

# 파라메타 추정 알고리즘을 이용한 전기유압식 좌심실 보조 장치의 해석

이동준, 이상우, 김희찬, 민병구  
서울대학교 의과대학 의공학교실

Analysis of Electrohydraulic Left Ventricular Assistant Device  
using Recursive Parameter Estimation Algorithm

Dong Joon Lee, Sang Woo Lee, Hee Chan Kim, Byung Goo Min  
Dept. of Biomedical Eng., Seoul Univ.

## 초 록

서울대학교 의공학과에서는 부분적인 심부전 환자의 보조 및 치료장비로 전기유압식 좌심실 보조 장치를 개발하고 있다. 이 장비의 경우 인체의 좌심방 및 대동맥에 직접 연결되므로 실제적으로 좌심실 보조 장치의 박출량을 센서를 통하여 알아내는 데에는 여러가지 어려움이 따른다. 이러한 필요성에 비추어 전기유압식 좌심실 보조 장치의 박출량을 시스템을 ARX모델로 모델링하여 RLS(Recursive Least Square) 알고리즘을 이용하여 추정하였다.

그 결과 비교적 높은 정확도로 박출량이 추정됨을 볼 수 있었다. 하지만, ARX모델의 특성상 원래 본 연구의 시작과정에서 분석한 시스템의 동적 특성을 완전하게 반영할 수 없었다. 앞으로 시스템의 파라미터 추정 과정에서 이미 주어진 동적 특성은 고정시키고 나머지 파라미터들만을 추정하는 알고리즘을 개발하는 것도 흥미로운 과제라 할 수 있다.

## 1. 서론

전기 유압식 좌심실 보조 장치의 박출량 자동 제어에 있어서 가장 중요한 문제는 일정한 박출량을 보장해 주면서 좌심방압의 압력을 적정 수준으로 유지시켜 주는 것이다. 전기 유압식 좌심실 보조장치에서는 혈액이 능동적으로 유입(active filling)되기 때문에 좌심방으로 유입되는 혈액의 양보다 더 많은 혈액을 전기 유압식 좌심실 보조 장치가 유입하려고 할 때 좌심방압

이 감소하게 되며 이러한 동작 상태가 계속되면 좌심방 함몰 현상이 발생하게 된다. 함몰 현상이 발생하게 되면 수술 부위로 공기가 유입되어 공기색전증(air embolism)이 발생하기도 하고 또한 심근이 치명적으로 손상되기도 한다. 이러한 좌심방 함몰 현상을 방지하기 위해서는 좌심방으로 유입되는 양 만큼을 좌심실 보조 장치가 박출 해주면 된다. 하지만 좌심방으로 유입되는 혈액을 양을 직접적으로 측정하는 것은 현실적으로 불가능하고 또한 간접적인 방법으로 추정하는 것도 좌심실 보조 장치의 동적 방정식뿐만 아니라 전신 순환 시스템(systemic circulation)의 모델링도 요구한다. 이 또한 현실적으로 실현시키는 데 있어서 많은 문제점이 있다.

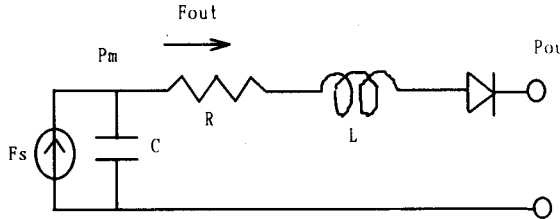
서울대학교 의공학과에서는 좌심방으로 유입되는 간접적으로 추정하는 방식 대신에 좌심실 보조 장치가 박출하려고 한 양과 실제로 박출된 양을 비교하여서 이를 박출량 자동 제어 알고리즘의 지표로 삼는 박출량 자동 제어 알고리즘을 개발하였다. 실제로 박출된 양을 직접 측정하는 것도 현실적으로 많은 어려움이 있기 때문에 간접적으로 추정하는 방법을 택하였다.

본 연구에서는 실제로 박출된 양을 추정하기 위해서 필요한 시스템 동적 방정식의 파라미터 값을 recursive parameter estimation 방법을 이용하여 추정하는 방법을 제안하였다. 또한 추정된 파라미터 값을 이용해서 이용하여 박출량을 추정하는 방법도 제안하였다. 추정된 파라미터를 이용한 전기 유압식 좌심실 보조 장치 박출량 자동제어 알고리즘에 대한 연구는 계속 진행되고 있다.

## 2. 방법

### 1) 좌심실 보조 장치 수축기 모델링

아래의 그림은 전기 유압식 좌심실 보조 장치 수축기의 모식도이다.



