

기계식 인공판막의 표면 부식에 영향을 미치는 가속내구시험기의 컴플라이언스 구조에 관한 연구

김동욱·이환성*·김남균**

서남대학교 보건학부 의용공학과, 일본 北海道大學 대학원 생체시스템공학전공*, 전북대학교 공과대학 생체공학과**
(1998년 3월 23일 접수, 1998년 6월 11일 채택)

Effect of Compliant Structure in the Accelerated Heart Valve Fatigue Tester on the Surface Pitting of the Disk

D. W. Kim, H. S. Lee*, N. G. Kim**

Dept. of Biomedical Engineering, College of Health, Seonam University

*Graduate School of Engineering, Hokkaido Univ

**Dept. of Bionics, College of Engineering, Chonbuk National University

(Received March 23, 1998, Accepted June 11, 1998)

요 약 : 최근 동물 또는 생체에 이식한 인공판막에 표면부식에 의한 파손 예가 보고되어 연구가 진행되고 있으나 가속내구시험에 대해서는 상세한 검토가 이루어지지 않았다. T. Yhuta 교수가 개발한 가속내구시험기를 이용하여 실험한 결과, 판막 주위의 컴플라이언스구조에 의한 부식이 진행되는 것을 관찰하였다. 본 연구에서는 컴플라이언스 구조의 위치와 크기가 다른 판막 고정용 홀더를 제작하여 컴플라이언스구조가 인공판막의 부식에 미치는 영향을 검토했다. 또한, 판막의 폐쇄속도가 표면부식에 영향을 미친다고 생각하여 고속도 비디오 카메라를 사용하여 폐쇄속도를 검토하였다. 그 결과, 컴플라이언스를 증가하면 판막의 속도도 증가하며 디스크표면 부식이 진행되는 것이 관찰됐다.

Abstract : There are various reports on the fracture of mechanical heart valves implanted in human or animals, and they are pointed out that problems are induced by an erosion of disk surface, due to a cavitation effect. We have been investigating this mechanism using accelerated fatigue tester, and it was found that erosion was enhanced by a compliance effect in the test circuit. In this study, effects of compliance value and location on erosion were discussed, while disk closing velocity was measured by a high speed video camera. It was clarified that faster closing velocity was resulting in an enhancement of erosion on the disk surface.

Key words : Mechanical heart valve, Cavitation erosion, Accelerated fatigue tester, compliance structure

서 론

1980년대에 인체 또는 동물에 이식하였던 인공판막중에서 파손된 인공판막에서 부식 핏트(pit)가 발견된 이래 인공판막의 파손 원인이 캐비테이션(Cavitation)에 있을 것이라 생각되어 이에 관한 연구가 진행되고 있다[1-4]. 종래, 인공판막의 내구

성은 가속내구시험에 의해 평가하고 있으나 표면 부식에 관해서는 거의 보고되어 있지 않다. 본 연구에서는 가속내구시험에 의한 판막 고정부의 컴플라이언스(compliance)가 캐비테이션 발생에 영향을 미친다고 생각하여 인공판막 모델을 사용하여 표면 부식을 검토했다. 현재까지는 판막고정부가 강제인 경우보다는 컴플라이언스 구조인 경우에 표면부식 핏트가 많이 발생하는 것으로 보고되어 있으나 컴플라이언스 구조의 크기 영향에 대해서는 상세한 검토가 없었다. 따라서 본 연구에서는 판막 고정부의 컴플라이언스 구조의 위치(유입측, 유출측, 양측)와 크기가 판

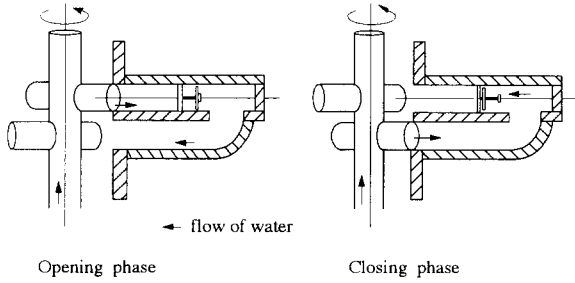


그림 1. 가속내구시험기의 메카니즘
Fig. 1. mechanism of the accelerated fatigue tester

막의 표면부식에 미치는 영향을 검토했다. 또한, 컴플라이언스의 존재가 표면부식을 진행시키는 요인을 검토하기 위해 고속 비디오 카메라를 이용하여 폐쇄속도를 조사하여 컴플라이언스 구조와의 관계를 검토했다.

