

좌심실보조기에서의 좌심방함몰방지를 위한 전류파형을 이용한
좌심방압의 추정 및 박출량제어

이상우, 정찬일, 김인영, 김희찬, 민병구

서울대학교 공과대학 의용생체협동과정, 의과대학 의공학교실

LAP Estimation and Pump Output Control for Preventing the Left Atrial
Collapse Using Peak Value of the Motor Current

S.W. Lee, C.I. Chung, I.Y. Kim, H.C. Kim, B.G. Min
Department of Biomedical Engineering, College of Engineering & Medicine,
Seoul National University

1. 서론

전기유압식 좌심실보조장치(Left Ventricular Assist Device : 이하 LVAD)는 공압식 좌심실 보조장치와 달리 이완기동양에도 상당히 큰 음압력(Negative Pressure)이 혈액주머니에 가해진다. 이러한 보조기의 능동적 혈액유입(active blood filling)은 전기유압식 좌심실보조장치가 가지는 가장 큰 특징중의 하나이다. 즉 이는 좌심방의 압력에 상관없이 일정한 심박출량을 보장할수 있어서 좌심실보조장치의 주요기능인 체순환보조를 충실히 할수있는 장점이 있으나 또 한편으로는 좌심방의 함몰(atrial collapse or suction phenomenon)을 초래하여 수술부위를 통한 공기의 유입으로 인한 공기색전증(air embolism) 이나 심방벽의 손상으로 인한 혈전형성(thrombos formation)등의 치명적인 결과를 초래할수 있다. 제작한 LVAD로 수행한 여러번의 동물실험에 있어서 이런 현상을 많이 경험하게 되었다. 그래서 어떤 방법으로든지 좌심방의 압력을 추정하여 좌심방압력이 일정수준이하로 떨어지지 않게 하는 제어기 개발의 필요성을 절감하게 되었고 아래와 같은 실험을 통해 그 방법을 고안하게 되었다.

2. 실험방법

사용한 좌심실압력을 추정하는 방법은 모터에 흐르는 전류를 측정하여 측정된 전류파형으로 부터 좌심방내의 압력을 추정하는 것이다. 자세히 설명하면 이완기동안의 전류파형의 최대값으로부터 좌심방내의 압력을 추정하는 것인데 여러번의 실험결과 혈액주머니 이완기의 전류파형의 최대값이 좌심방내의 압력을 가장 잘 반영한다는 것을 알수 있었기 때문이다.

그림(1)은 실험에 사용한 모의순환장치의 모식도이다. 지항 R을 변화시켜서 모의순환장치의 좌심방으로 유입되는 유체의 양을 조절하여 좌심방내의 압력을 변화시켜 변화된 좌심방 압력에 따른 전류파형의 최대값을 구하였다.

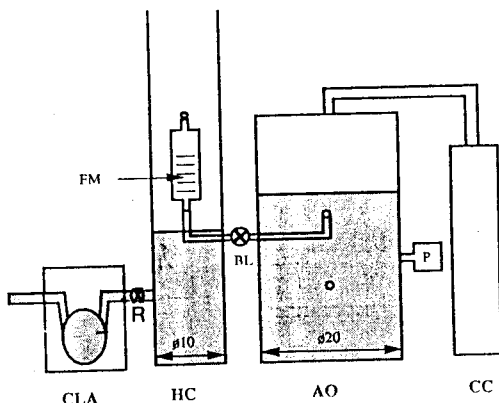


그림 1. 좌심방압에 따른 보조기이원시의 전류파형측정을 위한 모의순환장치의 모식도
(CLA: 좌심방, HC: 정수압실, AO: 대동맥부, CC: 팽창실, FM: 유량계, BL: 볼밸브, R: 지항, P: 압력계)

3. 모의순환실험

실험을 통해 우리가 얻고자 하는 데이터는 다음의 두가지 경우인데 첫째 좌심방내로의 유체의 유입이 충분하여 좌심방함몰현상이 일어나지 않을때, (이때의 좌심방압 > 10mmHg) 둘째 좌심방으로의 유체유입이 좌심실보조기로 유입되는 유체의 양보다 적은경우 즉 좌심방함몰현상이 발생한경우(이때 좌심방압 < -10mmHg)이다. 그림(2)에서는 이 두가지 경우에 대하여 전류파형의 최대값을 측정한 결과로, 전류파형의 최대값은 좌심방내의 압력과 좌심실보조기의 이완기 속도(diastolic velocity)와 밀접하게 연관되어 있음을 알수 있다.

