

<論 文>

# 스퀴즈필름효과를 고려한 인공심장밸브의 닫힘시 동적거동 해석

천 길 정\*

(1994년 8월 25일 접수)

## Dynamic Behavior Analysis of the Heart Valve Prostheses Considering Squeeze Film Effect During Closing Phase

Gill-Jeong Cheon

**Key Words:** Heart Valve Prosthesis(인공심장밸브), Squeeze Film Effect(스퀴즈필름효과), Cavitation(캐비테이션)

### Abstract

An analysis of the dynamics of a mechanical monoleaflet heart valve prosthesis in the closing phase is presented. Employing the moment equilibrium principles on the occluder motion and the squeeze film dynamics of the fluid between the occluder and the guiding strut at the instant of impact, the velocity of the occluder tip and the impact force were computed. The dynamics of fluid being squeezed between the occluder and the guiding struts is accounted for by Reynold's equation. The effect of the fluid being squeezed between the occluder and the guiding strut was to reduce the velocity of the occluder tip at the instant of valve closure as well as dampen the fluttering of the occluder before coming to rest in the fully closed position. The squeeze film fluid pressure changed rapidly from a high positive value to a relatively large negative value in less than 1 msec. The results of this study may be extended for the analysis of cavitation inception, mechanical stresses on the formed elements and valve components as well as to estimate the endurance limits of the prosthetic valves.

### 1. 서 론

심장밸브의 제반 거동 특성은 밸브의 성능과 밀접한 관련을 가진다. 특히 밸브의 내구 수명에 영향을 미칠것으로 예상되는 밸브판과 정지핀의 충격적 접촉은 밸브의 피로파괴를 유발하여 착용자의 생명을 순간적으로 앓아갈 수 있다. 지금까지 환자에게 이식된 밸브가 파괴되거나 캐비테이션에 의해

생성되었을 것으로 예상되는 기포가 발생하는 현상들이 다수 관찰되었다.<sup>(1~3)</sup> 또한 응혈 및 혈전 현상은 재질적 특성외에 혈액과 밸브판의 상대속도에 의해서도 영향을 받으므로 이들에 대한 해석이 중요한 과제이다. 그러나 지금까지의 대부분의 연구는 밸브판이 완전히 열려 있거나 닫혔을 때의 정적인 상태에서의 밸브판 주위의 유동 특성을 해석 및 측정하는 것이었고, 밸브판이 열리고 닫히는 동안의 동적인 상태에서의 거동에 대한 해석은 거의 없는 실정이다.<sup>(3~6)</sup> 특히 밸브판과 정지핀에 작용하는 충격력은 밸브판이 열릴 때 보다도 닫힐 때

\*정회원, 원광대학교 기계공학과

더 큰 값을 가질것으로 예상되는데, 이에 대한 실험은 측정이 어려울 뿐만 아니라 현재까지 해석이 전혀 시도 되지 않았다. 저자와 Chandran은 밸브가 최대로 열린 상태에서부터 닫히기 시작하여 완전히 닫히는 동안까지의 밸브의 거동을 해석한바, 비교적 단순한 해석 모델을 사용하였으면서도 몇 가지 항목에 있어서 실험 측정치와 근사한 결과를 얻은바 있다.<sup>(7)</sup> 그러나 정지핀에 작용하는 충격력이 실험치보다 과대한 경향을 보이고 되열림 각도도 실제보다 큰 것으로 계산되었다. 따라서 본 논문에서는 밸브판이 닫히기 시작하여 정지핀에 부딪힌 후 완전히 닫힐 때까지의 과도거동에 대하여 이전과 동일한 해석모델과 해석방법을 이용하되, 밸브판과 정지핀 사이의 스퀴즈필름(SF: squeeze film)효과를 고려한 해석을 시도하여 밸브판의 시간에 따른 위치, 속도, 역류량 및 밸브판과 정지핀 사이의 충격력 등을 계산하고자 한다. 해석모델로는 29 mm Bjork-Shiley 밸브를 선정하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 모델링 및 운동방정식

