

# 좌심방압 변화가 좌심실보조기 박출량에 미치는 영향에 대한 연구

최진욱, 이상우, 정찬일, 김화룡, 이연길,  
이계한, 김철생, 민병구

서울대학교 의과대학 의공학교실

## Effect of Low Left Atrial Pressure on the Pump Output of Left Ventricular Assist Device

JW Choi, SW Lee, CI Jung, HR Kim, YK Lee, KH Lee,  
CS Kim, BG Min

Department of Biomedical Engineering  
College of Medicine  
Seoul National University

### 요약

심부전 환자의 심근회복을 도울 수 있는 장비인 전기유압방식 좌심실보조기를 개발하였다. 좌심실보조기는 혈액펌프, 압력펌프, 제어기로 구성되어 있으며, 혈액펌프에 내장된 혈액주머니는 동물실험을 위하여 50 ml의 크기로 제작하였다. 좌심실보조기의 성능평가를 위하여 최대 박출량을 측정하고 있으나 실험실에서 측정된 값은 동물 실험에서 관찰되는 것보다 일반적으로 증가된 박출량을 보이게 된다. 이는 생체에서는 좌심방의 체적이 박동 주기에 따라 변하여 좌심실보조기가 받아들일 수 있는 유효 혈액량이 변하는 반면, 모의순환장치에서는 좌심방을 단순 저장고로 사용하기 때문에 좌심방의 박동주기에 따른 체적변화를 감안하지 못하여 생기는 것이다. 본 실험에서는 모의순환 장치에 체적변화 가능한 100ml 크기의 좌심방을 연결하여 좌심방으로 들어오는 혈류량이 제한된 동물실험 상황을 모방하였다. 좌심실보조기의 제어방식중 수축기 이완기 비율(SD 비율)변화에 따른 좌심방 음압발생효과를 관찰한 결과 SD 비율을 40 %로 유지하면 행정거리가 클 때 좌심실의 음압발생을 줄일 수 있는 것을 관찰하였다.

### 1. 서론

좌심실 보조기(Left Ventricular Assist Device, LVAD)는 "좌심방 또는 좌심실과 대동맥 사이에 위치하여 자연심장의 혈액 일부를 담당하여 박출해 줌으로써 좌심실 기능의 일부를 대신하는 장비"를 말한다. 미국통계에 의하면 매년 백만명당 5000명은 급성심근경색증이 발병하는 것으로 되어 있으며, 백만명 중에서 2000명은 심부전으로 사망하고, 8000명은 치료될 수 있는 수준의 심부전 상태에서 고통받고 있는 것으로 되어 있다. [1] 1984년에는 평균해서 세계적으로 인구 백만명당 234명이 심장수술을

받은 것으로 나타나 있다. 특히 개심술 후 심부전증의 빈발도는 약 1%정도 되는데 이 환자 모두 좌심실보조기의 도움이 필요한 사람들이다.

좌심실보조기를 평가하기 위하여 실험실에서 모의순환장치를 구성하여 좌심실보조기의 분당 박출량을 측정하는 방법이 널리 쓰이고 있다. 좌심실보조기의 박출량이 사람에 적용한 경우에는 심박출량을 체표면적으로 나눈 지표인 심계수(Cardiac Index, L/min/m<sup>2</sup>)가 2.0이상을 유지하여야 한다는 임상적경험을 근거로, 보조기의 성능 평가에서는 개발된 좌심실보조기가 낼 수 있는 최대 박출량을 가장 중요한 자료로 삼는다.

그러나 동물 실험결과와 모의순환 실험결과를 비교해보면, 좌심실보조기의 박출량이 동물실험에서는 현저하게 감소되어 있는 것을 알 수 있다. 모의순환 실험에서 비점성유체를 사용함으로써 박출량의 차이가 생길 수 있는 것과, 생체에서 볼 수 있는 좌심방의 체적변화를 고려하지 못하여 생기는 것이 동물 실험과의 차이를 초래하는 가장 큰 이유이다.

