

# 기계식 인공심장판막의 경량화 설계를 위한 구조해석

권영주\*(홍익대 기계정보공학과)

## Structural Analysis for Thickness Minimization Design of a Bileaflet Mechanical Heart Valve

Y. J. Kwon (Dept. of Mechano-Informatics & Design Engineering, Hongik University)

### ABSTRACT

This paper investigates the structural analysis and design of mechanical heart valve through the numerical analysis methodology. In a numerical analysis methodology application to the thickness minimization structural design of mechanical heart valve, structural analysis is performed for the blood flow through a bileaflet mechanical heart valve. The structural static analysis is carried out to confirm the thickness minimization structural condition (minimum thickness shape of leaflet).

**Key Words** : MHV(Mechanical Heart Valve)(기계식인공심장판막), Numerical Analysis(수치해석), Blood Flow(혈액유동), Structural Analysis(구조해석), Minimum Thickness Design(두께최소화설계)

### 1. 서론

심장에는 항상 일정한 방향으로 혈액을 흐르게 하는 4개의 판막이 있다. 그러한 심장판막이 여러 가지 이유로 인하여 그 고유기능을 발휘할 수 없게 되어 생명을 위협하게 될 때 심장판막 치환 시술시 심장판막 대응으로 그 기능을 대행하기 위하여 사용되는 요소가 바로 인공심장판막(Artificial Heart Valve)이다.

인공심장판막은 사용된 재질에 따라 생체 조직을 전체 또는 부분적으로 사용하는 조직판막(Tissue Heart Valve), 고분자 재료를 사용하는 고분자판막(Polymer Heart Valve), 그리고 금속이나 세라믹을 사용하는 기계식판막(Mechanical Heart Valve)으로 나뉘어진다 그러나 조직판막과 고분자판막은 내구성이 좋지 못하고 혈전의 생성 등의 문제점이 있어 장기간 내장용이나 심실 보조기에 주로 사용되고, 장기 내장용으로는 내구성이 뛰어난 기계식판막이 널리 사용되고 있다

기계식판막은 내구성 및 신뢰성이 우수하며, 작은 압력강하에 대한 수력학적 성능 및 품질이 우수하여 장기간 내장용으로 가장 많이 사용되고 있다. 그러나 혈전의 형성<sup>1),2)</sup>을 방지하기 위한 항응고제의 지속적 복용, 지지대와 개폐판 사이의 역류로 인한 역류량의 증가와 혈류 제트의 형성과 이에 따

른 용혈현상, 강체의 개폐에 따른 수격효괴, 소음 등이 문제로 지적되고 있다. 그럼에도 불구하고 현재 천연 판막의 장기간 내장 치환용으로 가장 널리 사용되는 것이 기계식판막이다.

본 연구에서는 비록 혈전색전증과 출혈문제가 있지만은 내구성이 뛰어나 장기간 치환용으로 널리 사용되고 있는 St. Jude Medical 기계식 대동맥 판막<sup>3)</sup>(Fig. 1-3)에 대하여 뛰어난 내구성을 유지하면서 판막의 원활한 운동에 매우 필요한 판막의 경량화 구조설계를 위하여 다양한 공학적 현상에 대한 상호연관 관계를 고려하여 구조해석을 수행하였다.



Fig.1 Model of mechanical heart valve (St Jude Medical)

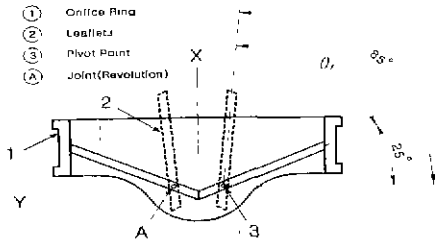


Fig 2 Kinematic diagram of Mechanical Heart Valve

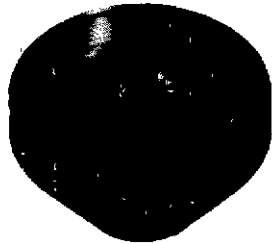


Fig 3 Solid model of mechanical heart valve (open angle  $\theta = 25^\circ$ )

## 2. 기계식 심장판막의 구조역학(Structural Mechanics)해석

기계식 심장판막의 구조적인 변형에 대한 구조역학 해석을 수행하기 위해서는 가장 큰 변형이 예상되는 판막의 운동위치와 그 위치에서의 판막에 작용하는 동적인 힘에 대한 설계 변수를 알아야 한다. 본 연구에서는 판막이 닫히는 순간위치에서 판침(leaflet)의 두께에 따른 구조해석을 수행하여 기계적 내구성을 유지하면서 보다 경량화된 판막을 도출해 내고자 한다. 본 연구에서는 유한요소법에 의한 기계식 심장판막의 구조변형 문제의 해석을 위하여 범용 유한요소 수치해석 프로그램인 NISA를 이용하여 해석을 수행하였다.