시험장치

1. 가속도 내구 시험장치

실험은 T. Yuhta 교수가 개발한 가속도 내구 시험장치를 사용했다[5,6]. 실험중, 유체는 시험장치의 하부에서 유입되어 회전축을 통과하여 판막과 홀더(홀더)가 장착되어 있는 챔버(chamber)에 공급된다. 회전축에는 상호 직각의 덕트(duct)가 설치되어 회전 중에 덕트가 챔버의 유입구와 일치되면 순간적으로 유체가 덕트로 부터 챔버에 공급된다(그림 1). 축의 회전에 의해 챔버의 상하 2개의 유입구에 유체가 교대로 공급되어 판막의 개폐가 일어나며 회전축의 1회전에 의해 판막은 2회의 개폐운동이 가능하다. 본 가속도 내구 시험 장치에는 8개의 챔버가 설치되어 있어 동시에 8개의 판막의 내구시험이 가능하다. 회전축의 최대 회전속도는 2,000rpm이며 밸브의 최대 개폐속도는 4000 bpm(beats per minute)까지 가능하다. 사용 유체는 일반적으로 증류수 및 수도수가 사용되며 회전축에 공급되는 최대 공급 유량은 160L/min이며, 최고 압력 상승은 3,000mmHg이다.

2. 모델 판막

본 연구에서는 금속제의 인공심장 판막 모델을 사용하여 가속 내구 시험을 실시하였다. 인공심장 판막 모델 디스크(disk)는 직경 20mm, 두께 1mm의 듀랄루민으로 제작하였으며 하우징(housing)은 스테인레스로 제작하였다(그림 2).

가속 내구 시험에 의한 표면부식

1. 컴플라이언스 구조

판막의 컴플라이언스가 디스크 표면 부식에 미치는 영향을 검

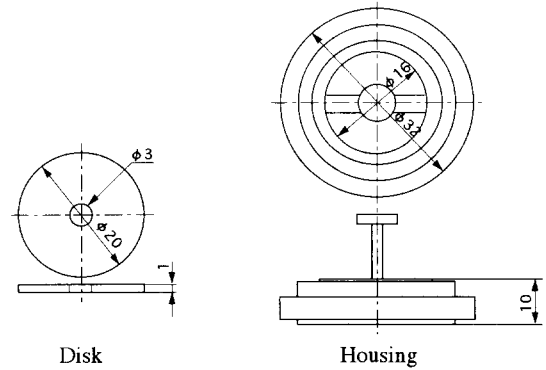


그림 2. 디스크와 하우징의 개략도
Fig. 2. Schematic drawing of a disk and a housing

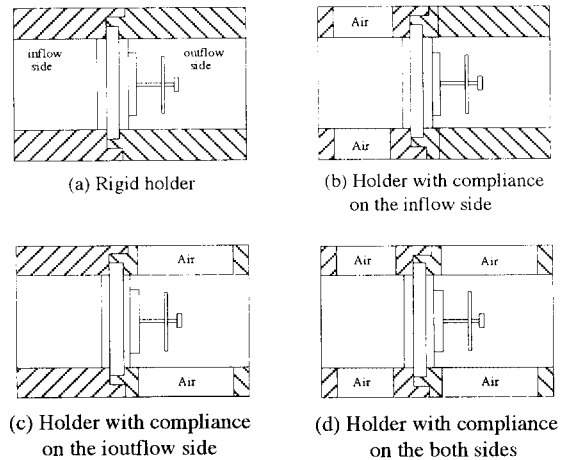


그림 3. 판막 홀더의 개략도
Fig. 3. Schematic Drawing of valve holders

토하기 위해 판막 고정용 홀더를 제작했다. 판막 고정용 홀더와 아크릴로 제작하여 홀더의 측면에 구멍을 내고 실리콘 막으로 덮은 공기실을 설치하여 컴플라이언스를 부가했다. 시험에 사용된 실리콘 막의 특성은 인장강도 8.8Mpa, 신장률 330%, 압축 영구 변형률 16%이다.