또한 전류파형의 최대값은 대동맥압에는 거의 영향을 받지 않으며 수축기속도(systolic velocity)에도 영향을 받지않음을 알수 있었다.

4. 전류파형을 이용한 박출량제어 알고리즘

위의 실험결과를 이용한 박출량제어 알고리즘은 다음과 같다.

1) 비동기식 작동방식(Asynchronization Mode)

- LVAD가 동작할때마다 이완기동안 전류파형의 최대값을 구한다.
- 구해진 전류파형의 최대값과 모의순환실험에서 구해진 좌심방함몰이 일어나지 않은 경우의 전류파형의 최대값(정상치)과 비교한다.
- 측정된 전류파형의 최대값이 정상치보다 10%이상 크면 작동속도를 감소시켜서 박출량을 줄인다.
- 측정된 전류파형의 최대값이 정상치보다 10%이하로 크고 5%이상으로 크면 그 상태를 유지한다.
- 측정된 전류파형의 최대값이 정상치보다 5%이하로 크거나 같으면 작동속도를 증가시켜서 박출량을 늘인다.

2) 동기식 작동방식(EKG-Synchronization Mode)

- LVAD가 동작할때마다 이완기동안 전류파형의 최대값을 구한다.
- 구해진 전류파형의 최대값과 모의순환실험에서 구해진 좌심방함몰이 일어나지 않은 경우의 전류파형의 최대값(정상치)과 비

교한다.

- 측정된 전류파형의 최대값이 정상치보다 10%이상 크면 작동거리를 감소시켜서 박출량을 줄인다.
- 측정된 전류파형의 최대값이 정상치보다 10%이하로 크고 5%이상으로 크면 그 상태를 유지한다.
- 측정된 전류파형의 최대값이 정상치보다 5%이하로 크거나 같으면 작동거리를 증가시켜서 박출량을 늘인다.

4. 결과

그림(3)은 비동기식 작동방식에서의 동물실험 결과이다. 그림 a)는 적당한 작동거리와 속도를 가지고서 비동기식으로 좌심실보조기를 작동시킨 경우의 압력 및 좌심실 보조기를 통한 유량의 파형이다. 같은 조건에서 위에서 제시된 알고리즘으로 좌심실 보조기를 작동시킨 후 정상상태가 된 결과가 그림 b)이다. 그림 a)보다 좌심실 보조기의 작동속도가 증가하여 보

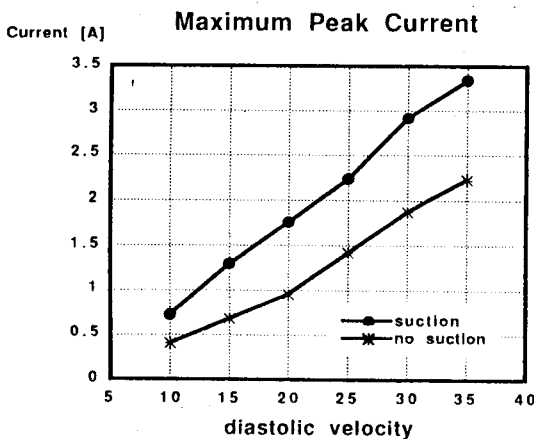


그림 2. 모의순환실험에서 얻은 좌심방함몰시와 함몰이 없을 때 보조기이완기의 전류파형의 최대값 (suction:좌심방함몰, no suction:좌심방비함몰 diastolic velocity:보조기 이완기 작동속도)

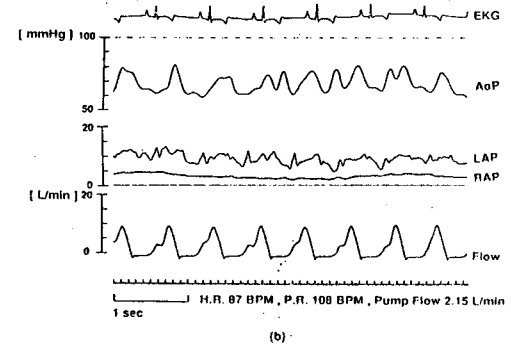
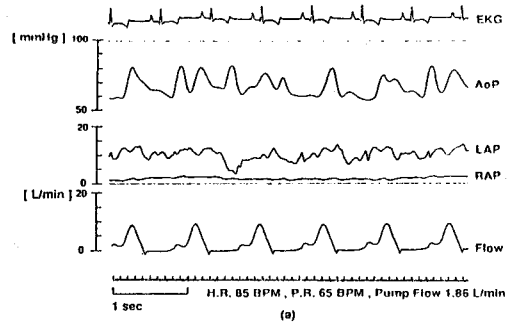