### 2.1 해석모델 및 경계조건

기계식 심장판막의 구조역학 해석을 위한 유한요소 모델은 Fig. 4(a)와 같다. 8개의 절점(node)을 가지는 육면체(hexahedral) 요소로 이루어져 있다. 유한요소 해석시 총유한요소의 개수가 증가한 조밀한 유한요소모델이 좀더 정밀한 해석결과를 줄 것이 예상되므로 두께방향으로 8줄의 유한요소를 사용한 모델로 계산을 수행하였다.

판침(leaflets)의 두께 변화에 따른 판막의 경량화 설계시 판륜(orifice ring)은 직접적인 연관이 없으므로 해석에서 제외하였다. 판막이 닫히는 순간 위치에서 판침의 회전 지지부인 hinge 부분(판륜과 접촉하는 한 개의 접점)과 판침과 판륜이 만나는

판침의 끝면은 순간적으로 강제인 판륜과 접촉되어 있으므로 모든 자유도를 구속( $U_x = U_y = U_z = 0$ )하여 해석을 수행하였다. 또한 대칭면인  $y=0$ 인 면에서 양쪽 두 개의 판침이 접촉하므로 이 대칭면에서는 대칭경계조건( $U_y = 0$ )이 만족되어야 한다. 또 판침에 작용하는 외력인 유체력은 판침 상부면 전체에 수직으로 균일한 압력으로 작용 시켰다.(Fig. 4(b) 참조) 판침을 구성하는 물질은 Si-Alloyed PyC으로 가정하였다. 따라서, 해석에 사용된 유한요소 모델의 크기와 물성치는 Table 1과 같다

### 2.2 구조역학 해석 및 결과분석

해석결과로 얻어진 기계식 심장판막에 대한 구조적인 변형과 응력 분포 상태를 Fig. 5, 6에 나타내었다. 변형된 형상을 보았을 때 판막의 중앙부에서 약간 하단부에 큰 변위가 발생함을 알 수 있으며, hinge 부분보다 대칭면 중앙 상단부분에 응력이 가장 크게 발생함을 알 수 있었다. 그러나, 역시 힌지 부분과 판침의 끝단면 하단부분에도 많은 응력이 발생함을 알 수 있다. 판침의 두께 변화에 따른 판침 중앙에서 약간 하단부분에 발생하는 최대 변위의 크기와 대칭면 중앙 상단부분에서 발생하는 최대 응력의 크기를 Table 2 및 Fig. 7에 비교하여 나타내었다. 표 및 그림에 나타난 나와 같이 두께 변화에 따른 최대 응력의 크기를 비교하였을 때 재료가 가지는 항복응력(yield stress) 407.7MPa 보다는 작은 값들을 가지므로(안전율을 고려하여도) 안전하나, 판침의 두께가 얇아질수록 발생하는 변위와 내부응력값은 커짐을 알 수 있다. 따라서 판침의 두께가 얇아 질수록 판막의 구조적 강도는 작아짐을 알 수 있다. 판막의 내구성을 결정하는 판막 구조의 기계적 강도는 항복응력과 비교로도 판단할 수 있으나 응력과 변형도의 관계가 선형임을 잃거나 탄성률이 감소할 때도 위험하다고 볼 수 있다. 기타 좌굴현상이 발생한 경우도 구조적으로 취약하다고 볼 수 있으나 본 논문에서 취급하는 판막구조는 해석 결과를 분석했을 때 작용하는 유체력에 대하여 좌굴현상은 절대 발생하지 않는다고 볼 수 있다. 왜냐하면 판침에 작용하는 외력인 유체력이 판침의 상부면에 수직방향으로만 작용하지 판침의 외곽면에 수직방향으로는 작용하지 않기 때문이다. 대부분의 좌굴현상은 이와같이 단면에 수직방향으로 작용하는 하중에 의하여 발생한다. 따라서 본 해석에서 어느정도의 판침두께까지가 판막의 내구성을 결정하는 강도를 유지하느냐를 결정하기 위해서는 판침의 두께가 얇아졌을 때 판막내부에 발생하는 응력과 변형도의 선형성 및 탄성률의 변화를 체크 해보는 것이 유일한 방법이다. 분명히 판침에 대변형이 발생했을 경우라도 판침에 파단이 발생하지 않으면 판막은 안전하다. 그러나 수십, 수백억번 반복운동을 할 때마다 똑같은 대변형이 반복적으로 발생한다고 했을 때에는 판침의 두께를 조절하여 유체력이 작용시 판침에 대변형이 발생함을 미리 방지하는 것이 판막의 내구성을 유지하는데 있어서