본 실험에서는 강제 홀더(그림 3a)와 홀더의 유입측에 컴플라이언스를 설치한 4종류의 홀더(그림 3b), 유출측에 컴플라이언스를 설치한 3종류의 홀더(그림 3c), 양측에 컴플라이언스를 설치한 10종류의 홀더(그림 3d)등 전체적으로 18종류의 홀더를 제작하여 실험하였다.

컴플라이언스의 측정은 시험 챔버에 홀더를 장착하고 챔버에 공급되는 유량변화에 대한 압력변화로 부터 계산하였다.

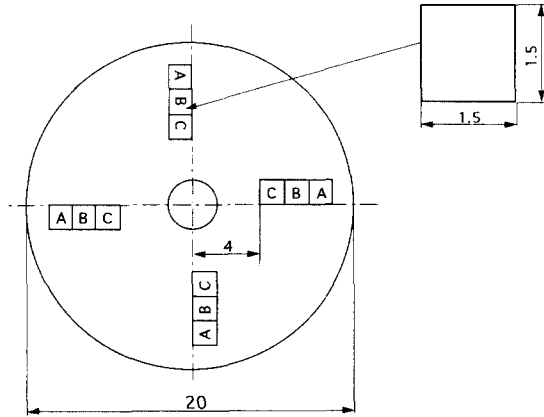


그림 4. 핏트수를 세기 위한 구역 분할
Fig. 4. Area for taking count of pits

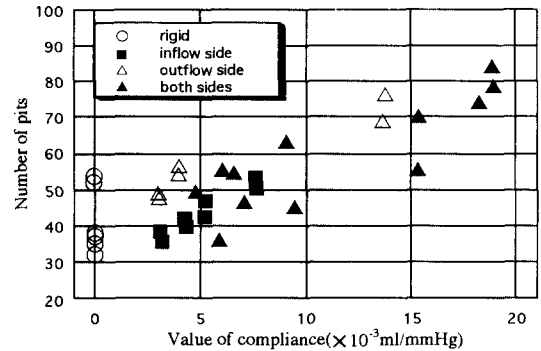
2. 실험조건 및 부식 평가

디스크의 개폐 수는 600beats/min, 작동유체로는 상온의 수돗물, 공급유량은 120L/min의 조건에서 15시간동안 계속 작동하였다. 디스크에 발생하는 표면부식을 정량적으로 평가하기 위하여 디스크 표면에 발생하는 핏트의 수를 조사하였다. 디스크의 중심에서 반경방향으로 4, 5.5, 7mm의 위치에 각 변이 1.5mm인 정사각형 영역(A, B, C)을 4곳에 설치하였다(그림 4). 실험 후, 광학 현미경을 이용하여 확대사진을 촬영하여 직경 30µm이상의 부식 핏트 수를 평균하여 부식을 정량적으로 비교 평가하였다.