모의순환장치에서는 후부하에 따른 보조박출량의 변화를 관찰하여 동물실험에서 좌심실보조기의 보조 혈류량을 예상할 수 있다. 그러나 동물의 경우 좌심실의 이완에 의하여 좌심방의 혈액이 유입되는 효과와 좌심방 자체의 수축력에 의하여 혈액이 이동하는 현상때문에 좌심방내에서도 혈류는 박동성을 나타내게 된다. 따라서 좌심방에 혈액을 받아들이는 관을 연결한 동물실험의 경우에는 실제 좌심실보조기가 받아들일 수 있는 혈액이 좌심방내부에 충분치 않은 상태가 된다. 이와 같은 이유로 동일한 좌심방압을 유지하는 상태라도 동물실험 결과보다 모의순환 장치의 실험결과가 보조혈류량이 많은 결과를 보이게 된다.

본 실험에서는 모의순환 장치의 좌심방에 추가로 약 100ml 크기의 좌심방(collapsible LA)을 연결한 후 좌심방에서 받아들일 수 있는 혈류를 제한하여 동물실험 때와 비슷한 현상을 관찰할 수 있도록 하였다. 좌심방의 혈류가 감소된 경우에는 생체 좌심방을 모방하기 위하여 새로 연결된 좌심방(collapsible LA)에서 함입현상에 발생되어 동물실험 때와 비슷한 좌심방압의 변화를 관찰할 수 있도록 하였으며, 좌심방에서 음압이 발생하지 않는 상태를 유지하도록 하면서 좌심실보조기의 작동 방식을 결정하는 실험모델로 이용하였다.

## 2. 실험 재료 및 방법

### 1) 한국형 좌심실보조기의 구성

한국형 전기유압식 좌심실보조기는 혈액펌프, 압력펌프, 제어기의 3부분으로 구성되어 있다.

혈액펌프는 좌심방 또는 좌심실로부터 혈액을 받아들이고 대동맥으로 혈액을 보내주는 역할을 하며, 혈액주머니, 고분자판막, 혈액펌프몸체로 이루어져 있다.

압력펌프는 압력전달용 오일을 담고 있는 폴리우레탄 벨로우즈와 벨로우즈를 왕복운동시키는 모터로 구성되어 있다. 모터는 40W의 DC모터(Sanyo, Japan, 106-60001-1, 24V)를 사용하였으며 모터의 회전운동이 볼 스크류(THK, Japan, lead 2mm)를 통해서 왕복운동으로 바뀌어 벨로우즈에 전달되고, 벨로우즈 내부에 있는 오일은 벨로우즈의 움직임에 의하여 내부의 오일을 혈액펌프쪽으로 이동시켜 혈액주머니를 수축, 이완시키도록 되어 있다.

제어기는 주제어부로부터 회전방향(Direction) 속도제어신호(PWM), 정지 및 운전개시(start/stop) 신호를 받아 이에 따라 전동기에 적절한 전류를 공급하여 구동하는 전동기 구동부와 좌심실보조장치의 동작상태감시 및 전동기 구동에 필요한 명령의 출력, 제어콘솔로부터의 명령 입력 등의 기능을 수행하는 주제어부와 사용자로부터 명령을 받는 제어콘솔로 구성되어 있다.

### 2) 모의 순환 장치의 구성

모의 순환장치는 10mm 두께의 아크릴로 제작되었으며, 좌심방부와 대동맥부의 두 부분으로 나누어져 있다. 유체는 좌심방부로부터 나와 좌심실보조기의 혈액주머니로 들어간 다음 좌심실보조기에 의하여

대동맥부로 보내지게 되어 있다. 대동맥부로 보내진 유체는 내경변화를 줄 수 있는 볼밸브를 지나고 부유형 유량계(Tokyo Flow Meter Co. FC-A20-ACNF)를 통하여 다시 좌심방부로 들어가게 된다.