밸브판 주위의 유체 유동과 밸브판의 거동은 상호간에 영향을 미치면서 시간에 따라 변화한다. 밸브판 주위의 유동을 해석하기 위해 Fig. 1에 보인 바와 같이 점선으로 표시되는 제어 체적을 고려한다. 계산을 쉽게 하기위해 유동은 진행방향으로의 1차원 층류 유동만 고려하고, 밸브판과 오리피스와의 형상을 사각형으로 단순화한다. 밸브의 거시 거동 해석시 유체를 비점성으로 가정해도 문제가 없으므로<sup>(8-10)</sup> 운동방정식은 비점성 베르누이 방정식을 사용하되, 밸브가 거의 닫혀 정지핀과의 거리가 극히 짧을 때 두 물체 사이에 국부적으로 형성되는 스퀴즈필름에 의한 미시적 효과를 고려하기 위해서는 점성을 고려한 레이놀즈방정식을 적용한다. 심실 팽창 초기에 심실로 역류되는 유량은 밸브판의 선단 A점을 기준으로 AC면과 AD면을 통과하는 유량으로 나뉘며, 이중 AD면을 통과 하는 유량만을 고려한다. 유동이 진행할수록 단면적이 변화하기 때문에 그에 따라 속도와 압력이 변화하나, 이때 각 단면적에서의 속도와 압력은 균일한 것으로 이상화한다. 제어 체적의 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 연속방정식에 의해 다음과 같이 표시된다.

$$A_i(U_i - U_{ia}) - A_m(U_m - U_{if}) = dV_i/dt \quad (1)$$

$$U_{ia} = (d-a)\omega(\cos\theta) \quad (2)$$

$$U_{if} = (d-a-s)\omega(\cos\theta) \quad (3)$$

$$A_i = w l_i, \quad A_m = w l_m \quad (4)$$

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

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.  $\omega$ 는 밸브판의 각속도이고,  $U_{ia}$  및  $U_{if}$ 는 A점 및 F점에서의 밸브판의 유동방향 속도성분이다.  $V_i$ 는 단면  $i$  및  $m$  사이에 포함된 유체의 체적이며  $s$ 는 선단 A에서부터 F점까지의 직선 거리,  $w$ 는 밸브판의 폭이다.

단면  $i, m$  사이의 비정상 베르누이 방정식은 다음과 같이 표시 된다.<sup>(11)</sup>

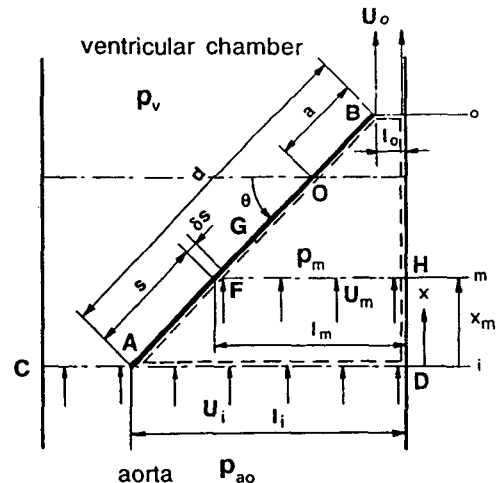


Fig. 1 Schematic diagram showing the the control volume for the analysis

$$U_i^2/2 + p_i/\rho = U_m^2/2 + p_m/\rho + \int_0^{x_m} \frac{\partial u}{\partial t} dx \quad (6)$$

$P_i, P_m$ 은 각각 단면  $i$  및  $m$ 에서의 압력이며  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $X_m$ 은 단면  $i, m$  사이의 진행방향 거리이다. 입구 단면  $i$ 에서의 압력  $P_i$ 는 항상 대동맥 압력  $P_{ao}$ 와 같다고 가정한다. 단면  $i, m$  사이 유체의 평균 속도를  $U_i$ , 시간증분을  $\delta t$ 라 하면 식(6)의 편미분 항은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = [(u_i + u_m)' - (u_i + u_m)^{t-\delta t}] / (2\delta t) \quad (7)$$

유체의 압력에 의해 밸브판에 작용하는  $X$  방향 힘의 성분  $F_p$ 는 다음과 같다.

$$F_p = \int_0^d \omega P_m (\cos \theta) ds \quad (8)$$

밸브판을 폭  $\delta_s$ 를 가지는  $N$ 개의 등구간 요소로 나누어 유한적분하면 다음과 같이 표시된다.

$$F_p = \sum_{m=1}^N \omega \delta_s (\cos \theta) P_m \quad (9)$$

$$\delta_s = d/N \quad (10)$$

단일 유입 유출구를 가지는 제어 체적에 대한 모멘텀 방정식은 다음과 같이 표시된다.<sup>9</sup>(11)(Fig. 1)

$$A_i P_{ao} - A_o P_v - F_r = \dot{m}_o U_o - \dot{m}_i U_i + d(MU)/dt \quad (11)$$

$$\dot{m}_i = r A_i (U_i - U_{ia}) dt \quad (12)$$

$$\dot{m}_o = r A_o (U_o - U_{ib}) dt \quad (13)$$

$$U_{ib} = -aw (\cos \theta) \quad (14)$$

$$U = (U_i + U_o) / 2 \quad (15)$$

$$M = \rho \omega d (l_i + l_o) (\sin \theta) / 2 \quad (16)$$

$U_{ib}$ 는 B점의 유동방향 속도성분,  $U$ 는 제어체적의 평균속도,  $F_r$ 은 밸브판에 의해 제어체적에 작용하는 유동방향 반력이다.

