

부유식 폴리머 인공심장 밸브의 축대칭 혈류 해석

성현찬* · 정기석* · 김경훈** · 고희중** · 박찬영*** · 민병구*** · 심은보**

Axisymmetric analysis of blood flow for a floating type polymer artificial heart valve

H. C. Seong*, K. S. Jung*, K. H. Kim**, H. J. Ko**, C. Y. Park***, B. G. Min***, E. B. Shim**

Keywords : floating type polymer artificial heart valve(부유식 폴리머 인공심장 밸브), thrombus(혈전), hemolysis(용혈), shear stress(전단 응력), blood flow(혈류)

Abstract

The two major problems related to the blood flow in a floating type polymer valve are thrombus formation and hemolysis. It is well known that the shear stress in the fluid and flow separation around the valve are blamed for such disastrous phenomena. In this viewpoint, through study of the flow field around the valve is imperative to improve design of the valve. The aim of this study is to investigate the fluid flow around a floating type polymer valve. The numerical method employed in this study is the finite element software called ADINA. Incompressible viscous flow is assumed for blood using the assumption of Newtonian fluid. In this study, two prominent features of the axisymmetric flow around the floating type polymer valve are observed: jet-like flows observed near the gap between the conduit and the valve, and recirculating flow downstream of the valve. We also provided a detailed description of shear stress field according to the variation of flow conditions. The shear stress in fluid has its maximum value near the gap between the valve and the conduit.

1. 서 론

인공판막은 기계적인 재료를 사용한 기계식 인공판막과 동물의 생체조직을 사용한 생체 인공판막으로 나눌 수 있다. 일반적으로 기계식 인공판막은 매우 고가이며 이음새 부분의 혈전문제와 기계식 고유의 혈전 생성의 문제점을 가지고 있다. 반면에 생체 인공심장 판막은 기계식 판막에 비해 수력학적인 효율이 뛰어나다고 알려져 있으며 혈전 생성 가능성이 낮으나 칼슘화 현상등에 의한 조직 와해로 내구성에 단점을 가지고 있다. 폴리머 판막은 이들 두 가지 인공판막의 장단점을 보완하여 만들어졌으나 이 또한 재료 자체의 문제점과 설계상의 난점으로 인하여 기존의 판막에 비해서 월등한 성능을 보이지는 못하고 있다. 특히 인공심장이나 심실보조장치, 심폐보조기 등의 인공장기를 이용하여 시술할 경우 비교적 짧은 시간 동안 인공판막을 사용하게 되는데, 이 경우 경제성이나 혈전 생성의 문제점들이 끊임없이 제기되어 왔다.

따라서 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 서울대 의

공학과 인공심장 개발팀에서는 인공판막을 직접 제작하려는 시도가 있었으며 현재 혈액펌프에 이용될 수 있는 부유식 폴리머 밸브를 개발하였다[1]. 인공판막은 그 작동특성상 유동장에서 운동하는 것이며 특히 혈액과 접촉하는 환경에 놓여져 있다. 따라서 단순한 밸브가 아니라 유체역학적으로 자연판막과 유사한 기능을 가지도록 설계되어야 한다. 이를 위해서는 인공판막 주위에서의 유동장 해석이 절실히 요구된다.

본 연구에서는 서울대 의공학과에서 설계한 부유식 폴리머 인공밸브 주위의 축대칭 혈액 유동 현상과 전단응력 분포 등을 조사함과 동시에 그 수력학적 성능을 평가할 수 있는 유동변수들에 대한 데이터를 제공하는 것을 주된 목적으로 하고 있다.

2. 수치해석과 경계조건

폴리머 밸브에서의 혈액의 유동은 좌심실에서의 수축기(systole)과 이완기(diastole)동안 좌심실, 대동맥의 압력 및 밸브의 개폐여부에 의하여 결정된다. 이 경우 이 혈액 유동을 해석하기 위해서는 변형하는 구조체(고체)인 밸브와 유체인 혈액의 상호작용에 대한 고려가 불가피하다. 본 연구에서는 이를 해석하기 위하여 유체-고체 상호 작용 해석에 강점이 있는 유한요소 패키지인 ADINA 코드를

* 금오공과대학교 대학원, hcsung, arysu94 @kumoh.ac.kr

** 금오공과대학교 기계공학부, khkim,kohj@kumoh.ac.kr
simeb@kumoh.ac.kr

*** 서울대학교 의공학과 cypark@snu.ac.kr

bgmin@plaza.snu.ac.kr

사용하였다[2]. 밸브의 입구에서의 조건은 시간에 따라 사인과 형태의 유량조건을 사용하였으며, 한 주기를 0.3 초로 가정하였다. 혈관내의 혈액의 유동은 시간에 따라 유동장의 경계가 변하므로 ALE 방법(Arbitrary Lagrangian Eulerian method)이 사용되었으며, 고체와 유체의 경계 면에서는 속도 연속조건과 힘-평형조건이 만족될 때까지 반복적으로 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 부유식 폴리머 밸브에 대한 유선을 시간에 따라 도시한 것이다. 그림에서와 같이 밸브가 최대로 열리기 전까지는 비교적 약한 circulation이 형성된 후 밸브가 최대로 열릴 때와 원래의 위치대로 복원되는 기간에는 밸브 하류 쪽에서 강한 2차 유동이 발생함을 알 수 있다. 이러한 2차 유동의 발생은 혈액의 유동을 방해하게 되며 결국 혈전 생성의 원인을 제공하게 된다.

