

스퀴즈 필름 효과를 고려한 인공심장밸브의 닫힘시 동적거동해석

천길정, 김경우*
(원광대학교 공과대학 기계공학과), (원광대학교 대학원)

(Dynamic Behavior Analysis of the Heart Valve Prosthesis
Considering Squeeze Film Effect During Closing Phase)

(Gill-Jeong Cheon, Kyong-Woo Kim*)
(Won-Kwang University, Dept. of Mechanical Eng.: Graduate School)

1. 서론

심장밸브의 재반 거동 특성은 밸브의 성능과 밀접한 관련을 가진다. 특히 밸브의 내구 수명에 영향을 미칠것으로 예상되는 밸브판과 정지핀의 충격적 접촉은 밸브의 피로파괴를 유발하여 착용자의 생명을 순간적으로 앓아 갈 수 있다. 또한 용열 및 열전 현상은 재질적 특성에 열효과와 밸브판의 상대속도에 의해서도 영향을 받으므로 이들에 대한 해석이 중요한 과제이다. 그러나 지금까지의 대부분의 연구는 밸브판이 완전히 열려 있거나 닫혀 있을 때의 정적인 상태에서의 밸브판 주위의 유동 특성을 해석 및 측정하는 것이었고, 밸브판이 열리고 닫히는 동안의 동적인 상태에서의 거동에 대한 해석은 거의 없는 실정이다^(1,2,3,7). 특히 밸브판과 정지핀에 작용하는 충격력은 밸브판이 열릴때 보다도 닫힐때 더 큰 값을 가질 것으로 예상되는데, 이에 대한 실험은 측정이 어려울 뿐만 아니라 현재까지 해석이 전혀 시도 되지 않았다. 따라서 본 논문에서는 밸브판이 닫히기 시작하여 정지핀에 부딪힌후 완전히 닫힐때 까지의 과도거동에 대하여 스퀴즈 필름 효과를 고려하여 해석을 시도하여 밸브판의 시간에 따른 위치, 속도, 역류량 및 밸브판과 정지핀 사이의 충격력 등을 계산하고자 한다. 해석 모델로는 29mm Bjork-Shiley 밸브를 선정 하였다.

2. 본론

2.1 모델링 및 운동방정식

밸브판 주위의 유체 유동과 밸브판의 거동은 상호간에 영향을 미치면서 시간에 따라 변화 한다. 밸브판 주위의 유동을 해석하기 위해 Fig.1에 보인바와 같이 점선으로 표시되는 제어체적을 고려한다. 계산을 쉽게하기 위해 유동은 진행방향으로의 1차원 층류 유동만 고려하고, 유체는 비점성이라고 가정한다. 밸브판의 투영 면적을 쉽게 계산하기 위해 밸브판과 오리피스와의 형상을 사각형으로 이상화 한다. 심실 팽창 초기에 심실로 역류되는 유량은 밸브판의 선단 'A'점을 기준으로 'AC'면과 'AD'면을 통과하는 유량으로 나뉘며, 이중 'AD'면을 통과 하는 유량을 고려한다. 유동이 진행할수록 단면적이 변화하기 때문에 그에따라 속도와 압력이 변화하나, 이때 각 단면적에서의 속도와 압력은 균일한 것으로 이상화 한다. 제어체적의 경계면이 움직이면서 그 형상도 시간에 따라 변화하므로 비정상(unsteady) 조건을 고려한다. 입구단면 'i'에서의 유입속도를 U_i 라 할때 임의 단면 'm'에서의 속도는 비정상 연속 방정식에 의해 다음과 같이 표시된다.

$$A_i(U_i - U_m) - A_m(U_m - U_r) = dV_i/dt \quad (1)$$

$$U_m = (d-a)\omega(\cos\theta) \quad (2)$$

$$U_r = (d-a-s)\omega(\cos\theta) \quad (3)$$

$$A_i = Wl_i, \quad A_m = Wl_m \quad (4)$$

$$V_i = (l_i + l_m)Ws(\sin\theta)/2 \quad (5)$$

여기에서 A_i , A_m , U_i , U_m 및 l_i , l_m 은 각각 'i'단면 및 'm'단면에서의 단면적, 속도 및 폭을 나타낸다. ω 는 밸브판의 각 속도이고 U_m 및 U_r 는 'A'점 및 'F'점에서의 밸브판의 유동