동물실험때와 같은 상태를 유지하면서 모의순환 실험을 하기 위하여 좌심방부를 다음과 같이 변화시켰다.

좌심실보조기가 연결되어 유체를 받아들이는 좌심방부에 100ml 크기의 주머니를 중간에 연결하여 좌심실보조기가 한번에 받아들일 수 있는 유체의 양을 제한하였다. 100ml 크기의 좌심방은 투명한 아크릴상자에 들어 있으며 압력에 의하여 좌심방의 크기를 조절할 수 있도록 하였다. 모의순환 장치와 새로 연결된 좌심방사이에 밸브를 설치하여 좌심방으로 유입되는 유체의 양을 조절할 수 있도록 하였다.

### 3) 모의 순환 실험

동물실험에 쓰이는 개의 체중(20 kg)에 맞도록 50ml 작은 혈액주머니를 사용하여 모의 순환 실험장치에서 보조 유량을 측정하였다. 캐놀라는 유입구쪽과 유출구쪽 모두 9.18 mm 크기의 PVC관을 사용하였으며 혈액펌프의 유입구쪽에는 내경 19.5 mm의 Björk-Shiley 금속판막을 사용하였고, 출구에는 내경 19 mm의 고분자판막을 사용하였다.

먼저 전부하에 해당하는 좌심방압을 약 20mmHg로 고정시켜놓고 후부하를 75에서 125mmHg로 변화시키면서 좌심실보조기의 박동수 증가에 따른 보조 유량을 전기자기형 혈류계(Electromagnetic blood flowmeter, CME 701D)를 이용하여 측정하였다.

체적변화 가능한 좌심방을 연결한 모의순환 실험에서는 좌심방압을 20mmHg, 10mmHg로 변화시키면서 측정하고, 유입구의 내경을 좁혀서 좌심방의 유입혈류를 제한한 상태에서 보조혈류량 및 대동맥 압력 파형, 벨로우즈 내부압력 파형, 전류 파형 등을 physiograph(Device Ltd MX6-58)에서 측정 기록하였다.

좌심실보조기는 행정거리를 모터의 신호기에서부터 나온 신호 숫자로 표시하게 되어 있으며, 모터의 1회전마다 200개의 신호가 발생된다. 실제 모터에 의해서 움직인 거리는

신호기의 숫자

x 볼스크류 Lead ( 2 mm)

200

로부터 산출될 수 있으며, 모의 순환 실험에서는 행정거리를 신호기 숫자 800에서 1600까지 변화시켜 가면서 실험하였다.

### 3. 실험 결과

1) 좌심방이 변화되지 않은 모의순환 장치의 보조혈류량

좌심방부에 변화를 주지않은 모의순환실험에서 보조유량은 행정거리에 비례하여 증가하는 양상을 보여주고 있다.(그림 1) 행정거리를 800에서 1300 까지 변화시켜 가면서 측정하였을 때 보조박출 유량은 1.4 L/min에서 4.0 L/min 까지 얻을 수 있었으며, 박출 압력을 높일 수 있는 전기유압방식의 영향으로 후부하(afterload)에 민감하지 않은 박출량의 변화를 보여주고 있다.

2) 좌심방이 변화된 모의순환 장치의 보조혈류량

체적변화 가능한 좌심방을 연결한 모의순환 장치에서 좌심방에 연결된 캐놀라가 길어지고 중간에 볼 밸브가 연결되어 있으므로 캐놀라 길이 변화 및 좌심방(collapsible LA)의 부착에 따른 영향을 고려하기 위하여 좌심방의 유입혈류를 제한하지 않은 상태에서 좌심방압을 변화시키면서 박출량을 측정하였다. 측정결과 체적변화 가능한 좌심방(collapsible LA) 연결에 의하여 보조혈류량이 감소되지는 않았으며, 좌심방압이 20mmHg에서 10 mmHg로 감소하여도 박출량은 큰 변화를 보이지 않았다. (그림 2)