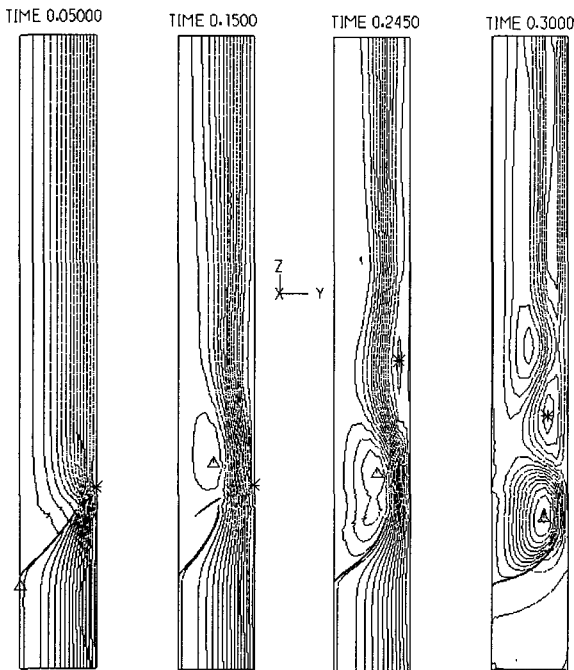


Fig. 1 Contour of streamline for polymer valve

Fig. 2는 $y=5\text{mm}$ 로 일정한 선에서의 전단응력 분포를 시간에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 밸브 주위와 후류 쪽에서 높은 전단응력이 작용함을 알 수 있다. 특히 밸브가 원래 상태로 복원될 때($t=0.24\text{s}$)의 후류 쪽 전단응력이 밸브가 개방될 때의 전단응력보다 큰 값을 가진다. 이는 밸브 주위와 후류 쪽에서의 2차 유동에 기인한 것으로 사료된다.

Fig. 3은 입구 유량조건에 따라 밸브를 고정하였을 때와 부유식에 대하여 최대 전단 응력의 변화를 나타내었으며, 그림에서 보여주는 것과 같이 초기에 밸브가 floating 될 때와 밸브가 최대로 열리는 부근에서 두 모델 간의 최대

응력이 차이가 크다는 것을 관찰할 수 있으며 밸브가 닫힐 때 나타나는 응력 증가 현상은 Fig. 1에서와 같이 밸브의 오목한 부분과 후류에서 유동의 강한 circulation에 기인한 것으로 사료된다.

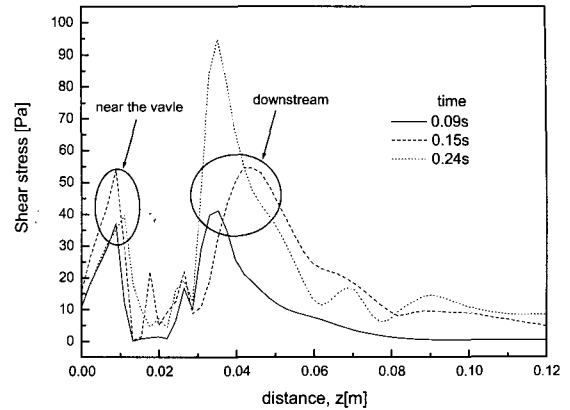


Fig. 2 Profile of shear stress

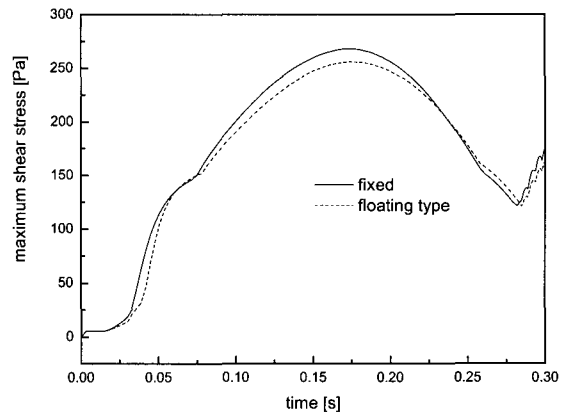


Fig. 3 History of maximum shear stress

4. 결론

부유식 폴리머 인공심장 밸브의 축대칭 혈액 유동을 수치적으로 해석한 결과 밸브는 최대 변형 후 원 상태로 복원될 때 밸브의 후류 쪽에 2차 유동의 발생으로 말미암아 큰 전단력이 발생하였으며 이러한 전단응력은 용혈의 원인이 되며 또한 2차 유동은 혈액의 유동을 방해하여 결국 혈전 생성을 일으키는 요인으로 작용함을 예측할 수 있었다.

참고문헌

- [1] S.W. Suh, W.G. Kim, B.C. Kim, B.G. Min, 1996, "A new polymer valve for the mechanical circulatory support systems," *Int. J. of Artificial Organs*, Vol. 19, pp. 712-8.
- [2] K.J. Bathe, H. Zhang, M.H. Wang, 1995, "Finite Element Analysis of Incompressible and Compressible Fluid Flows with Free Surfaces and Structural Interactions," *Computers and Structures*, Vol 56, No. 2/3, pp. 193-213.