

## 인공심장의 자동제어

민병구, 김희찬, 김성완, 권성일

서울대학교 의과 대학 의공학과, 공과 대학 제어 계측 공학과

A Study on The Development of Motor-Driven Artificial Heart and Its Control

B. G. Min, H. C. Kim, S. W. Kim, S. I. Kwon

Dept. of Biomedical Eng. &amp; Dept. of Control and Instrumentation, Seoul National University

## ABSTRACT

A new type of motor-driven Total Artificial Heart (TAH) system with rolling-ball mechanism has been developed. To test its performance as a Left Ventricular Assist Device (LVAD), LVAD is controlled to bypass blood for impaired heart triggered by the R-wave in ECG. Results of the test with a Mock Circulation System (MCS) and an animal experiment with a dog are also included. More powerful system using a brushless DC motor has been developed and its control scheme is represented.

## 1. 서론

오늘날 심장 질환 환자의 급속한 증가 추세로 인하여 인공 심장 분야에 대한 의학, 공학적인 연구가 구미 각국에서 활발히 진행되고 있으며, 더우기 지난 1982년 말 미국 유타 대학 연구팀에 의해 인공 심장이 사람에게 이식된 이후 관심이 더욱 집중되고 있는 추세이다.

심장 질환의 경우, 그 기능이 약화된 경우에는 기능을 보조하기 위해 좌심실 보조 장치 (LVAD: Left Ventricular Assist Device) 를 사용하고 심장이 전혀 제 기능을 수행하지 못하는 경우에는 완전 인공 심장 (TAH: Total Artificial Heart) 을 사용하게 된다. 저자들은 이미 소형 모터를 이용한 독창적인 모델의 인공 심장을 개발하여 모의 순환 실험과 동물 실험을 수행하고 있으며 본 논문에서는 Step Motor를 이용한 좌심실 보조 장치에 관한 연구로서 그 제어방식 및 모의 순환계 실험과 동물 실험의 결과를 제시하며 현재 개발중인 Brushless DC Motor를 이용한 완전 인공 심장의 구성 및 제어 방식에 관하여 연구한다.

## 2. 본론

## (1) LVAD의 제어 원리

좌심실 보조 장치를 생체의 상태에 맞도록 제어하기 위해서, 자연 심장의 박동 때마다 발생하는 ECG (Electrocardiogram) 신호를 이용하였다.

그림 1 (a), (b)는 자연 심장의 박동에 따른 대동맥과 좌심실의 압력 파형과 ECG 파형이다.

파형에서 R-wave 검출기를 통해 그림 1 (c)와 같이 펄스를 만들어 낸 후 그림 1 (d)와 같은 최종적인 Trigger 펄스를 만들어 낸다. 이때 Td와 Ts를 조절함으로써 보조 장치의 동작을 제어할 수 있는데, Td가 Bypass의 시작을 제어하는 변수가 되고 Ts가 Bypass의 양을 결정하는 변수가 된다. 이런 원리로부터 LVAD로 자연 심장의 기능을 보조하는 순간과 양을 조정할 수가 있고 그 결과 대동맥의 압력 파형은 그림 1 (a)의 점선과 같이 증가되어 나타난다.

이와같은 LVAD와 자연 심장의 박동간의 동기는 LVAD로 유입되는 혈류의 양을 보장해주는 관점에서도 필수적이다.

그림 1 (d)의 신호를 LVAD의 제어 신호로 사용하며, 또한 R-R Interval을 측정하여 자연 심장의 박

동수 (HR: Heart Rate)를 계산함으로써 제어에 필요한 변수를 얻도록 하였다.

### (2) 모의 순환계 실험

실제 생체 적용을 위한 최선의 모델을 만들때까지는 인체 순환 시스템과 동가한 특성을 갖는 모의 순환 시스템 (MCS: Mock Circulation System)을 만들어서 많은 실험을 통해 문제점을 찾아 개선해 나가는 것이 필요하게 된다.