좌심방압의 유입혈류를 제한하여 새로연결된 좌심방(collapsible LA)이 약 50% 함입되도록 한 상태에서 박출량을 측정한 결과, 박출량의 큰 변화는 관찰할 수 없었지만 동물실험 때와 비슷한 좌심방압의 변화를 확인할 수 있었다. (그림 3)

좌심실보조기의 분당 박동수를 일정한 상태로 유지하고, 좌심실보조기의 수축기와 이완기의 비율(systolic time and diastolic time ratio, S/D ratio)을 변화시키면서 보조박출량과 좌심방압을 측정한다. 결과, 행정거리 600과 800에서는 좌심실보조기의 수축기와 이완기 비율(SD ratio)이 75% 이상일 때 좌심방의 함입현상이 발생하였고, 행정거리 1000과 1200에서는 SD비율이 50%이상일 때 좌심방의 함입을 관찰할 수 있었다. 따라서 보조기의 작동시 행정거리가 1000 이상일 때도 S/D 비율을 40%로 유지할 때는 좌심방의 음압발생을 줄일 수 있음을 보여주고 있다. (표 1, 그림 4,5)

### 4. 고 찰

좌심실보조기의 모의순환실험의 결과가 동물실험에서 충분히 반영될 수 있기 위해서는 동물실험의 실제상황에 대한 고려가 있어야 한다.

모의순환장치의 좌심방은 일종의 저장고(Reservoir)인 반면에 생체의 좌심방은 일회 심박출량과 비슷한 크기의 용기에 지나지 않는다. 우심실의 수축력이 감소된 경우에는 좌심방으로 들어오는 혈류량이 감소하게 되는데 모의순환 장치에서는 이를 고려하여 보조기의 박출량을 적절히 조절할 필요가 있다. 특히 보조기가 좌심방압이 낮은데 불구하고 박출량을 높게 유지하려고 하면, 불필요한 음압이 좌심방에 가해지게 되고 캐놀라가 연결된 튜브로 공기가 들어와서 치명적인 결과를 초래할 수도 있다.

모의순환실험에서는 좌심방부의 변화에 관계없이 박동수와 행정거리에 비례하는 보조기의 박출량을 얻을 수 있었으며, 최대혈류량은 4.0 L/min에 달하였다. 이는 20Kg의 실험동물에 사용될 경우 심계수 2.0 L/min/m<sup>2</sup>을 유지하기에 충분한 양이었다.

좌심방압을 20mmHg, 10mmHg로 변화시키고, 좌심방의 유입혈류를 제한한 경우에도 보조기의 박출량은 큰 차이를 보이지 않았으나 좌심방압의 변화는 각 경우에 큰 차이를 보였으며, 좌심방의 유입혈류를 제한한 경우에는 최고 50mmHg의 음압이 좌심방에 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 실제동물 실험에서라면 캐놀라가 좌심방에 연결된 부위로 주위의 공기가 들어올 수있음을 의미하며 공기전색(air embolism)에 의하여 생명에 큰 영향을 미칠 수도 있다.

좌심방압을 10mmHg로 유지한 상태에서 좌심방부를 변화시켜 실제 좌심방에서 받아들일 수 있는 혈류를 제한한 경우의 모의순환 실험은 실제 생체에서는 다음과 같은 상태이다. 생체에서 정맥혈의 흐름이 원만하고, 우심실의 기능이 손상되지 않아 좌심방으로의 혈류가 유지되는 상황에서 좌심실의 이완기때 혈류를 강제적으로 유입할 때 혈류량변화가 좌심방으로 유입되는 혈류량 변화보다 큰 경우이다.

모의순환 실험결과 일정한 박동수, 행정거리에서 S/D 비율이 좌심방의 음압발생과 밀접한 관계에 있으며, 이는 S/D 비율을 40%이하로 유지하여야 행정거리가 1000이상인 경우에서 좌심방의 음압발생을

줄일 수 있는 것으로 나타났다.