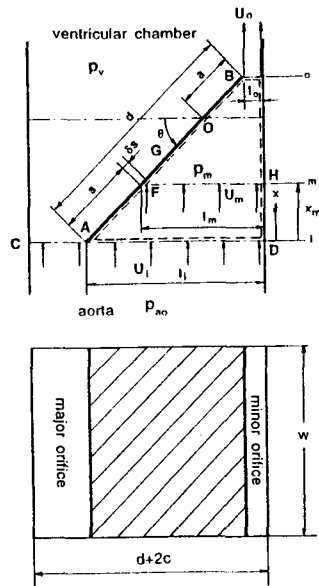


Fig. 1 Schematic diagram showing the control volume and the top view of the occluder

방향 속도 성분이다. V_i 는 단면 'i' 및 'm'사이에서 포함된 유체의 체적이며 s 는 선단 'A'에서 부터 'F'점 까지의 직선거리이다. 단면 'i', 'm'사이의 비정상 베르누이 방정식은 다음과 같이 표시 된다.

$$U_i^2/2 + P_i/\rho = U_m^2/2 + P_m/\rho + \int_0^{x_m} (\partial U/\partial t) dx \quad (6)$$

P_i , P_m 은 각각 단면 'i' 및 'm'에서의 압력이며 ρ 는 유체의 밀도, x_m 은 단면 'i', 'm'사이의 진행 방향 거리이다. 입구단면 'i'에서의 압력 P_i 는 항상 대동맥 압력 P_m 과 같다고 가정 한다.

유체의 압력에의해 밸브판에 작용하는 x방향 힘의 성분 F_p 는, 밸브판을 폭 δs 를 가지는 N개의 동구간 요소로 나누어 유한 적분 하면 다음과 같이 표시된다.

$$F_p = \sum N \delta s (\cos \theta) P_m \quad (7)$$

$$\delta s = d / N \quad (8)$$

단일 유입 유출구를 가지는 제어체적에 대한 모델링 방정식은 다음과 같이 표시된다(Fig. 2).

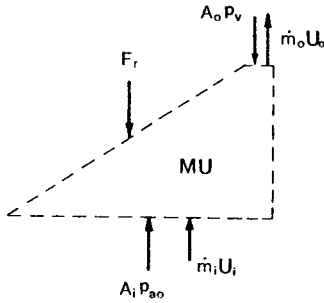


Fig. 2 Schematic diagram of the control volume for the momentum equation

$$\begin{aligned}
 A_i P_{a0} - A_o P_v - F_r &= m_o U_o - m_i U_i + d(MU)/dt & (9) \\
 m_i &= \rho A_i (U_i - U_{ib}) \delta t & (10) \\
 m_o &= \rho A_o (U_o - U_{ib}) \delta t & (11) \\
 U_{ib} &= -a \omega (\cos \theta) & (12) \\
 U &= (U_i + U_o) / 2 & (13) \\
 M &= \rho W b (l_1 + l_2) (\sin \theta) / 2 & (14)
 \end{aligned}$$

U_{ib} 는 'B'점의 유동방향 속도성분, U 는 제어체적의 평균속도, F_r 은 밸브판에 의해 제어체적에 작용하는 유동방향 반력이다. 식(9)를 F_r 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$F_r = A_i P_{a0} - A_o P_v + m_i U_i - m_o U_o - d(MU)/dt \quad (15)$$

한편 식(7)에 의해 얻어지는 F_b 는 작용 반작용의 원리에 의해 식(15)의 F_r 과 같아야 한다.

$$F_p = F_r \quad (16)$$

다음단계로 식(16)을 만족 시키는 U_i 와 P_i 를 이용하여 밸브판의 운동 방정식을 쓴다. 밸브판이 닫히기 시작하여 θ 가 60° 이하로 되면 실속(stall) 조건에 의해 압력이 소멸되며, θ 가 0° 인 경우에는 유동이 없어 양력과 항력 모두가 소멸되므로, 닫힌 거동을 해석할 때에는 열림거동을 해석할 때와는 달리 양력과 항력등의 개념을 적용하여 밸브판의 거동을 해석할 수가 없다^{(1),(2)}. 따라서 닫힌거동을 해석하기 위해서는 유체의 압력에 의한 힘과 중력만을 밸브판에 작용하는 외력으로 간주하며, 이때의 밸브판의 자유물체도는 Fig.3과 같다. 밸브판의 운동 방정식은 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$M_t = I_o (d^2 \theta / dt^2) \quad (17)$$

$$M_t = M_b + M_g + M_h \quad (18)$$

$$I_o = m r^2 / 4 + m (r - a)^2 \quad (19)$$

I_o 는 피벗축에 대한 밸브판의 질량 관성 모멘트, M_b 는 압력에 의한 모멘트, M_g 는 중력에 의한 모멘트이다.