식(11)을  $F_r$ 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$F_r = A_i P_{ao} - A_o P_v + \dot{m}_i U_i - \dot{m}_o U_o - d(MU)/dt \quad (17)$$

한편 식(9)에 의해 얻어지는  $F_p$ 는 작용 반작용의 원리에 의해 식(17)의  $F_r$ 과 같아야 한다.

$$F_p = F_r \quad (18)$$

식(18)이 만족되면 초기에 가정한 속도  $U_i$ 가 맞는 값으로서 위의 계산 값들은 그대로 확정되며, 그렇지 않으면  $U_i$ 값을 수정하여 처음부터 동일한 과정을 반복한다.

다음 단계로 식(18)을 만족시키는  $U_i$ 와  $P_i$ 를 이용하여 밸브판의 운동방정식을 푼다. (Fig. 2)

밸브판이 닫히기 시작하여  $\theta$ 가  $60^\circ$ 이하로 되면 실속(stall)조건에 의해 양력이 소멸되며,  $\theta$ 가  $0^\circ$ 인 경우에는 유동이 없어 양력과 항력 모두가 소멸되므로, 닫힘 거동을 해석할 때에는 열림 거동을 해석할 때와는 달리 양력과 항력 등의 개념을 적용하여 밸브판의 거동을 해석할 수가 없다.<sup>(4,5)</sup> 따라서 본 논문에서는 닫힘 거동을 해석하기 위해서 유체의 압력에 의한 힘과 중력 등을 밸브판에 작용하는 외력으로 간주한다. 밸브판의 자유 물체도는 Fig. 3과 같다. 밸브판의 운동방정식은 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$T_i = I_o (d^2 \theta / dt^2) \quad (19)$$

$$T_i = T_p + T_g + T_s \quad (20)$$

$$I_o = m r^2 / 4 + m (r - a)^2 \quad (21)$$

$$T_p = - \int_0^d (P_m - P_v) w (d - a - s) ds \\ = - \sum_{m=1}^N (P_m - P_v) w (d - a - s) \delta s \quad (22)$$

$$T_g = m_e g (r - a) \cos \theta \quad (23)$$

$$m_e = A_o h' (\rho_o - \rho) \quad (24)$$

$I_o$ 는 피벗축에 대한 밸브판의 질량 관성모멘트,  $\rho_o$ 는 밸브판의 밀도,  $h'$ 은 밸브판의 평균두께,  $T_p$

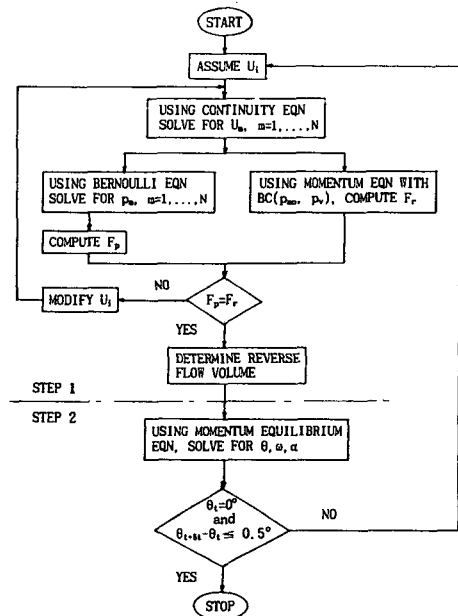


Fig. 2 Flowchart of the computational scheme

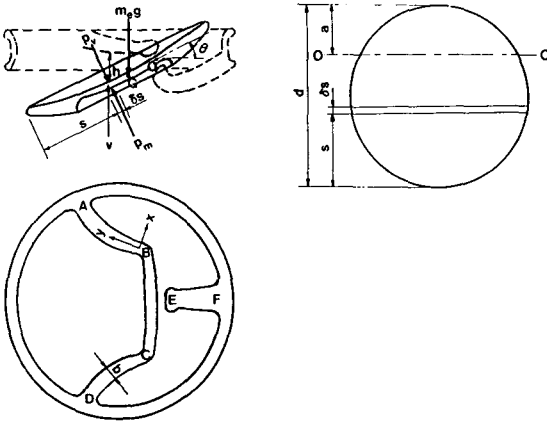


Fig. 3 Schematic diagram showing the squeeze film between the occluder and the valve housing

는 압력에 의한 모멘트,  $T_g$ 는 중력에 의한 모멘트,  $T_s$ 는 스퀴즈필름에 의한 압력이다.

