

기계식 인공심장밸브의 캐비테이션

이 중 선*

1. 서 론

기계식 인공심장밸브가 닫히는 순간에 갑작스러운 수격현상(water hammer)으로 인하여 밸브의 출구부에는 큰 압력이 걸리며 입구부에는 큰 음압이 걸린다. 밸브 입구부에 형성되는 음압(negative pressure)으로 인하여 캐비테이션(cavitation; 기포발생)의 가능성이 있다. 캐비테이션은 압력이 증기압(vapor pressure) 이하로 떨어질 때 갑작스럽게 국부적인 기포가 생성되는 현상이며 음압이 사라질 경우 기포가 갑작스럽게 터짐으로서 혈액과 밸브 표면에 손상을 주게 된다.

환자에게서 추출된 기계식 심장밸브의 표면 손상에 관한 임상보고가 심장밸브의 캐비테이션에 관한 연구에 관심을 불러 일으켰다. 본 논문에서는 다양한 종류의 기계식 인공심장밸브에 대하여 캐비테이션 발생과 소멸에 관해 연구하였다.

2. 실험방법

그림 1의 In Vitro 실험장치를 통하여 기계식 인공심장밸브의 닫힘 현상을 모사 하였다. 밸브가 닫히는 순간에 밸브 입구표면 근처의 압력을 측정하였으며 기포의 발생과 소멸 사진을 현상하였다. 솔레노이드 밸브를 사용하여 모의 좌심실에 압력을 가함으로써 밸브의 닫힘 운동을 시작시켰다. 밸브의 닫힘 운동은 좌심실의 압력증가율(ventricular pressure rise rate; dp/dt)에 관계하므로 세 가지 크기의 압력증가율 750, 1500, 3000 mmHg/sec에 대하여 각각 실험하였다. 밸브의 닫힘 운동은 유체의 점도보다는 비중에 의존하므로 혈액과 비중 및 증기압이 유사한 증류수를 사용하였다. 증류수의 미세 기포를 제거하기 위해 하루 이상 실내에서 보관한 후 실험을 수행하였다.

암실에서 사진기의 셔터를 열어놓고 스트로브 시스

템을 사용하여 밸브가 닫히는 순간에 밸브 입구에서의 사진을 수십 마이크로 초 간격으로 찍어 기포 발생과 소멸을 관찰하였다. 밸브가 닫히는 순간을 포착하기 위하여 모의 좌심실의 압력변환기의 압력 스파이크를 트리거 신호로 사용하였고 스트로브가 터질 때 포토다이오드의 신호로부터 사진이 찍히는 순간을 정확히 알 수 있었다.

또한 극소형 압력변환기를 밸브 입구 근처 2mm 까지 근접시켜서 닫히는 순간의 압력(음압)을 밸브 판막 입구표면의 여러 부위에 대하여 측정하였다(그림 2).

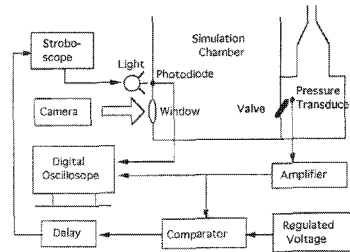


그림 1. 압력측정 및 사진현상용 실험장치

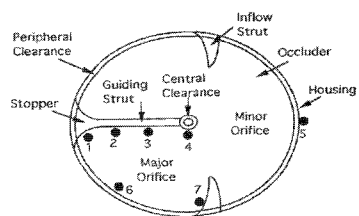


그림 2. Medtronic Hall 밸브 입구부의 압력 측정점

3. 결 과

29mm의 suture ring 지름을 갖는 Medtronic Hall (MH) 밸브 입구에서의 압력 측정 결과 및 기포발생 사진을 그림 3과 4에 나타내었다($dp/dt=3000\text{mmHg/sec}$). 그림3의 압력 측정점의 위치는 그림 2에 도시되었다. 밸브가 닫히는 순간, inflow 측정점 1 및 2의 압

* 한동대학교 기계제어시스템공학부

력이 증기압(약 -700mmHg) 근처로 떨어지는 것을 관찰할 수 있다. 낮은 압력의 지속시간은 약 400 msec이며 이것은 그림 4의 사진으로부터 관찰한 기포의 발생 지속 시간 및 장소(측정점 1, 2 부근) 거의 일치하였다. 그러므로 관찰된 기포는 밸브가 닫히는 순간, 갑작스러운 음압으로 인해 발생한 캐비테이션이라고 추론할 수 있다. 좌심실의 압력증가율(dp/dt)을 조정할 경우 음압의 지속시간과 기포의 발생 지역이 변화하였다.