는 매우 중요하다. 따라서 판침의 두께가 얇아짐에 따라 판막내부에 발생하는 응력과 변형도의 선형성 및 탄성률의 변화를 체크하기 위하여 Table 2 및 Fig. 7의 해석결과로부터 각 두께별로 Fig. 8의 응력 대 변형도(최대변형값)의 관계를 구하였다. 그림 (Fig. 8)에서 보는 바와 같이 두께가 어느 정도(0.5 mm, 0.55mm, 0.6mm) 얇아지면 예상대로 선형성을 잃어버리고 탄성률이 감소함을 알 수 있다. 따라서 본 연구 결과로 분석해 볼 때 본 연구에서 분석한 판침의 두께들 중 크기가 0.65 mm 두께까지는 구조적으로 판막의 내구성이 유지된다고 볼 수 있다는 결론을 얻을 수 있다.

Table 1 F.E. model data for Mechanical Heart Valve

Parameters		Data	Units
No of Nodes		71,469	None
No of Element		62,400	None
Material Properties	E	30.5E09	N/m <sup>2</sup>
	$\nu$	0.3	None
	$\rho$	2,116	Kg/m <sup>3</sup>

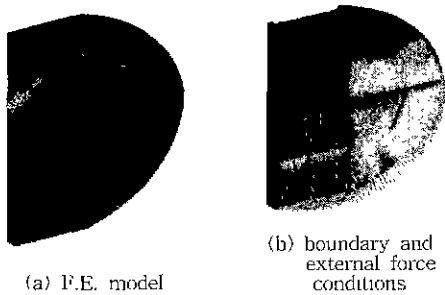


Fig. 4 F.E. model and constraint conditions for Mechanical Heart Valve(SJMV) (thickness = 0.65 mm)

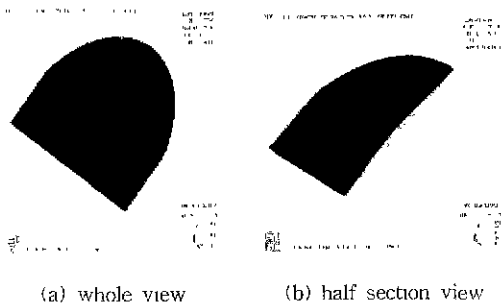
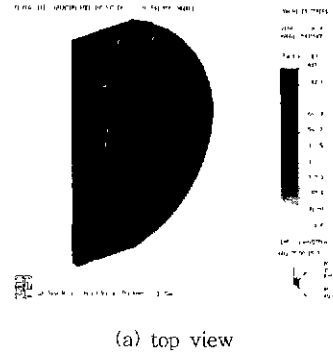
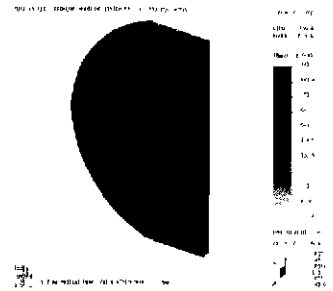


Fig. 5 Deformed shape of Mechanical Heart Valve(thickness = 0.65 mm)



(a) top view

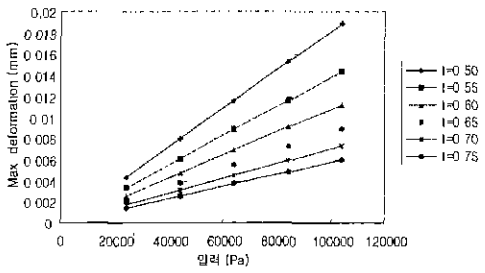


(b) bottom view

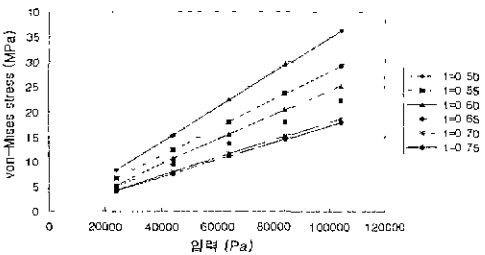
Fig. 6 Stress distribution of Mechanical Heart Valve(thickness = 0.65 mm)