밸브판이 닫힘에 따라 판과 정지핀 사이에 있던 유체는 일종의 스퀴즈 필름(squeeze film) 효과에 의해 양옆으로 빠져 나가면서 고압을 형성하여 밸브판의 접근을 방해하며, 밸브판이 열릴때에는 음압이 형성되어 밸브판의 열림을 방해한다. 밸브판과 정지핀의 접촉부위중 피벗축에 해당하는 'BC'부위에서 형성되는 압력은 밸브판의 회전거동에 영향을 미치지 못하므로 'AB' 및 'CD'부위만을 고려한다(Fig.3). 계산상의 편의를 위해 'AB'부위를 직선으로 간주하면 밸브판과 정지핀 사이의 유체의 거동은 다음과 같은 레이놀즈방정식에 의해 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (h^3 \partial p / \partial x) + \frac{\partial}{\partial y} (h^3 \partial p / \partial y) = 12 \eta (-v) \quad (20)$$

여기에서 h 는 유막두께, η 는 점도, v 는 밸브판의 접근속도이다. 핀의 폭에 비해 길이가 훨씬 길으므로 y 방향의 압력변화를 무시하고, x 방향에 따른 유막두께변화를 무시하면 식(20)은 다음과 같이 간략화된다.

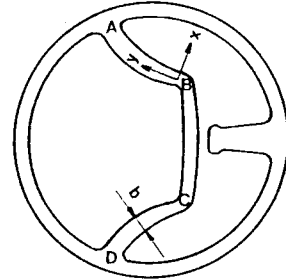


Fig. 3 Freebody diagram of the occluder

$$h^3 d^2 p / dx^2 = -12 \eta v \quad (21)$$

정지핀 양끝에서의 압력을 주위압력과 같은 기준압력으로 보면 압력 p 는 다음과 같이 표시된다.

$$p = \frac{6 \eta}{h^3} v \left(\frac{1}{4} b^2 - x^2 \right) \quad (22)$$

따라서 밸브판에는 위와 같은 크기의 스퀴즈 필름 압력에 의한 모멘트가 추가로 작용된다.

$$M_s = \int_0^l \int_{-b/2}^{b/2} p \, dx \, y \, dy \quad (23)$$

l 은 'CD'부분의 길이이다. A_{or} 을 오리피스 면적이라 할때 오리피스를 통과하는 여류량은 다음과 같다.

$$Q_{ob} = A_{or} u_i \delta t \quad (24)$$

밸브판이 각속도 ω_1 로 정지핀에 접근하여 극히 짧은 동안의 충격접촉후 ω_2 의 각속도를 가지고 반발 할 때의 원리도가 Fig.4에 나타나있다. 반발계수를 e 라 할때 ω_1 과 ω_2 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$\omega_2 = -e \omega_1 \quad (25)$$

t_1 를 충격접촉시간이라 할때 각속도 α 는 다음과 같이 표시된다.

$$\alpha = d^2 \theta / dt^2 = (\omega_2 - \omega_1) / t_1 \quad (26)$$

한편 충격접촉시간 t_1 는 다음과 같은 식으로 표시된다⁽⁸⁾.

$$t_1 = 2.94 [5 / (4 M_n v^{1/2})]^{2/5} \quad (27)$$

여기에서 v 는 밸브판의 정지핀에의 접근속도이고, M, n 등은 밸브판과 정지핀의 재질 및 형성등에 의해 결정되는 상수이다.

밸브판이 완전히 닫혀서 정지핀에 부딪힐때 접촉 가능한 지점은 두 정지핀의 뿌리 'J'와 'N' 및 피벗점 'O'이다(Fig.4).