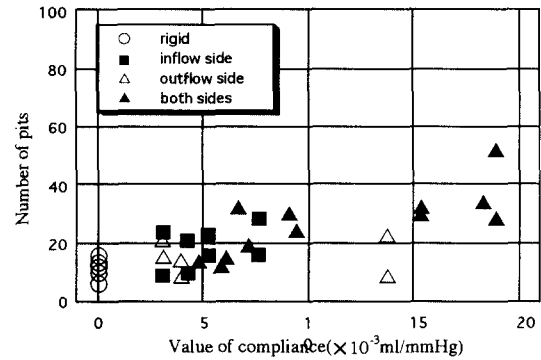
3. 실험결과

컴플라이언스의 크기와 디스크 표면 부식 핏트의 관계를 그림 5에 표시하였다. 그림중의 ○는 강제 홀더, ■는 유입측, △는 유출측, ▲는 양측에 컴플라이언스를 부가한 홀더의 실험 결과를 나타낸다. 설정영역 A(disk의 원주부)의 경우(그림 5a), 컴플라이언스가 증가하면 부식 핏트수도 증가하였다. 강제 홀더를 제외하고는 컴플라이언스에 대하여 부식 핏트가 거의 선형적으로 증가하는 것이 관찰되었다. 또한, 컴플라이언스의 위치는 부식 핏트 수에 그다지 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 강제 홀더의 경우에는 부식 핏트수의 편차가 크며 강제와 컴플라이언스가 $10 \times 10^{-3} \text{ml/mmHg}$ 이하의 홀더에서는 핏트수의 유의차는 관찰되지 않았으나, 컴플라이언스가 $10 \times 10^{-3} \text{ml/mmHg}$ 이상인 경우에는 강제보다 컴플라이언스를 부가한 홀더의 경우가 핏트발생이 많았다. 디스크의 안쪽 영역 B(그림 5b), C(그림 5c)의 경우에는 핏트의 절대 수는 영역A보다 적게 발생하였으며, 영역A보다는 경향이 명확하지는 않지만 컴플라이언스의 증가에 따른 핏트 수는 약간 증가하는 추세였다.

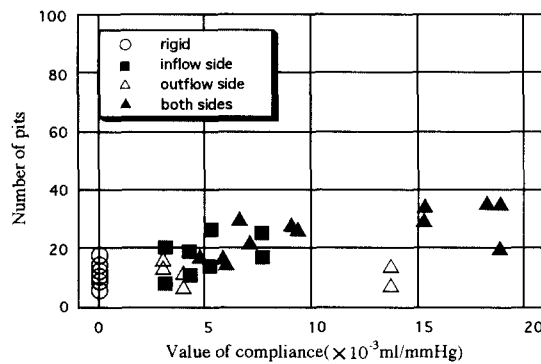
이상의 결과는 직경 30µm이상의 부식 핏트를 대상으로 검토



(a) Area A



(b) Area B



(c) Area C

그림 5. 컴플라이언스 구조에 따른 핏트수
Fig. 5. Relations between valve of compliance and number of pits

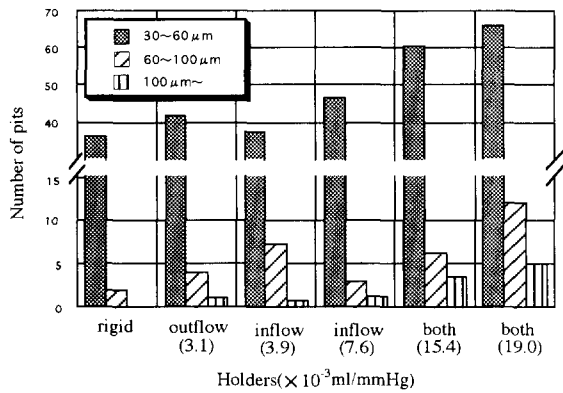


그림 6. 핏트의 크기에 따른 분류
Fig. 6. Number of pits classified by size

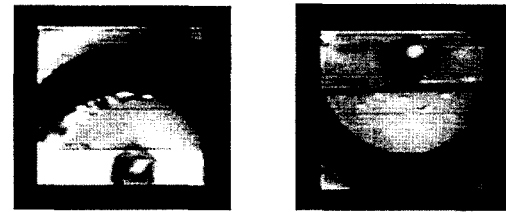
하였으나, 부식을 정확하게 평가하기 위해서는 핏트수 뿐만 아니라 핏트의 크기도 고려하지 않으면 안 된다. 따라서 본 연구에서는 직경이 30~60μm, 60~100μm, 100μm이상의 3개로 분류하여 검토하였다. 설정영역 A의 결과를 그림 6에 표시하였다. 강제 홀더에서는 직경 100μm이상의 핏트는 발생하지 않았다. 또한, 컴플라이언스가 증가함에 따라서 직경 100μm이상의 핏트수도 증가하였다. 일부의 홀더에서는 정반대의 경향이 관찰 됐으나 60~100μm경우에도 컴플라이언스가 증가함에 따라 핏트수도 증가하였다. 컴플라이언스가 증가함에 따라 부식 핏트수 뿐만 아니라 직경이 큰 핏트의 발생이 많았다. 이 경우에도 컴플라이언스 부가 위치에 의한 영향은 관찰되지 않았다.