밸브판이 닫힘에 따라 판과 정지핀 사이에 있던 유체는 일종의 스퀴즈필름(squeeze film) 효과에 의해 양 옆으로 빠져 나가면서 고압을 형성하여 밸브판의 접근을 방해한다. 밸브판과 정지핀의 접촉 부위중 피벗축에 해당하는 BC 부위에서 형성되는 압력은 밸브판의 회전 거동에 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. (12)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 12\eta(-v) \quad (25)$$

여기에서  $h$ 는 유막두께,  $\eta$ 는 동점도,  $v$ 는 밸브판의 접근 속도이다. 핀의 폭  $b$ 에 비해 길이가 훨씬 길으므로  $y$ 방향의 압력 변화를 무시하고,  $x$ 방향에 따른 유막 두께 변화를 무시하면 식(25)는 다음과 같이 간략화된다.

$$h^3 \left( \frac{d^2 P}{dx^2} \right) = -12\eta v \quad (26)$$

정지핀 양끝에서의 압력을 주위 압력과 같은 기준 압력으로 보면 압력  $p$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$p = \left( \frac{6\eta}{h^3} \right) v \left( \frac{b^2}{4} - x^2 \right) \quad (27)$$

따라서 밸브판에는 위와 같은 크기의 스퀴즈필름 압력에 의한 모멘트가 추가로 작용된다.

$$T_s = \int_0^l \int_{-b/2}^{b/2} (p dx) (y dy) \quad (28)$$

$l$ 은 CD부분의 길이이다.

$A_{or}$ 을 오리피스 면적이라 할 때 오리피스를 통과하는 역류량은 다음과 같다.

$$Q_{pb} = A_{or} U_i \delta t \quad (29)$$

밸브판이 각속도  $\omega_1$ 으로 정지핀에 접근하여 극히 짧은 동안의 충격접촉 후  $\omega_2$ 의 각속도를 가지고 반발할 때의 원리도가 Fig. 4에 나타나 있다. 반발계수를  $e$ 라 할 때  $\omega_1$ 과  $\omega_2$ 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$\omega_2 = -e\omega_1 \quad (30)$$

$t_i$ 를 충격접촉시간이라 할 때 각속도는 다음과 같이 표시된다.

$$\alpha = \frac{d^2 \theta}{dt^2} = (\omega_2 - \omega_1) / t_i \quad (31)$$

한편 충격접촉시간  $t_i$ 는 다음과 같은 식으로 표시된다. (13)

$$t_i = 2.94 [5 / (4Hn'v^{1/2})]^{2/5} \quad (32)$$

여기에서  $v$ 는 밸브판의 정지핀에의 접근 속도이고,  $H, n'$  등은 밸브판과 정지핀의 재질 및 형상에 의해 결정되는 상수이다. (7)

밸브판이 완전히 닫혀서 정지핀에 부딪힐 때 접촉 가능한 지점은 두 정지핀의 뿌리 J와 N 및 피벗점 O이다.

충격후의 밸브판의 직선 및 회전 운동방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$2F_J l - F_p(r-a) + F_n a = I_o \alpha \quad (33)$$

$$F_o + 2F_J - F_p - F_n = m(r-a)\alpha \quad (34)$$

$F_o, F_J$  및  $F_n$ 은 각각 O, J 및 N점에서의 충격

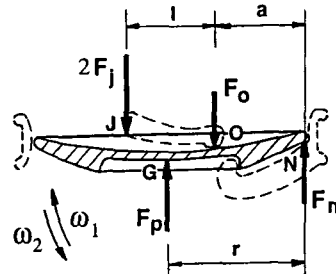


Fig. 4 Schematic diagram showing forces during impact

반력이다. 기하학적 관계에 의해서  $F_o$ 는  $F_j$ 나  $F_n$ 보다 훨씬 적을 것이므로  $F_o$ 를 무시하고 위의 두 식을 풀면 각 정지된 뿌리에서의 충격력  $F_j$ 와  $F_n$ 이 구해진다.