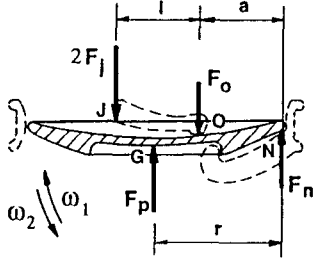


Fig. 4 Schematic diagram showing forces during impact

충격후의 밸브판의 직선 및 회전운동 방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$2F_J l - F_P (r - a) + F_N a = I_0 \alpha \quad (28)$$

$$F_0 + 2F_J - F_P - F_N = m(r - a) \alpha \quad (29)$$

F_0 , F_J 및 F_N 은 각각 'O', 'J' 및 'N'점에서의 충격반력이다. 기하학적 관계에 의해서 F_0 는 F_J 나 F_N 보다 훨씬 작을 것이므로 F_0 를 무시하고 위의 두식을 풀면 각 정지된 뿌리에서의 충격력 F_J 와 F_N 이 구해진다.

2. 2 결과 및 고찰

수치 계산을 위한 시간 증분 δt 는 θ 가 5° 이상일때는 0.1m sec로 잡았고, θ 가 5° 이하일경우는 1usec로 잡았다. F_J 와 F_P 의 비교 수렴조건으로는 그들의 차이가 정압에 의한 힘의 0.1%에 해당하는 0.005N이하인 조건으로 하였다. 열림각 5° 이내일 경우 밸브판과 하우징 사이의 틈새가 거의 없어 역류량이 0에 가까우므로, 이경우 제어체적 내에서의 유체의 상태 유동은 없는 것으로 하였다. 역류가 시작 될 때의 시간을 기준시간 $t=0$ 으로 잡고, 초기 회전 속도와 가속도는 모두 '0'으로 하였다. 적분 계산을 위해 밸브판을 모두 24조각의 균일한 폭을 가지는 미소 요소로 나누어 계산 하였고, 운동 방정식은 4차의 Runge-Kutta 방정식을 이용하여 풀었다. 박동수와 박출량은 각각 70 BPM 및 $1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sec}$ (6L/min)으로 잡았다. 심실의 압력이 대동맥 압력(P_{ao})과 동일한 상태에서 '0'으로 벌어지기 까지의 기간 T_d 는 0에서 0.06sec 사이의 범위에서 변화하며, 대동맥 압력은 13.3kPa(100mmHg)으로 가정 하였다.

Fig. 5는 대동맥 압력이 13.3kPa(100mmHg)인 경우에 시간에 따른 밸브판의 열림각을 나타낸다. 밸브판이 닫히기 시작하여 정지된 후 부딪힌후 진폭이 급격히 감소하며 약 2~3회의 충격 진동후 완전히 닫히게 된다. 이기간 동안에 걸리는 시간은 약 12~15m sec 범위로서 실제 실험 결과와 근사한 경향을 보이고 있다. 심실 압력이 빨리 감소 할 수록 (T_d 가 작을 수록) 밸브판이 빨리닫히며 정지 상태에 도달 하는 기간도 짧다. 정상상태에서의 심실 압력 감소 시간은 약 0.03~0.06 sec 이다⁽⁴⁾.

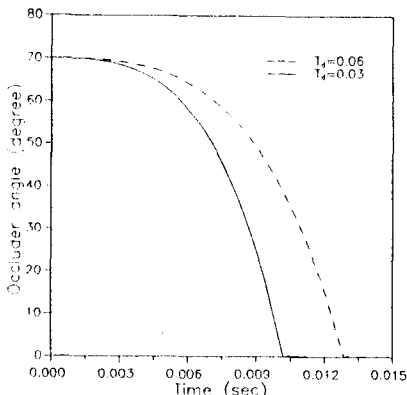


Fig. 5 Angle of the occluder and the valve housing as a function of time for $P_{ao} = 13.3 \text{ kPa}(100 \text{ mmHg})$

Fig. 6은 $P_{ao}=13.3\text{kPa}(100 \text{ mmHg})$ 인 경우에 밸브판 선단의 속도를 나타낸다. 최대속도는 $T_d=0.03 \text{ sec}$ 인 경우 약 8m이다. Guo와 Hwang⁽³⁾은 2엽 심장밸브 선단의 최대 속도가 4.5~4.8 m/sec임을 실험적으로 관찰 하였다. 1엽 밸브판은 2엽 밸브판에 비해 1.5배 정도 길쭉은 아니라, 회전시 모멘트 팔도 그만큼 길다는 점을 고려할때, 본 해석 결과는 실험치와 상당히 근사한 값을 얻을 수 있다. 스퀴즈 필름 효과에 의해 밸브판이 정지된 후 부딪히기 직전 속도가 줄어들음을 알수있다.