컴플라이언스와 디스크의 폐쇄 속도

1. 시험방법

3절에서 논의한 것처럼 컴플라이언스의 증가에 따라 부식 핏트 수 역시 증가하는 것이 관찰되었다. 현재, 인공판막과 하우징 사이의 접근속도 또는 충돌속도가 캐비테이션 발생에 중요한 요소라고 보고되었다[7]. 컴플라이언스의 부가가 디스크의 폐쇄속도에 영향을 미친다고 생각하여 disk의 운동을 고속 비디오 카메라로 촬영하여 검토하였다. 촬영은 강제 홀더와 유출측에 컴플라이언스를 부가한 홀더 3종류(2.9~7.8×10⁻³ml/mmHg), 유입측에 컴플라이언스를 부가한 홀더 4종류(3.1~7.6×10⁻³ml/mmHg), 양측에 컴플라이언스를 부가한 홀더 9종류(6.8~20.2×10⁻³ml/mmHg)로 전체적으로 17종류의 홀더에 대해 실시하였다.

실험 중에 디스크의 폐쇄운동의 관찰이 용이하도록 챔버의 측면을 아크릴로 하여 시간 분해능 30~40500frames/sec의 고속 비디오 카메라 시스템(Kodak, HS Motion Analyzer, Model 4540)을 이용하여 디스크의 측면운동을 기록하여 폐쇄속도를 검토하였다. 디스크의 측면운동은 13500frames/sec로 촬영하였



(a) (b)

그림 7. 디스크상에 발생한 캐비테이션 기포
Fig. 7. Cavitation bubbles on the disk

다. 캐비테이션은 디스크의 폐쇄직전 혹은 직후에 발생한다고 생각하여 disk가 폐쇄하기 직전의 2 frames(0.15×10⁻³sec)의 디스크 위치변화에서 디스크의 속도를 계산하였다. 또한, 실험 중에 캐비테이션 기포를 관찰하기 위하여 disk의 정면을 40500 frames/sec로 촬영하였다.

2. 결과

1) 캐비테이션 기포

디스크의 정면영상(40500frames/sec)에서 디스크가 폐쇄할 때 기포가 발생·붕괴하는 과정이 관찰되었으며, 이를 그림 7에 나타냈다. 디스크의 일부분과 디스크의 가이드 핀의 지지부가 그림 7a의 하부에, b의 상부에 촬영되었다. 즉, 그림 7a는 디스크의 상단 그림 7b는 하단을 촬영한 것이다. 기포의 발생 위치는 매 폐쇄 때마다 다르게 관찰되었다. 그림 7a의 디스크 상단 외측의 하얀 부분과 b의 디스크 내측에 보이는 하얀 점이 기포의 영상을 표시한다. 여러 가지 경우를 관찰한 결과 기포는 디스크의 상단 외측에서 주로 발생하는 것을 알 수 있었다. 기포가 발생하여 붕괴할 때까지의 시간은 발생 기포의 크기에 따라 다르나 약3~6 Frames(7.4×10⁻⁵~1.5×10⁻⁴sec)정도이었다. 기포가 극히 짧은 시간 내에 소멸하는 것을 고려하면 이 기포는 캐비테이션에 의하여 발생한 것으로 생각되어진다[1,8,9]. 디스크의 원주부에 직경 3mm이상의 기포가 발생하였으며, 이는 부식 핏트의 분포와 일치하고 있어 디스크 표면에 발생된 부식 핏트는 캐비테이션에 의한 것이라고 생각할 수 있다.

2. 디스크의 폐쇄속도

디스크의 폐쇄속도를 디스크 운동 영상으로부터 검토하였다. 폐쇄중의 디스크의 측면운동을 시간 경과에 따라 그림 8a, b, c에 디스크운동의 모식도를 그림 8d에 나타냈다. 폐쇄중의 디스크는 가이드 핀을 따라 평행운동이 예상되나 영상으로부터 기울기가 발생하는 것이 관찰되었다. 디스크가 폐쇄하기 직전 2 frames(0.15×10⁻³sec)의 폐쇄속도를 조사하여 컴플라이언스와의 관계를 검토하였다.