## 2.2 결과 및 고찰

수치계산을 위한 시간증분  $\delta t$ 는  $\theta$ 가  $5^\circ$  이상일 때는 0.1 msec로 잡았고,  $\theta$ 가  $5^\circ$  이하일 경우에는 0.01 msec로 잡았다.  $F_r$ 과  $F_p$ 의 비교 수렴조건으로는 그들의 차이가 정압에 의한 힘의 0.1%에 해당하는 0.005N 이하인 조건으로 하였다. 열림각이  $5^\circ$  이내일 경우 밸브판과 하우징 사이의 틈새가 거의 없어 역류량이 0에 가까우므로, 이 경우 제어

**Table 1** Various parameters and valve dimensions used in this study

Parameter	Value
a	0.006 m
A	0.00045 m <sup>2</sup>
A <sub>or</sub>	0.00046 m <sup>2</sup>
c	0.00005 m
d	0.024 m
e	0.5
h'	0.0015 m
r	0.012 m
w	0.019 m
$\theta_{max}$	70°
$\rho$	1060 kg/m <sup>3</sup>
$\rho_o$	2480 kg/m <sup>3</sup>

a ; distance from the pivotal axis to the leading edge

A ; occluder area

A<sub>or</sub> ; orifice area

c ; clearance between the occluder and the housing

d ; occluder diameter

e ; resilience coefficient

h' ; idealized occluder thickness

r ; occluder radius

w ; idealized width of the occluder

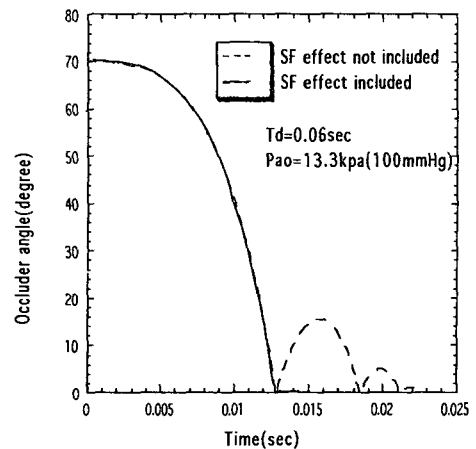
$\theta_{max}$  ; maximum opening angle

$\rho$  ; density of the fluid

$\rho_o$  ; density of the occluder

체적 내에서의 유체의 상대유동은 없는 것으로 하였다. 역류가 시작될 때의 시간을 기준으로  $t=0$ 으로 잡고, 초기 회전속도와 가속도는 모두 0으로 하였다. 적분 계산을 위해 밸브판을 모두 24조각의 균일한 폭을 가지는 미소 요소로 나누어 계산하였고, 운동방정식은 4차의 Runge-Kutta 방정식을 이용하여 풀었다. 박동수와 박출량은 각각 70 BPM(beat per minute) 및  $1.0 \times 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/sec(6L/min)로 잡았다. 심실의 압력이 대동맥 압력( $P_{ao}$ )과 동일한 상태에서 0으로 떨어지기까지의 기간  $T_d$ 는 0.03에서 0.06 sec 사이의 범위에서 변화하며, 대동맥 압력은 13.3 Kpa(100 mmHg)로 가정하였다. 계산에 이용된 밸브의 제원과 각종 변수는 Table 1에 표시되어 있다.

Fig. 5는 대동맥 압력이 13.3 Kpa(100 mmHg)일 때에 스퀴즈필름효과를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 시간에 따른 밸브판의 열림각을 나타낸다. 스퀴즈필름효과를 고려할 경우에 스퀴즈필름효과를 고려하지 않았을 때에 비하여 밸브판이 정지핀에 부딪힌 후의 열림각이 관찰할 수 없을 정도로 매우 작으며 극히 짧은 기간 동안에 완전히 닫히는 정지상태에 도달한다. 밸브판이 닫히기 시작하여 정지핀에 부딪힌 후 진폭이 급격히 감소하며 약 2~3회의 충격진동후 완전히 닫히게 된다. 이 기간 동안에 걸리는 시간은 대동맥 압력과 심실 압력 변화기간( $T_d$ )에 따라 약 10~15 msec 범위로서 실제 실험결과와 근사한 경향을 보이고 있다. 정상 상태



**Fig. 5** Angle between the occluder and the valve housing v.s. time for  $T_d=0.06$  sec,  $P_{ao}=13.3$  Kpa

에서의 심실 압력 감소시간은 약 0.003~0.006 0.03~0.06 sec이다.<sup>(14)</sup>

Fig. 6은 대동맥 압력이 13.3 Kpa(100 mmHg)일 때에  $T_d$ 의 변화에 따른 밸브판의 열림각을 보여준다. 심실 압력이 빨리 감소할수록( $T_d$ 가 작을수록) 밸브판이 빨리 닫히며 정지상태에 도달하는 기간도 짧다.