본 연구에서는 그림 2와 같은 구조로서 4개의 방 (Chamber)으로 구성되어 인체의 계순환과 폐순환을 등가적으로 대체할 수 있는 Lumped MCS를 이용하였다. 모의 순환계 실험에서는 생체의 생리학적인 변수에 해당하는 각종 변수들을 측정하면서 LVAD의 동작 상태에 대한 이들 변수의 변화를 관찰하여, 실제 생체에 적용했을 경우에 대한 기초 자료를 얻을 수 있다.

### (3) 동물 실험

모의 순환계 실험을 충분히 거친 후에, 인체와 거의 동일한 생리학적인 조건을 갖는 동물 (개: 30Kg)을 이용한 동물 실험을 통해 좌심실 보조 장치의 성능을 테스트 하였다. 실험은 완전 마취 상태의 동물의 좌심방과 하행 대동맥으로부터 LVAD와 연결할 관을 고정시키고 대동맥의 혈압 및 혈류를 측정하며 LVAD를 구동하는 순서로 진행하였다. 동물 실험을 위한 전체 시스템의 Block Diagram은 그림 3과 같다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

모의 순환계 실험과 동물 실험에 사용되어진 LVAD는 Rolling Ball Mechanism을 가진 SNU TAH (Seoul National Univ. Total Artificial Heart)의 한쪽 부분을 이용한 것이다.

모의 순환계에 LVAD를 연결하여 여러가지 상황에서 실험한 결과 가장 좋은 상황은 박동수 90일때 대동맥 압력 (AoP: Aortic Pressure)이 최고 192 mmHg, 최저 150 mmHg 이었고, 좌심방 압력 (LaP: Left-atrial Pressure)이 약 8-10 mmHg이었으며, 이때 분당 박출량 (Cardiac Output)은 6.1L, 즉 1회 박출량 (Stroke Volume)은 68 ml이었다(그림

4).

첫번째 동물(개) 심장에 LVAD를 부착하여 실험한 결과는 그림 5에서와 같이 Pump가 ON되어 75mmHg의 압력으로 Pumping 기능을 수행하였다. 두번째 실험의 결과는 그림 6,7과 같이 압력면에서는 별다른 항상을 얻지 못했으나 ECG의 R-wave와 동기시켜 Pump를 동작시킬수가 있었다(그림7). 이때 MCS Test 때의 192 mmHg에 비해 현저하게 줄어든 이유는 동물 실험시 자연 심장과 LVAD를 실제로 연결하는 Cannula의 직경과 길이에 따른 압력 감쇠(Pressure Gradient) 때문이었다.

Cannula 문제를 보완한다면 보다 큰 압력으로 Pumping 기능을 수행할 수 있게되어 약화된 심실 기능을 LVAD를 통해 보완할 수 있을 것이다.

현재 개발중인 새로운 시스템은 Brushless DC Motor (Sierracin/Magnedyne 594-05)를 사용하는 것으로 종래에 사용했던 Step Motor에 비해서 비슷한 크기로서 대략 3배 정도의 출력을 낼것으로 기대된다. DC Motor이기 때문에 Step Motor에 비해서 Control이 복잡해지는 경향은 있으나, 고 출력외에도 효율, 신뢰성, 안정성 면에서 큰 항상을 얻을 수 있게 될 것이다. Brushless DC Motor를 구동하기 위해서는 Hall Effect Switch 소자들을 이용한 Position Commutation과 Motor의 Speed 및 Position등을 Control해 주어야 하는데, 이것을 위하여 Microprocessor를 이용한 Digital Servo Mechanism의 구현을 연구중에 있다.

이때 Motor의 Speed는 전체 System의 Inertial Impact를 최소로 하면서 Time-varying Load condition에 대해 원하는 Velocity-profile을 갖도록 제어되어야 하며, 또 좌,우심실을 교대로 Pumping해 주기 위해서 Motor의 회전 방향을 결정해 주어야 한다. Motor의 Position은 1회 Pumping에 박출되는 혈액의 양(Stroke Volume)과 관계가 되므로 이것 또한 원하는 위치에서 회전 방향이 바뀌도록 제어되어야 한다.