S/D 비율을 낮추는 제어방식에서는 박출량의 손실이 약 11 %에서 21 % 정도에 이르는 것으로 나타나지만 좌심실보조기에서는 공기전색의 문제를 예방하기 위해서 S/D 비율을 낮은 상태로 유지하는 것이 필수적이라 생각된다.

### 5. 결론

전기유압식인 한국형 좌심실보조기를 이용하여 좌심방의 체적변화가 가능하도록 모의순환 장치를 변경시킨 상태에서 보조혈류량 및 좌심방압을 측정하였다. 생체에서 정맥혈의 흐름이 원만하고, 우심실의 기능이 손상되지 않아 좌심방으로의 혈류가 유지되는 상황에서 좌심실의 이완기때 혈류를 강제적으로 유입할 때 혈류량변화가 좌심방으로 유입되는 혈류량 변화보다 큰 상태를 모의순환 장치에서 만들 수 있었으며, 이는 좌심방을 단순한 저장고 기능만 하도록 설계된 모의순환 장치에서는 관찰할 수 없었던 현상이다.

좌심방압의 변화는 우심실로부터 유입되는 혈류량보다는 좌심실보조기가 혈액을 받아들이는 속도에 더 영향을 받는 것으로 나타났으며, 좌심실보조기의 작동시 S/D를 40% 이하로 유지시키는 것이 좌심방의 음압발생을 줄일 수 있는 제어조건임을 확인하였다.

앞으로의 실험은 좌심방압을 예측할 수 있는 변수를 선정하여, 좌심방압에 음압이 발생하지 않도록 보조기를 작동시키는 제어방식에 대한 연구에 집중되어져야 할 것으로 생각된다.

### 6. 참고 자료

1. Assist Circulation : Felix Unger: Springer-Verlag; 2nd Ed. 1984, pp 45-48

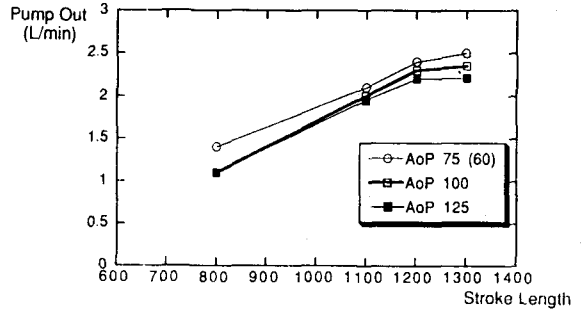


그림 1. 체적변화 가능한 좌심방을 연결하지 않은 상태에서 측정된 모의순환 실험 결과, 보조기의 박출량은 심박동수 60/min에서 행정거리(Stroke Length)에 비례하며, 대동맥압(AoP)의 변화에는 크게 영향 받지 않는다.

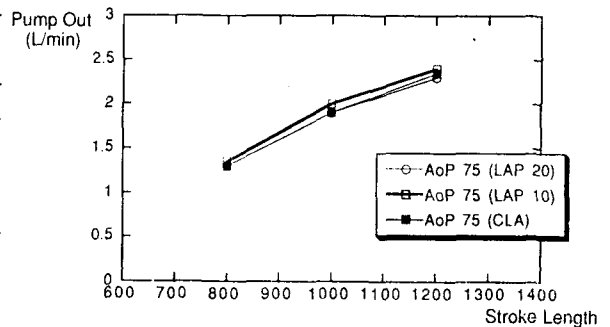


그림 2. 좌심방압이 20, 10 mmHg인 상태와 좌심방 유입혈류를 제한한 상태에서 측정된 좌심실보조기의 박출량. 보조기의 박출량은 좌심방압의 변화에 크게 영향 받지 않음을 알 수 있다.