Table 2 Structural analysis results for various external fluid pressures and thicknesses

두께(mm)		압력(KPa)				
		24.05	44.05	64.05	84.05	104.05
0.5	Max. def (mm)	0.00477	0.00801	0.0116	0.0153	0.0189
	von-Mises Stress (MPa)	8.395	15.36	22.33	29.30	36.28
0.55	Max def (mm)	0.00332	0.00809	0.00885	0.0116	0.0144
	von-Mises Stress (MPa)	6.761	12.38	18.00	23.62	29.25
0.6	Max def (mm)	0.00259	0.00475	0.00691	0.00907	0.0112
	von-Mises Stress (MPa)	5.826	10.67	15.52	20.36	25.21
0.65	Max def (mm)	0.00207	0.00379	0.00551	0.00724	0.00896
	von-Mises Stress (MPa)	5.149	9.431	13.71	17.99	22.28
0.7	Max def (mm)	0.00168	0.00308	0.00448	0.00588	0.00728
	von-Mises Stress (MPa)	4.321	7.915	11.51	15.1	18.7
0.75	Max def. (mm)	0.00139	0.00255	0.0037	0.00486	0.00601
	von-Mises Stress (MPa)	4.157	7.615	11.07	14.53	17.99



(a) maximum deflection versus pressure



(b) maximum von-Mises stress versus pressure

Fig. 7 Structural analysis results for various leaflet thicknesses (t=thickness)

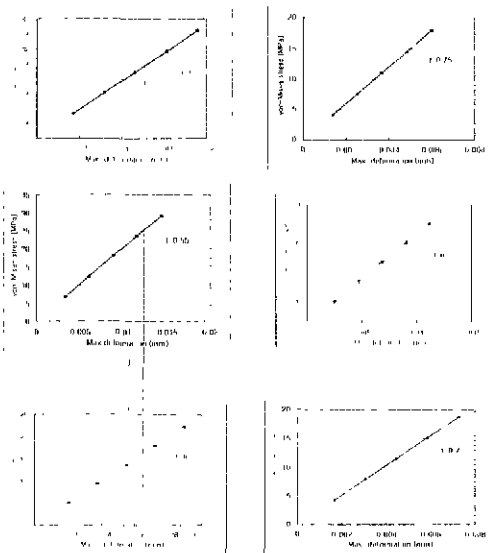


Fig. 8 Maximum von-Mises stress versus maximum deflection curves for various leaflet thicknesses (t=thickness)

### 3. 결론

본 연구에서는 기계식 심장판막의 구조해석 및

최적설계 문제와 같이 많은 설계 변수와 구속 조건을 수반하는 여러 분야의 공학적 해석 및 설계상의 문제에 수치해석기법을 적용하여 구조해석을 수행하였다.

기계식 심장 판막의 경량화 설계를 목적으로 판침(leaflet)의 두께를 결정하기 위해서 판막에서 구조적으로 큰 변형이 예상되는 위치인 판막이 닫히는 위치에서의 판막구조 형상에 대하여 구조역학해석을 수행하였다. 해석결과 판침의 두께가 0.65 mm 이내에서는 동일한 외력 조건하에서 물질의 선형성을 잃어버리며 탄성률이 감소하는 특성을 나타내므로 판침의 두께가 0.65mm까지의 판막은 구조적으로 안전하다고 볼 수 있다. 따라서, 본 연구의 결과에 의하면 판침의 두께가 0.65 mm까지의 판막을 설계하는 것은 판막의 내구성 측면에서 큰 문제가 없다는 결론을 얻을 수 있다.

### 참고문헌

1. A.P. Yoganathan, W.H. Corcoran, E.C. Harrison and J.R. Car, "The Björk-Shiley aortic prosthesis : Flow characteristics, thrombus formation and tissue overgrowth", *Circulation*, Vol. 58, pp. 70-76, 1978.
2. G.M. Pantalos, S.D. Everett, S.F. Mohammad, G.L. Burns, K.A. Solen, L.O. Reynolds and D.B. Olsen, "Quantification of perivalvular thrombus formation in blood pumps by coordinate mapping", *Artificial Organs*, Vol. 14(5), pp. 348-354, 1990.
3. Physician's Manual St. Jude Medical Pyrolytic Carbon Heart Valve, St. Jude Medical, Inc., 1988.