본 연구에서는 그림 8과 같은 Block Diagram을 갖는 Servo-controller를 그림 9와 같이 Z-80A Microprocessor를 이용하여 구현 하였는데 여기서는 일반적으로 Motor Control에 사용되는 PWM 방식을 약간 변형하여 완전히 Digital System으로 해결할 수 있는 PFM 방식을 사용하였다.

4. 참고 문헌

- (1) T. Akutsu, "Artificial Heart", Igaku Shoin, Tokyo, 1975
- (2) A. Noordergraaf, "Circulatory System Dynamics", Academic Press, 1978
- (3) M. A. Fischetti, "The Quest for The Ultimate Artificial Heart", IEEE Spectrum Mar., pp. 39-44, 1983
- (4) R. K. Jarvik, "The Total Artificial Heart", Circulation Jan., 1981
- (5) W. S. Pierce et. al., "Artificial Hearts and Blood Pumps in The Threatment of Profound Heart Failure", Circulation Oct., 1983
- (6) B. C. McInnis et. al., "Adaptive Control of Left Ventricular Bypass Assist Devices", IEEE Trans. on Automatic Control, vol. AC-30, No. 4, pp 322-329, Apr., 1985
- (7) Bruce Stanley, "Microprocessor Based Servomotor Control System", Incremental Motion Control System and Devices, Vol 14, pp 137-144, June, 1985
- (8) 김 성완, 김 희찬, 천 길정, 민 병구, "Step Motor를 이용한 인공 심장에 관한 연구", 대한 전자 공학회 하계 종합 학술대회 논문집 Vol. 8, No 1, pp 534-536, 1985
- (9) 김 희찬, 김 성완, 토 기종, 허 수진, 민 병구 "인공 심장의 유속 제어를 위한 컴퓨터 시뮬레이션", 대한 전자 공학회 하계 종합 학술대회 논문집 Vol. 8, No. 1, pp 525-527, 1985
- (10) 천 길정, 김 성완, 민 병구, 한 동철, "인공 좌심실 개발을 위한 모의 순환계의 기초 설계", 대한 의용 생체 공학회 추계 학술대회 논문집, pp27-28, 1984

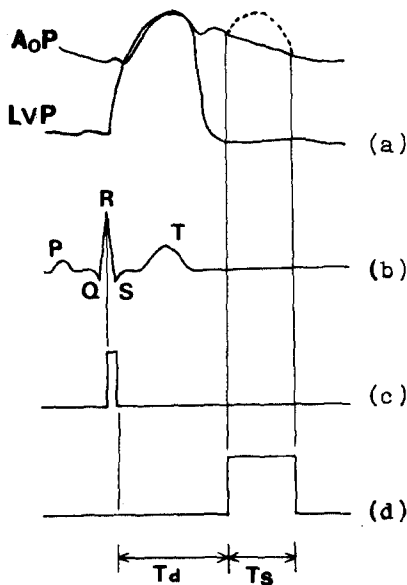


그림 1. 좌심실 보조 장치의 제어 신호

- (a) 대동맥과 좌심실의 압력 파형
- (b) ECG 파형
- (c) R-wave 검출기 출력 신호
- (d) Trigger 펄스

Fig. 1 Control Signal of LVAD

- (a) Aortic and Left-atrial Pressure Waveform
- (b) ECG Waveform
- (c) Output Signal of R-wave Detection Circuit
- (d) Trigger Pulse