Fig. 7은  $P_{ao}=13.3$  Kpa(100 mmHg),  $T_d=0.06$  sec인 경우에 밸브판 끝의 속도를 나타낸다. 스쿼

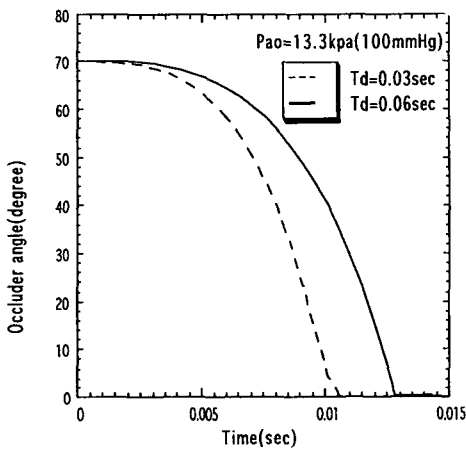


Fig. 6 Angle between the occluder and the valve housing v.s. time for SF effect included

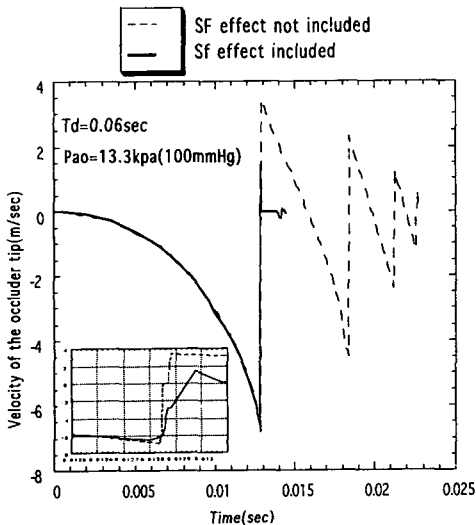


Fig. 7 Axial velocity of the occluder tip v.s. time at the major orifice for  $T_d=0.06$  sec,  $P_{ao}=13.3$  Kpa (small window shows the velocity vicinity of impact)

즈필름효과와 고려여부에 관계없이 최대 속도는 거의 차이가 없으며 약 6~8 m/sec의 범위에 존재한다. Guo와 Hwang은<sup>(15)</sup> 2엽 심장밸브 선단의 최대 속도가 4.5~4.8 m/sec임을 실험적으로 관찰하였다. 1엽 밸브판은 2엽 밸브판에 비해 1.5배 정도 길뿐 아니라, 회전시 모멘트 팔도 그만큼 길다는 점을 고려할 때, 본 해석결과는 실험치와 상당히 근사한 값을 알 수 있다. 스쿼즈필름효과에 의해 밸브판이 정지핀에 부딪히기 직전 속도가 줄어듦을 알 수 있다.

Fig. 8은 역류량을 보이고 있다. 밸브가 완전히 닫힐 때까지의 총 역류량은 약 4 cm<sup>3</sup>로서 거의 차이가 없음을 알 수 있다. Sabbah와 Stein은<sup>(16)</sup> 닫힘 기간 동안의 역류량이 약 3 cm<sup>3</sup>이고 대동맥 압력의 변화에 따른 차이가 없다고 발표한 바 있다. 그들은 실험에서 오리피스직경이 0.020 m인 Bjork-Shiley 밸브를 사용하였는데, 본 연구에서 이용된 밸브 모델의 오리피스직경은 0.024 m이므로, 본 연구에서 계산된 역류량은 매우 합리적인 값으로 사료된다.