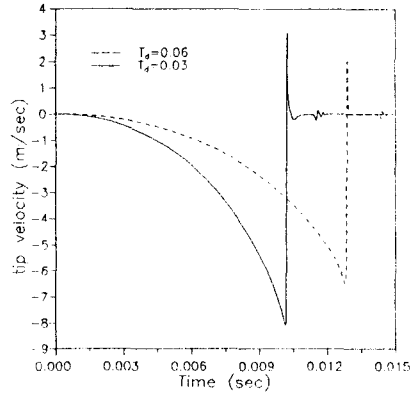


Fig. 6 Velocity of the occluder tip at the major orifice as a function of time for $P_{ao} = 13.3 \text{ kPa}(100 \text{ mmHg})$

Fig. 7은 역류량을 보이고 있다. 밸브가 완전히 닫힐때까지의 총 역류량은 약 4cc로서 거의 차이가 없음을 알수 있다. Sabbah와 Stein⁽⁵⁾은 닫힘 기간동안의 역류량이 약 3cc이고 대동맥 압력의 변화에 따른 차이가 없다고 발표 한 바 있다. 그들은 실험에서 오리피스 직경이 0.022m인 Bjork-Shiley 밸브를 사용하였는데, 본 연구에서 이용된 밸브모델의 오리피스 직경은 0.024m 이므로, 본 연구에서 계산된 역류량은 매우 합리적인 값으로 사료된다.

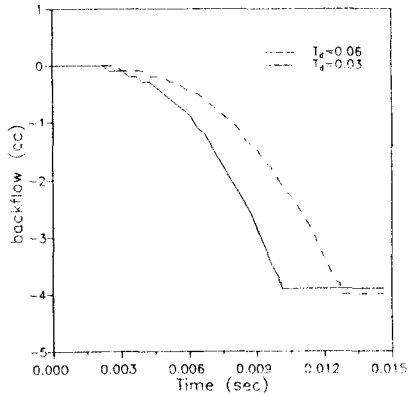


Fig. 7 Closing backflow volume as a function of time

밸브판과 정지핀 사이의 충격력은 'J'점에서 제일 큰 것으로 나타났으며, $P_{ao}=13.3\text{kPa}(100 \text{ mmHg})$ 인 경우의 반복충격에 따른 충격력의 변화가 Fig. 8에 나타나 있다. 이때 반복계수는 $\sigma=0.5$, 정지핀과 밸브판의 탄성계수 및 포와손비는 각각 209GN/m^2 , 0.3 및 27.6GN/m^2 , 0.23으로 선정하였다. 면 접촉을 보장하기 위해 밸브판과 정지핀의 접촉면에서의 곡률 반경은 모두 0.1m로 하였다. 최대 충격력은 최초 충격시 발생하며 그 범위는 대략 60~100N이고 충격 접촉 기간은 약 35~45 usec이다. 이 값은 정적인 상태에서 측정된 힘 9~15N 보다 훨씬 큰 값으로써⁽⁵⁾, 따라서 밸브의 내구성능을 보장하기 위해서는 반드시 충격접촉에 의한 힘을 고려해야만 할것으로 판단 된다.

Fig. 9는 밸브판과 정지핀 사이의 스퀴즈 필름 압력을 나타낸다. 열림각이 1° 이내 일때부터 압력이 급격히 증가하여 최

초로 부딪히기 직전 최고 약400MPa에 도달하고 그후 열릴때에는 음압을 형성한다. 이러한 음압형성효과로 인해 스퀴즈 필름을 고려하지 않았을 때에 비해 되열림각도가 훨씬작으며 완전히 닫히기 까지의 시간이 짧아짐을 알수있다.