디스크상단의 속도를 그림 9a에, 하단의 속도를 그림 9b에 표시하였다. 상단의 경우, 유입측에 컴플라이언스를 부가한 홀더에

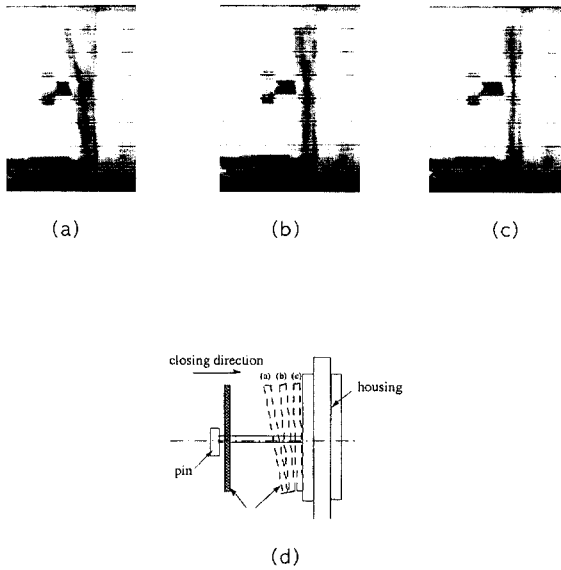


그림 8. 디스크 폐쇄시의 디스크 운동 모습
Fig. 8. Disk movement in the closing phase

서는 컴플라이언스의 증가에 따라 폐쇄속도가 저하하는 경우가 있었으나, 전체적으로는 컴플라이언스의 증가에 따라 폐쇄속도가 증가하는 것이 관찰되었다. 컴플라이언스가 어느 정도 증가하면 강제 홀더보다도 폐쇄속도가 증가하였다.

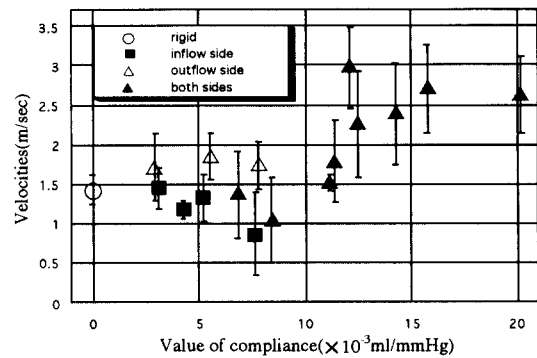
디스크의 하단의 경우, 상단의 경우 모두 거의 동일하나 상단보다는 폐쇄속도가 작다. 그리고, 유입측에 컴플라이언스를 부가한 경우, 컴플라이언스가 증가함에도 불구하고 폐쇄속도에는 큰 변화가 관찰되지 않았다.

고 찰

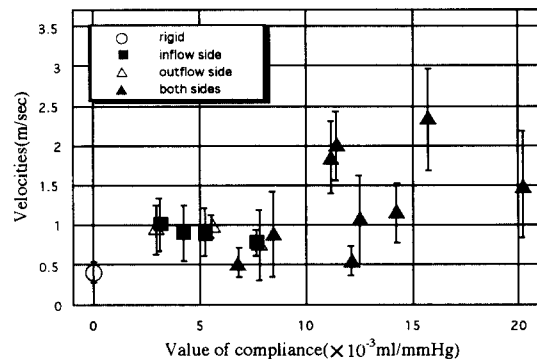
1. 캐비테이션의 발생

고속 비디오 카메라를 이용하여 캐비테이션 기포의 발생을 관찰할 수 있었다. 현재 인공심장 판막 표면에 캐비테이션이 발생하는 원인으로는 ① 판막의 폐쇄후의 역류에 의한 벤츨리 효과, ② 수격(water hammer), ③ 폐쇄직전의 판막과 하우징 사이에서의 squeeze flow등이 고려되어지며 특히, squeeze flow, 수격 현상이 중요시되며, squeeze flow, 수격현상은 거의 동시에 발생한다[7].