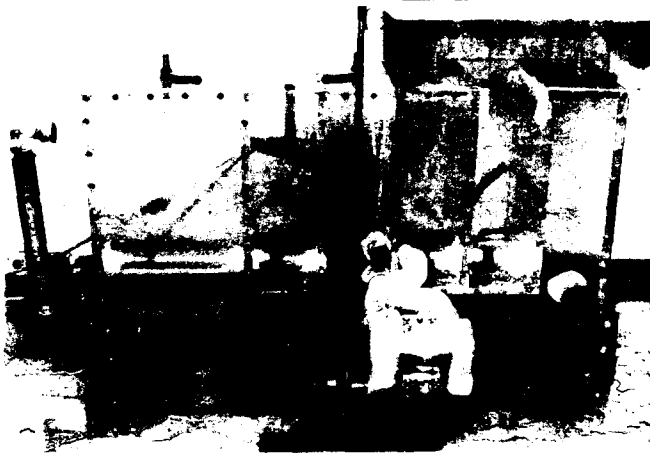


그림 2. 모의 순환 시스템

Fig. 2 Lumped Mock Circulation System

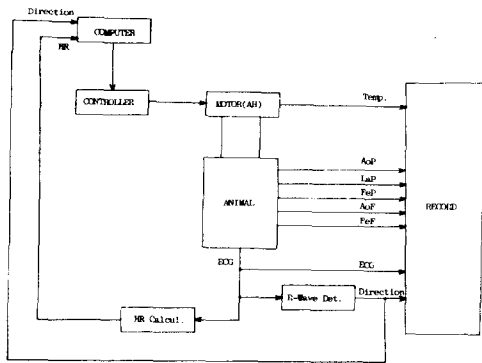


그림 3. 동물 실험을 위한 전체 시스템의 Block Diagram

Fig. 3 A Block Diagram of Total System for Animal Experiment

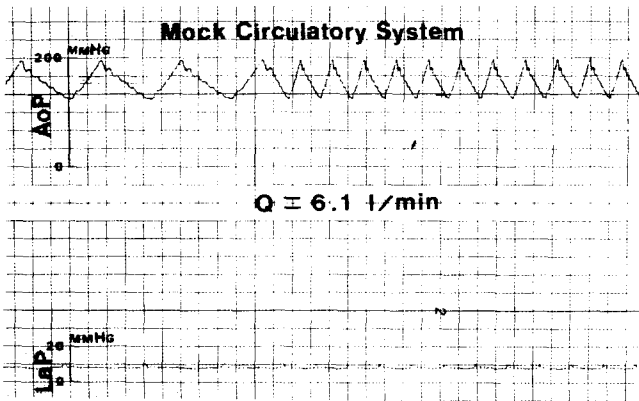


그림 4. 모의 순환계 실험 결과

Fig. 4 Results of Mock Circulation System Test

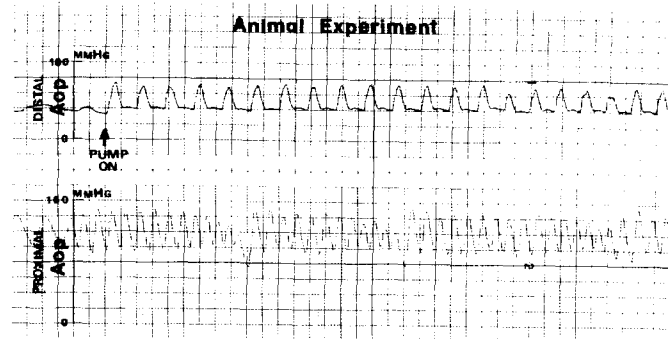


그림 5. 동물 실험 결과(1)

Fig. 5 Results of Animal Experiment (1)

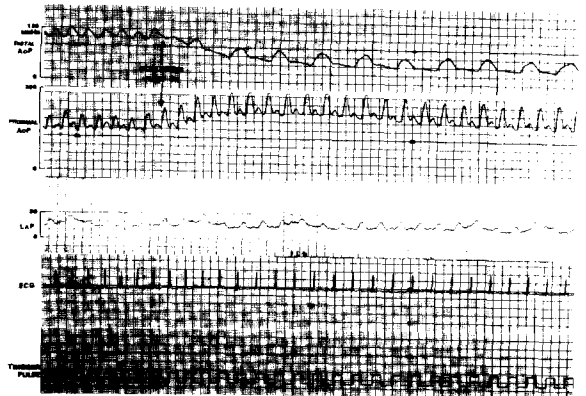


그림 6. 동물 실험 결과(2) - 비 동기 방식

Fig. 6 Results of Animal Experiment (2)