Fig. 9는 밸브판과 정지핀 사이의 스쿼즈필름 압력을 나타낸다. 열림각이 1° 이내일 때부터 압력이 급격히 증가하여 최초로 부딪히기 직전 최고 약 10 Mpa에 도달하고, 부딪힌 직후 약 -15 Mpa에 이른다. 이값은 캐비테이션을 유발하기에 충분한 값으로서, 실험에서 관찰되는 기포는 이러한 음압에 의해 형성되는 것으로 추정된다. 이러한 음압형성 효과로 인해 스쿼즈필름을 고려하지 않았을 때에 비해 되열림 각도가 훨씬 작으며 완전히 닫힐 때까

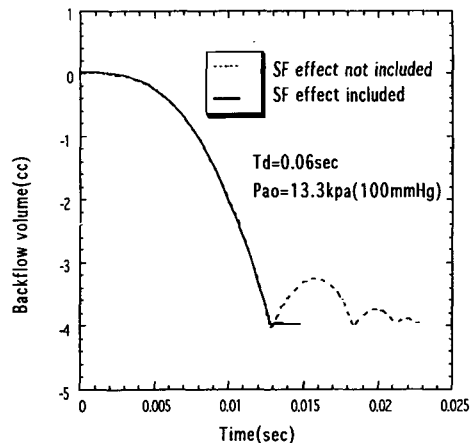


Fig. 8 Closing backflow volume v.s. time for  $T_d=0.06$  sec,  $P_{ao}=13.3$  Kpa

지의 시간이 짧아짐을 알 수 있다.

밸브판과 정지핀 사이의 충격력은  $J$ 점에서 제일 큰 것으로 나타났으며,  $P_{ao}=13.3\text{ Kpa}(100\text{ mmHg})$  인 경우의 충격력의 변화가 Fig. 10에 나타나 있다. 이때 반발계수는  $e=0.5$ , 정지핀과 밸브판의 탄성 계수 및 푸아송비는 각각  $209\text{ GN/m}^2$ ,  $0.3$  및  $27.6\text{ GN/m}^2$ ,  $0.23$ 으로 선정하였다. 먼 접촉을 보장하기 위해 밸브판과 정지핀의 접촉면에서의 곡률 반경은 모두  $0.1\text{ m}$ 로 하였다. 최대 충격력은 최초 충격시 발생하며 그 범위는 대략  $40\sim 60\text{ N}$ 이고 충격접촉기간은 약  $35\sim 45\ \mu\text{sec}$ 이다. 스퀴즈 필

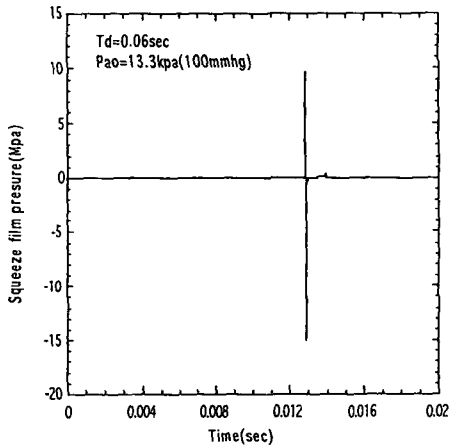


Fig. 9 Squeeze film pressure v.s. time for  $T_d=0.06$  sec,  $P_{ao}=13.3\text{ Kpa}$

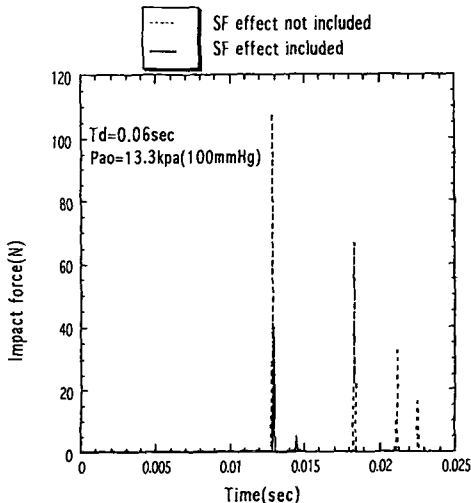


Fig. 10 Impact force between the occluder and the strut

름 효과를 고려함으로써 계산되는 충격력의 크기가 현저히 줄어들었다. 이 값은 정적인 상태에서 측정된 힘  $9\sim 15\text{ N}$ 보다 훨씬 큰 값으로써, <sup>(3)</sup> 따라서 밸브의 내구 성능을 보장하기 위해서는 반드시 충격 접촉에 의한 힘을 고려해야만 할 것으로 판단된다.

### 3. 결 론

밸브판과 벽면 사이에 채워진 유체를 제어 체적으로 고려하고 밸브판과 정지핀 사이의 스퀴즈 필름 압력을 고려하여 밸브판이 닫히기 시작한 후 완전히 닫힐 때 까지의 과도기간 동안의 밸브판의 거동을 해석하였다.