본 연구의 결과 캐비테이션 기포는 디스크가 폐쇄하는 직전 혹은 직후에 발생하며 역류에 의한 것은 아니라고 생각되어진다. 기포와 핏트는 디스크가 하우징에 충돌하는 부분 보다 안쪽에 발생하는 것으로 보아 충돌에 기인 하였다고 생각되어진다. 디스크의 안쪽(영역 B, C)에서는 squeeze flow의



(a) Upper side



(b) Lower side

그림 9. 컴플라이언스 값과 디스크 폐쇄속도의 관계
Fig. 9. Relations between valve of compliance and closing velocity of disk

영향이 적어, 영역 A와 비교하면 표면 부식 핏트가 적게 발생하였다고 생각되어진다. B, C 영역에서 핏트수의 차이가 적은 것으로 보아 부식 핏트의 주원인은 위치에 의존하지 않는 캐비테이션에 의한 것으로 생각되어진다. 이전의 연구에서 디스크로부터 25mm떨어진 부분에서 측정된 결과 강제 홀더에서는 수격현상이 발생하였으나, 홀더에 컴플라이언스를 부가하면 수격현상이 소멸되는 것이 관찰되었었다[6]. 그러나 캐비테이션 발생의 임계치는 밸브 폐쇄 직전의 밸브 앞부분(홀더의 유입측)의 압력 변화 dp/dt로 결정하며, dp/dt는 밸브의 종류 및 크기에 의존하나 일반적으로 1500~4000mmHg/sec 정도라고 보고되어있다[1]. 본 연구에서는 가속도 내구 시험이기 때문에 컴플라이언스를 부가하면 수격현상은 소멸되나 dp/dt가 25,000 mmHg/sec이상이면 캐비테이션이 발생된다고 생각할 수 있다[5]. 그러나 컴플라이언스의 부가에 따른 캐비테이션 발생을 확인하기 위해서는 밸브가 폐쇄할 때의 밸브 뒷부분(홀더의 유출

측)의 표면 근방의 압력 변화를 측정하여 -1기압 이하의 압력 저하가 발생하는지를 검토할 필요가 있다고 본다. 이외에도 폐쇄할 때의 디스크가 하우징에 충돌한 후 디스크가 반동(rebound)되며 이로 인한 진동이 캐비테이션 발생에 영향을 미치는 것도 고려되나 아직 상세한 검토는 이루어지고 있지 않다.

2. 표면부식 디스크의 폐쇄속도

현재, 캐비테이션에 의한 표면부식에는 디스크의 폐쇄속도가 영향을 미치는 것이 보고되고 있으며 캐비테이션 발생의 임계치를 dp/dt 로 평가하고 있다[7]. 본 연구의 결과, 홀더에 컴플라이언스를 부가함에 따라 표면부식이 진행되고 컴플라이언스가 증가하면 표면부식도 증가하였다. 이전의 연구에서는 컴플라이언스를 부가하면 압력변화가 완만하게 되고, 그 결과 디스크의 폐쇄속도가 감소되리라 생각되었다[6]. 그러나 본 연구의 결과, 컴플라이언스의 존재가 폐쇄속도를 증가시키는 것이 관찰되었다. 폐쇄속도의 증가가 캐비테이션의 진행에 관련되어 있는 것을 쉽게 이해할 수 있다. 따라서 가속내구 실험에서는 판막 부근의 컴플라이언스 존재가 폐쇄속도를 증가시키고, 이것이 캐비테이션에 의한 디스크의 표면부식을 진행시켰다고 생각되어진다. 특히, 조사한 범위 내에서는 컴플라이언스가 클수록 부식이 많았으며, 지금까지는 가속내구시험에서는 거의 고려하지 않았던 요소였으나 실험결과에는 큰 영향을 미치는 것이 관찰되었다. 그러나 본 연구의 폐쇄속도의 검토는 핏트수를 검토한 실험과는 별개의 홀더를 사용하여 내구시험은 15시간(5.4×10^5 사이클)후의 결과이나 디스크의 폐쇄속도는 디스크의 3~6사이클의 화상으로부터 평균하여 얻은 결과이나, 전반적인 경향에서는 컴플라이언스가 증가하면 폐쇄속도도 증가하는 경향이 분명하며 컴플라이언스가 폐쇄속도의 증가에 기여한다고 생각되어진다.