그림 3. 동물실험에서 얻은 비동기식 작동방식에서의 박출량제어 알고리즘의 결과

a) 제어알고리즘 적용전, b) 제어알고리즘 적용후 (EKG:심전도, AoP:대동맥압, LAP:좌심방압, RAP:우심방압, Flow:보조기를 통한 박출량, H.R:심박동수, P.R:보조기박동수)

조기 박동수가 증가(65BPM → 108BPM)했음을 알 수 있다. 그리고 좌심방압(LAP)은 약간 감소하였지만 좌심방 함몰동의 현상은 발생하지 않으면서 보조기가 작동됨을 알 수 있다. 이렇게 함으로서 좌심방함몰없이 보조기를 통한 박출량의 증가(1.86 L/Min → 2.15 L/Min)를 가져올 수 있음을 알 수 있다. 그림 (4)는 좌심실보조기의 동기식 작동방식에서의 동물실험 결과이다. 이 경우 역시 그림 a)의 상태에서 위의 제어 알고리즘을 작동시킨 후 정상상태가 된후의 결과가 그림 b)이다. 이 경우에는 자연심장의 심박동과 동기시켜야 하기 때문에 작동속도보다는 작동거리를 변화시켜주게 된다. 그림 b)는 그림 a)보다 작동거리가 증가됨으로 보조기박출량이 증가(3.0 L/Min → 3.4 L/Min)되었음을 보여주고 있다. 이 경우 보조기의 작동속도는 주어진 작동거리와 심박동수에 의해서 자동으로 계산되어지게 된다.

5. 결론 및 고찰

전기유압식 좌심실보조기가 갖는 좌심방함몰이라는 단점을 보완해주기 위해서 좌심방압을 보조기이완기의 모터인가 전류의 최대값으로부터 추정하여 좌심방함몰을 방지하는 알고리즘을 구성하여 동물실험을 통해서 시험해 보았다. 이 알고리즘을 이용하여 동물로부터 주어진 좌심방으로의 유입혈액량을 좌심방함몰 없이 최대로 보조해 줄수 있음을 알았다. 보조기 작동방식이 동기식이나 비동기식인 경우 모두 좋은 결과를 보여주었다. 그러나 동기식의 경우 자연심장의 심박동수의 변화가 심하면 제시된 알고리즘이 불안함을 보여주었다. 제어의 안정을 위해서는 박출량의 변위를 주기위한 전류파형의 최대값의 구간 (제시된 알고리즘에서는 10% 이상, 5 - 10%, 5%이하)이 적절한 값을 갖도록 하여야하며, 제어구간 (제시된 알고리즘에서는 매 박동마다)을 적당히 늘려야 한다고 생각한다. 이러한 값들이 적절한 값을 갖기위해서는 많은 동물실험해야한다고 생각한다.

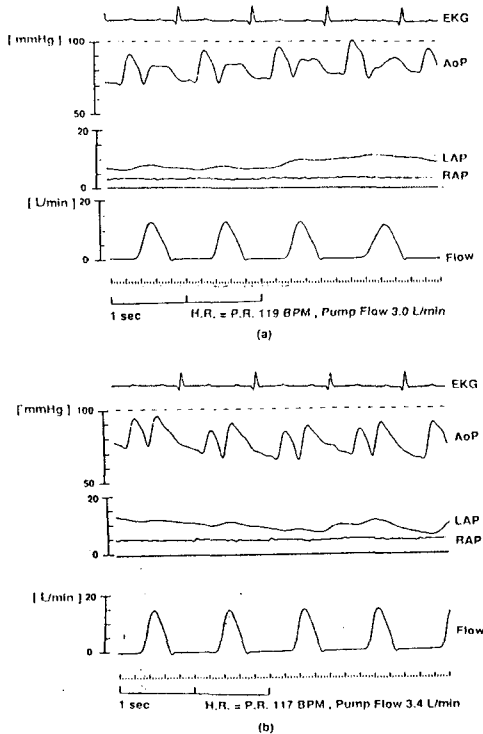


그림 4. 동물실험에서 얻은 동기식 작동방식에서의 박출량제어 알고리즘의 결과

a) 제어알고리즘 적용전 , b) 제어알고리즘 적용후 (EKG:심전도, AoP:대동맥압, LAP:좌심방압, RAP:우심방압, Flow:보조기를 통한 박출량, H.R:심박동수, P.R:보조기박동수)