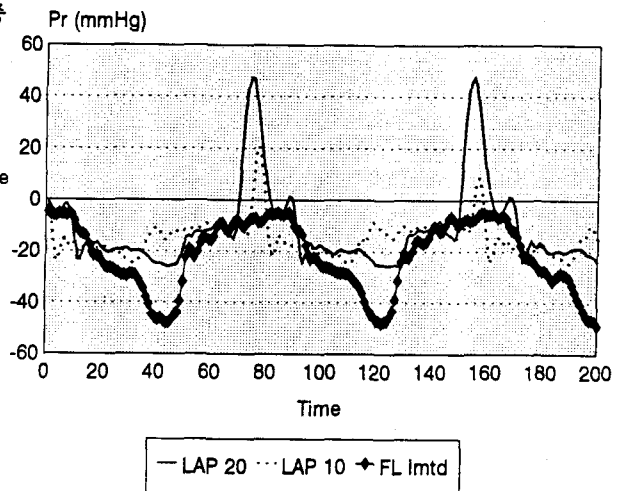
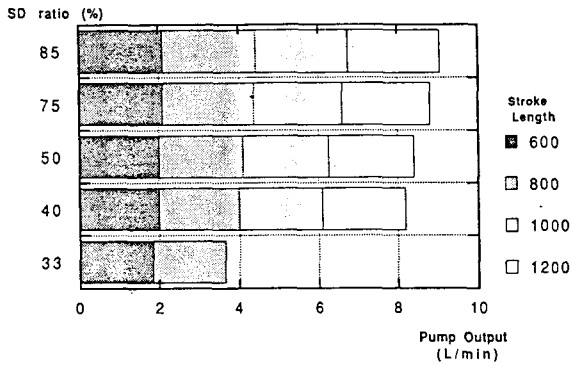


그림 3. 체적변화 가능한 좌심방을 연결한 모의순환 장치에서 측정된 좌심방압. 같은 박출량을 내는 상태에서도 좌심방압은 차이를 내고 있으며, 좌심방의 유입혈류가 제한된 경우에는 -50mmHg의 음압이 발생함을 보여주고 있다.



S L	600	800	1000	1200
SD ratio				
40 %	-	-	-	-
50 %	-	-	+	+
75 %	+	+	+	+
80 %	+	+	+	+

S L : Stroke Length      + : LA collapse occurred

그림 4. 수축기-이완기 비율을 변화시키면서 측정된 좌심실 보조기의 박출량. 같은 행정거리일 때 S/D 비율을 감소시킬 때 따라 약 15%의 박출량 감소를 보이고 있다.

표 1. 체적변화 가능한 좌심방에서 S/D비율과 행정거리에 따라서 발생된 합병현상

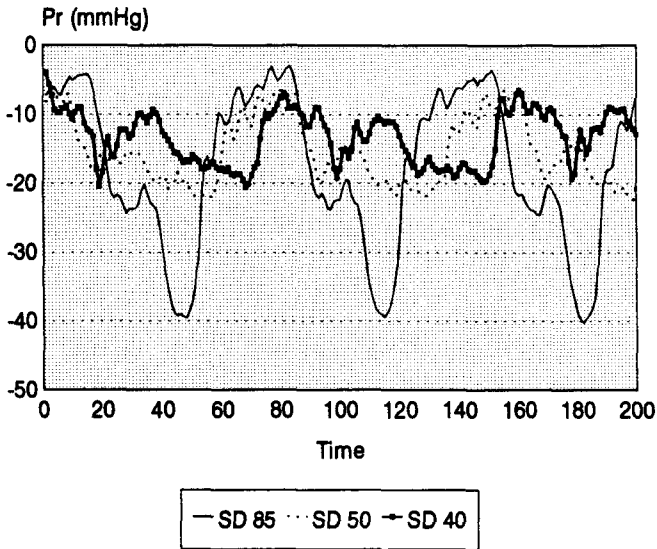


그림 5. 모의순환장치에서 S/D 비율을 변화시키면서 측정된 좌심방압. S/D이 85%인 경우에는 -50mmHg의 음압이 발생되나, 같은 조건에서 S/D 비율을 40%로 감소시키면 좌심방압의 음압발생은 줄어들다.