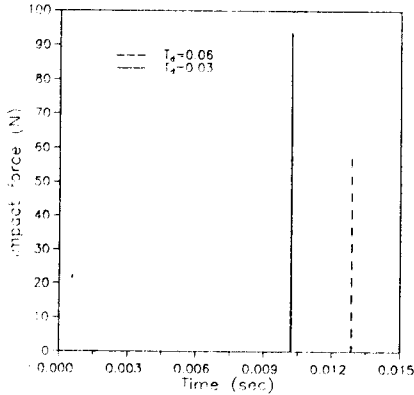


Fig. 8 Impact force between the occluder and the strut during the transient closing phase for $P_{w0} = 13.3 \text{ kPa}(100 \text{ mmHg})$

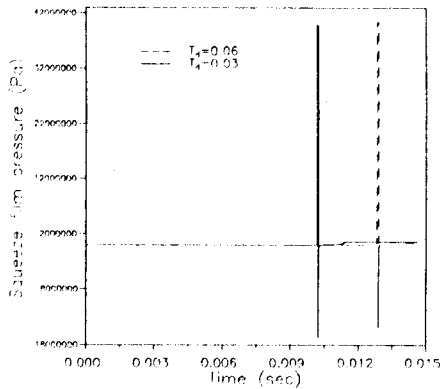


Fig. 9 Squeeze film pressure

3. 결론

밸브판과 벽면 사이에 채워진 유체를 제어체적으로 고려하고 밸브판과 정지핀 사이의 스퀴즈 필름 압력을 고려하여 밸브판이 닫히기 시작 한후 완전히 닫힐때 까지의 과도기간 동안의 유체의 유동 및 밸브판의 거동을 해석하였다. 밸브판은 정지핀에 부딪혀 수회의 감쇠진동을 한후 완전히 닫힌 상태를 유지 하게 된다. 밸브판이 과도거동을 마치는 시간은 대략 12~15msec이며, 최대충격력은 초기충격시 약 60~100N의 범위를 가진다. 이같은 정적인 상태에서 정지핀에 작용하는 하중보다 훨씬 큰값이므로, 밸브의 피로파괴를 해석하기 위해서는 충격하중을 고려하여야만 한다. 본 연구에서 제시한 해석 모델에 의해 계산된 역류량과 밸브판 선단의 속도 및 제반 거동 경향은 기존에 발표된 실험치와 근사한 값을 가짐으로써, 비교적 많은 단순화 가정들 전제로 한 본 연구에서의 해석 모델이 밸브 닫힘 거동 해석에 있어서 매우 합리적임을 보이고 있다.

스퀴즈 필름 효과를 고려한 경우가 고려하지 않았을 때보다 훨씬 실제적인 결과를 나타냄을 알수있다. 앞으로 본 연구에서 검토되지 않았던 캐비테이션이나 물망치효과(water hammer effect)를 추가적으로 고려한 해석 모델을 완성 한다면 보다

실제적인 충격력과 밸브의 거동이 구해질 것으로 판단되며, 본 연구 결과는 충격력을 최소화하여 밸브의 내구 수명을 연장 시킬수 있는 밸브의 최적화 설계에 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

- 1) Cheon G.J., Chandran K.B., 1992, "Dynamic Behavior Analysis of Mechanical Monoleaflet Heart Valve Prostheses in the Opening Phase", Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, BED-Vol.22, pp. 423-426 ; and to be published in ASME J. of Biomechanical Engineering (1993, Nov.).
- 2) 천 길 정, 1992, "기계식 1엽 심장밸브의 동적거동해석", 대한기계학회논문집, 제16권, pp.2090-2097
- 3) Guo G.X., Xu C.C., Hwang N.H.C., 1990, "Laser Assessment of Leaflet Closing Motion in Prosthetic Heart Valves", J. of Biomedical Engineering, Vol.12, pp.477-481
- 4) Guyton, 1971, "Textbook of Medical Physiology", W.B.Saunders Co., Philadelphia, 4th ed., p.153
- 5) Ritchie R.O., Lubock P., 1986, "Fatigue Life Estimation Procedures for the Endurance of a Cardiac Valve Prosthesis: Stress/Life and Damage-Tolerance Analyses", ASME J. of Biomechanical Engineering, Vol.108, pp.153-160
- 6) Sabbah H.N., Stein P.D., 1984, "Comparative Study of the Amount of Backflow Produced by Four Types of Aortic Valve Prostheses", ASME J. of Biomechanical Engineering, Vol.106, pp.66-71
- 7) Woo Y.R., Yoganathan P.Y., 1986, "In Vitro Pulsatile Flow Velocity And Shear Stress Measurements in the Vicinity of Mechanical Mitral Heart Valve Prostheses", J. of Biomechanics, Vol.19, pp.39-51
- 8) Zukas J., Cholas T., Swift H.F., 1982, Greszczuk L.B., Curran D.R., "Impact Dynamics", John Wiley & Sons, pp.57-70