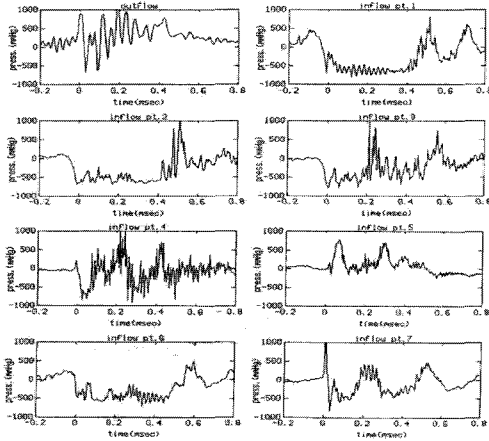


그림 3. Medtronic Hall 밸브가 닫히는 순간의 압력측정 결과 (dp/dt=3000mmHg/sec)

MH 밸브의 경우, 캐비테이션 발생 원인은 밸브 판막(occluder)이 밸브 스톱퍼(stopper)를 때리면서 닫힐 때 유체가 압착(fluid squeezing)되면서 큰 속도장이 발생하고 이에 따른 압력의 감소에 기인한다고 판단된다. 밸브 판막과 밸브 하우징 사이의 좁은 간격에서도 기포가 관찰되는데, 이는 좁은 간극(valve clearance)을 통하여 유체가 흐를 때 생기는 압력강하에 따른 기포 발생으로 판단된다. 그림 5에는 여러 종류의 밸브에 대하여 밸브가 닫힌 직후, 캐비테이션 강도가 가장 최고점에 이르렀을 때의 사진을 도시하였다. 스톱퍼 근처와 간극 근처에서 기포발생을 관찰할 수 있다. 기포의 발생 강도는 밸브의 설계에 따라 차이가 있었다.

실제의 밸브는 유연한 혈관 또는 좌심실에 부착되므로 밸브가 닫히는 순간에 수격현상에 의한 압력충격이 약화될 것이다. 본 연구에서는 이러한 영향을 알아보기 위하여 유연한 재료의 밸브 지지대를 사용하여 동일한 실험을 수행하였다. 그 결과, fluid squeezing에 의한 캐비테이션은 영향을 받지 않았으나 간극을 통해 발생하는 캐비테이션은 약화되었다.

4. 결 론

기계식 인공심장밸브의 캐비테이션 발생을 In Vitro 실험을 통하여 관찰하였다. 좌심실 압력증가율을 사람의 경우와 비슷한 750 mmHg/sec로 하였을 때도 기포가 발생하였다. 기포발생시에는 증기압과 비슷한 크기의 음압(-700 mmHg/sec)이 측정되었으며 음압 및 기포의 지속시간은 수백 마이크로 초로 관찰되었다. 캐비테이션의 주 발생 원인은 밸브 판막과 밸브 스톱퍼 사이의 압착으로 발생하는 제트 때문이었으며 밸브 판막과 하우징 사이의 간극에서의 압력강하 때문에도 발생하였다. 유연한 밸브 지지대를 사용할 경우에는 후자에 의한 기포발생은 현저히 줄어들었다.

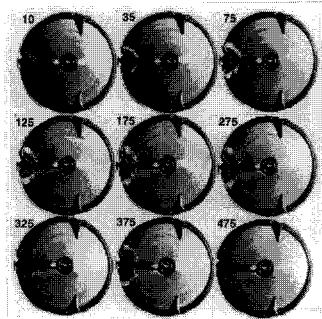


그림 4. Medtronic Hall 밸브가 닫히는 순간의 기포 발생과 소멸 사진 (dp/dt=3000mmHg/sec, 각 사진 상단의 숫자는 밸브가 닫힌 시각으로부터의 경과시간임 ; 단위 μ sec)

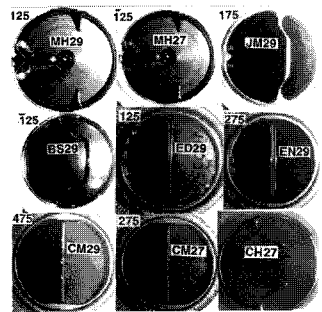


그림 5. 각종 기계식 인공심장밸브가 닫히는 순간 기포발생이 최고 강도에 이르렀을 때의 사진 dp/dt=3000mmHg. (MH29, Medtronic Hall 29mm ; MH27, Medtronic Hall 29mm ; JM29, Jomed 29mm ; BS29, Bjork Shiley 29mm ; ED29, Edwards Duromedics old model 29mm ; EN29, Edwards Duromedics new model 29mm ; CM29, Carbomedics 29mm ; CM27, Carbomedics 27 mm ; CH27, Chitra 27mm)