- Asynchronous Mode

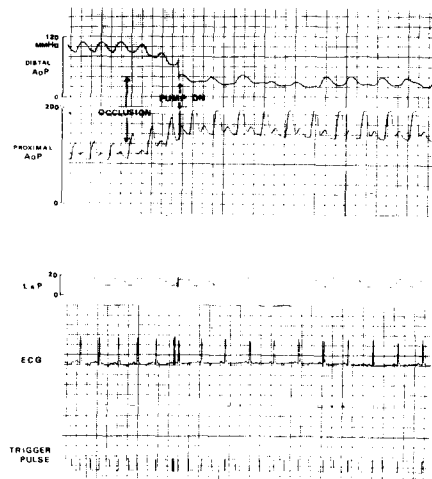


그림 7. 동물 실험 결과(2) - 동기 방식

Fig. 7 Results of Animal Experiment (2)

- Synchronous Mode

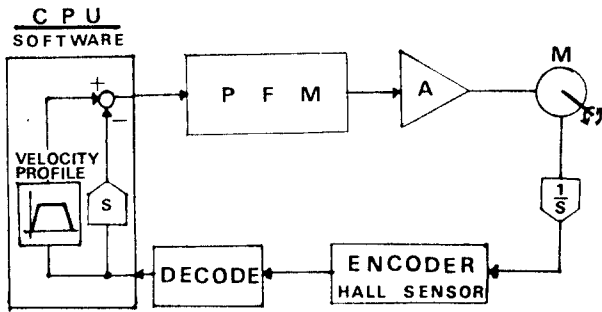


그림 8. PFM을 이용한 서보 시스템의 Block

Diagram

Fig. 8 A Block Diagram of The Servo System

Using PFM

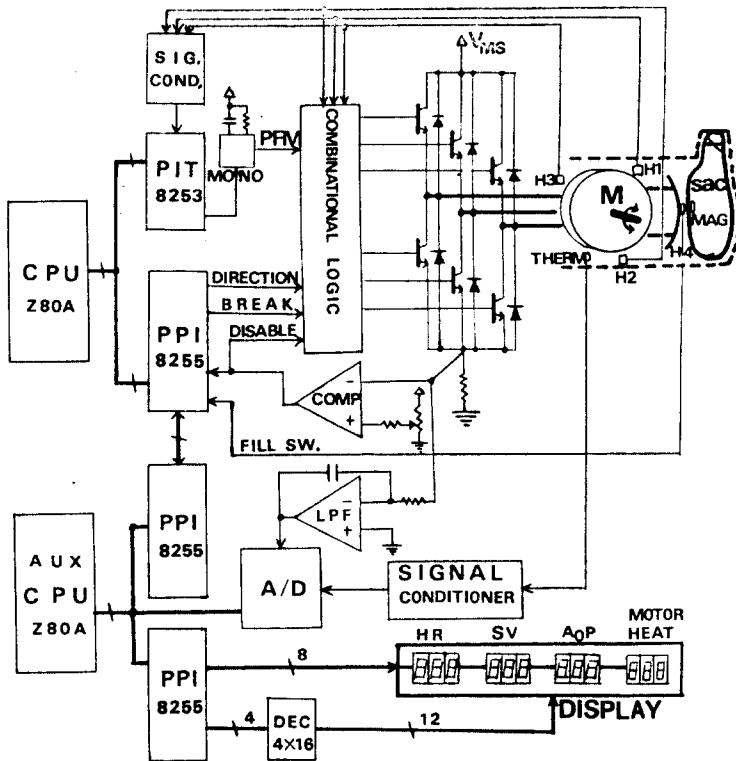


그림 9. Brushless DC 모터를 이용한 완전 인공 심장용

제어 시스템의 하드웨어

FIG. 9 A Hardware Configuration of The Control

System for Total Artificial Heart Using A

Brushless DC Motor