이와 같이 판막의 폐쇄속도의 증가가 캐비테이션의 진행과 관련이 있는 것으로 확인되었다. 폐쇄속도의 상승은 squeeze flow와 수격에 대해서 모두 캐비테이션을 진행시키며 디스크의 진동에 대해서도 동일하게 작용한다고 생각된다. 그러나 컴플라이언스의 존재가 폐쇄속도를 증가시키는 메커니즘에 대해서는 아직 분명하지는 않다. 현재, 컴플라이언스 구조에 출입하는 유체의 위상과 디스크의 운동의 위상에 의해 디스크가 폐쇄하기 직전에 디스크를 가속시키고 있으리라 생각되어지나, 이것을 조사하기 위해서는 가속내구 시험기의 구동 수를 변화시켜 시험을 수행할 필요가 있다고 생각되어진다. 또한 본 연구에서 제작한 컴플라이언스 구조는 혈관의 컴플라이언스와는 다르므로 앞으로 컴플라이언스 구조의 신뢰성을 검토할 필요가 있다고 생각되어진다.

결 론

기계식 판막의 가속 내구 실험시 캐비테이션에 의한 표면부식

을 컴플라이언스구조의 크기에 주목하여 검토하였다. 디스크 고정용 홀더에 공기실을 설치하여 컴플라이언스를 부가하여 가속내구 시험을 행함으로써 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 조사한 범위 내에서는 컴플라이언스가 크면 클수록 부식 핏트가 증가하였으며 특히, 직경이 큰 핏트가 증가하였다.
- 2) 디스크의 운동을 촬영한 화면으로부터 디스크표면에 캐비테이션 기포가 발생하는 것을 확인하였다.
- 3) 컴플라이언스가 크면 클수록 디스크의 폐쇄속도가 빠르게 되었다.

참 고 문 헌

1. Mark C. S. Shu, Leonard H. Leuer, Thomas L. Armitage et. al., "In Vitro Observations of Mechanical Heart Valve Cavitation", J. Heart Valve Disease, Vol. 3. Supplement I S85-S93 April 1994.
2. Thomas Graf, Helmut Reul et. al., "Cavitation of Mechanical Heart Valve Under Physiologic Conditions", J. Heart Valve Disease, Vol. 1. No.1, pp. 131-141, September 1992.
3. W. Klepetko, MD et. al., "Leaflet fracture in Edwards-Duromedics bileaflet valves", J. Thorac. Cardiovasc. Surg. 97:, pp. 90-94, 1989.
4. R. Kafesjian et. al., "Cavitation Damage of Pyrolytic Carbon in Mechanical Heart Valve", J. Heart Valve Disease, Vol. 3 Supplement I S2-S7, April 1994.
5. 下岡 聰行, 村林 俊, 三田村 好矩, 勇田 敏夫, "加速耐久試験における人工弁ディスクの表面壞食", 人工臓器25(3), pp. 590-595, 1996.
6. Toshio Yuhta, Yoshinori Mitamura, Tomoyuki Takura, Yukiaki Kikuta, Toshiyuki Shimooka, Ikuya Nishimura, Dong-Wook, KIM, "A super-accelerated fatigue device for testing artificial heart valves", J. Heart Valve Disease(in press)
7. Z. Jon Wu, Ying Wang, Ned H. C. Hwang, "Occlude Closing Behavior: A Key Factor in Mechanical Heart Valve Cavitation", J. Heart Valve Disease, Vol. 3. Supplement I S25-S34, April 1994.
8. Robert T Knapp, James W Daily, Frederick G Hammitt, CAVITATION, Institute of Hydraulic Research, University of IOWA, 1979.
9. Christopher E. Brennen, Cavitation and Bubble Dynamics, Oxford University press, 1995.