순환영역을 감소시킨다는 것을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. B. C. Pak, B. S. Cho, B. J. Baek, C. S. Kim and B. G. Min, "In vitro hydrodynamic evaluation of prosthetic polymer heart valves in steady flow", Vol. 7, No. 3, pp. 223-230, 1993.
2. 김준우, 박복춘, 백병준, 민병구, "정상유동에서 유동형 단엽폴리머 인공판막의 수력학적 성능평가", 의공학회지, 17권, 1호, 49-59, 1996.
3. 김혁필, 이계한, "삼엽식 인공판막의 수력학적 성능평가에 관한 연구", 의공학회지, 18권, 2호, 147-155, 1997.
4. S. W. Suh, W. G. Kim, H. C. Kim and B. G. Min, "A new polymer valve for mechanical circulatory support systems", Int J Artif Organs, Vol. 19, No. 12, pp. 712-718, 1996.