밸브판은 정지핀에 부딪힌 후 되열림없이 거의 그대로 완전히 닫힌 상태를 유지하게 된다. 밸브판이 과도 진동을 마치는 시간은 대략  $10\sim 15\text{ msec}$ 이며, 최대 충격력은 초기 충격시 약  $40\sim 60\text{ N}$ 의 범위를 가진다. 이 값은 정적인 상태에서 정지핀에 작용하는 하중보다 훨씬 큰 값이므로, 밸브의 피로 파괴를 해석하기 위해서는 충격하중을 고려하여야 한다. 본 연구에서 제시한 해석 모델에 의해 계산된 역류량과 밸브판 선단의 속도 및 제반 거동 경향은 기존에 발표된 실험치와 근사한 값을 가지므로써, 비교적 많은 단순화 가정을 전제로 한 본 연구에서의 해석 모델이 밸브닫힘 거동해석에 있어서 매우 합리적임을 보이고 있다.

스퀴즈필름효과를 고려한 경우가 고려하지 않았을 때보다 훨씬 실제적인 결과를 나타냄을 알 수 있다.

본 논문에서는 해석의 편리를 위해 1차원 유동만을 고려하였고, 밸브판의 형상도 원형이 아닌 사각형으로 고려하였으나, 앞으로 2차원 유동을 고려하고 밸브판과 오리피스스의 형상도 원형으로 고려하며 캐비테이션이나 물망치효과(water hammer effect)를 추가적으로 고려한 해석모델을 완성한다면 보다 실제적인 충격력과 밸브의 거동이 구해질 것으로 판단된다. 본 연구결과는 충격력을 최소화하여 밸브의 내구 수명을 연장시킬 수 있는 밸브의 최적화 설계에 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

### 후 기

본 연구는 원광대학교 교내 연구비(1994) 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Klepetko, W., 1989, "Leaflet Fracture in Edwards-Duromedics Bileaflet Valves," *J. of Thorac. Cardiovasc. Surg.*, Vol. 97, pp. 90~94.
- (2) Leuer, L., 1987, "Dynamics of Mechanical Valves in the Artificial Heart," *Proceedings of the 40th ACEMB*, pp. 82.
- (3) Ritchie, R. O. and Lubock, P., 1986, "Fatigue Life Estimation Procedures for the Endurance of a Cardiac Valve Prosthesis: Stress/Life and Damage-Tolerance Analyses<sup>1</sup>," *ASME J. of Biomechanical Engineering*, Vol. 108, pp. 153~160.
- (4) Cheon, G. J. and Chandran, K. B., 1993, "Dynamic Behavior Analysis of Mechanical Monoleaflet Heart Valve Prostheses in the Opening Phase," *ASME J. of Biomechanical Engineering*, Vol. 115, pp. 389~395.
- (5) 천 길정, 1992, "기계식 1엽 심장 밸브의 동적 거동해석," 대한기계학회논문집, 제16권, pp. 2090~2097.
- (6) Woo, Y. R. and 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.
- (7) Cheon, G. J. and Chandran, K. B., 1994, "Transient Behavior Analysis of a Mechanical Monoleaflet Heart Valve Prosthesis in the Closing Phase," *ASME J. of Biomechanical Engineering*, Vol. 116, pp. 452~459.
- (8) Bellhouse, B. J. and Talbot, L., 1969, "The Fluid Mechanics of the Aortic Valve," *J. Fluid Mechanics*, Vol. 35, pp. 721~735.
- (9) Van Steenhoven, A. A. and Van Dongen, M. E. H., 1979, "Model Studies of the Closing Behaviour of the Aortic Valve," *J. Fluid Mechanics*, Vol. 90, pp. 21~32.
- (10) Wippermann, F. K., 1985, "On the Fluid Dynamics of the Aortic Valve," *J. Fluid Mechanics*, Vol. 159, pp. 487~501.
- (11) White, F. M., 1986, *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill Book Co., 2nd ed., pp. 113~155.
- (12) Cameron, A., 1981, *Basic Lubrication Theory*, Chichester, Ellis Horwood, pp. 49~79.
- (13) Zukas, J., Cholas, T., Swift, H. F., Greszczuk, L. B. and Curran, D. R., 1982, *Impact Dynamics*, John Wiley & Sons, pp. 57~70.
- (14) Guyton, 1971, *Textbook of Medical Physiology*, W. B. Saunders Co., Philadelphia, 4th ed., pp. 153.
- (15) Guo, G. X., Xu, C. C. and Hwang, N. H. C., 1990, "Laser Assessment of Leaflet Closing Motion in Prosthetic Heart Valves," *J. of Biomedical Engineering*, Vol. 12, pp. 477~481.
- (16) Sabbah H. N. and 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.