- Fs : 밀판에 의해서 발생하는 유량 (ml/sec)
- R : 관의 저항 (mmHg\*sec/ml)
- C : 벨로우즈와 관의 compliance (ml/mmHg)
- L : 관의 inertance (mmHg\*sec\*sec/ml)
- Pm : 벨로우즈의 압력 (mmHg)
- Pout : 수축기 판막 (valve) 후단의 압력 (mmHg)

위의 모식도에서 구한 미분 방정식은 다음과 같다.

$$F_s = F_{out} + C \cdot \frac{dP_m}{dt}$$

위의 미분 방정식을 RLS(recursive least square) 방식을 적용하기 위해서 차분 방정식으로 바꾸면 다음과 같다.

$$F_s(n) + F_s(n-1) = F_{out}(n) + F_{out}(n-1) + \frac{2C}{T} \{P_m(n) - P_m(n-1)\}$$

T : sampling time (10ms)

### 2) Recursive Least Square Estimation

일반적으로 RLS 방법은 선형 시불변 시스템의 경우에 대해서 비교적 만족할 만한 성능을 나타낸다. 하지만 우리가 추정하고자 하는 벨로우즈의 컴플라이언스는 벨로우즈의 모양과 압력에

의해서 결정되기 때문에 비선형, 시변 성질을 가진다. 따라서 일반적으로 사용되는 RLS 방법 대신에 forgetting factor 를 도입하여 시변인 경우에도 비교적 정확하게 추정할 수 있도록 하였다.

forgetting factor를 도입한 RLS 추정 방법은 다음과 같이 요약된다.

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(t) &= \hat{\theta}(t-1) + K(t)\varepsilon(t) \\ \varepsilon(t) &= y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1) \\ K(t) &= P(t-1)\varphi(t) / [\lambda + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)] \\ P(t) &= \{P(t-1) - \frac{P(t-1)\varphi(t)\varphi^T(t)P(t-1)}{[\lambda + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)]}\} / \lambda \end{aligned}$$

- $\hat{\theta}(t)$  : estimated parameter
- $\varepsilon(t)$  : error
- $K(t)$  : error gain
- $P(t)$  : covariance matrix
- $\lambda$  : forgetting factor

### 3) RLS를 이용한 파라미터의 추정

앞에서 구한 차분 방정식을 RLS 알고리즘을 적용하기 위해서 다음과 같이 ARX(Auto-regressive eXogeneous) 모델로 변형시킨다.

$$y(n) - a_1 y(n-1) = \frac{2C}{T} [u(n) - u(n-1)] \quad (1)$$

$$\begin{aligned} y(n) &= F_s(n) - F_{out}(n) \\ u(n) &= P_m(n) \end{aligned}$$

(1)번식을 사용해서 matlab 상에서 시뮬레이션을 수행해 보았다. 참고로 forgetting factor의 값은 0.98로 하였다.

### 4) 추정된 파라미터를 이용한 박출량의 추정

시뮬레이션을 통하여 벨로우즈의 컴플라이언스의 값을 알아내면 아래와 같은 식에 의해서 좌심실 보조 장치의 박출량을 계산할 수 있다.

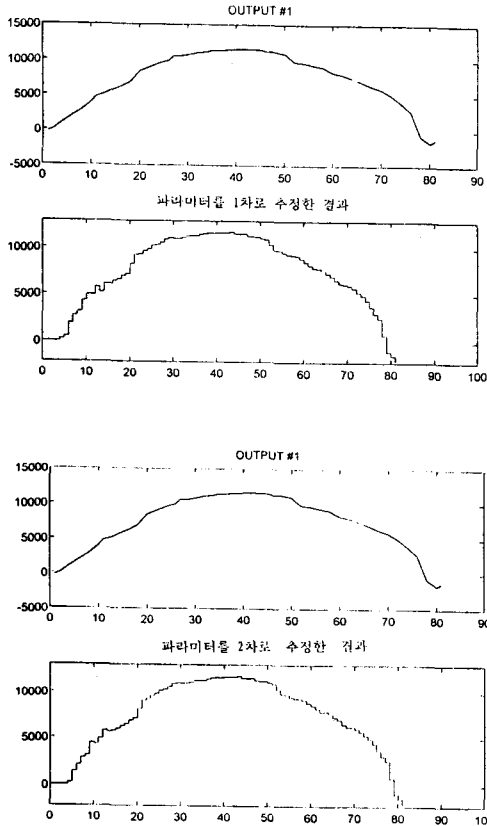
$$V_{out} = \int_0^t F_s \cdot dt - \int_0^t C \cdot \frac{dP_m}{dt} \cdot dt$$

t : systole time

Fs는 값은 밀판의 속도에다가 밀판의 면적을 곱하면 얻을 수 있고 벨로우즈내의 압력 Pm은 압력 센서를 이용하여 실시간으로 측정해서 얻는다.

### 3. 결과

위에서 설명한 방법대로 벨로우즈의 컴플라이언스를 구해서 박출량을 추정해 보았다. 그 결과가 아래와 같다.



위의 결과를 보면 추정된 박출량이 비교적 정확하게 실제 박출량과 일치함을 볼 수 있다.

### 4. 토의 및 고찰

본 연구에서 제안한 박출량 추정방법으로 실제 박출량을 추정해 본 결과 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있었다. 이로서 forgetting factor를 사용한 시변 시스템의 파라미터 추정 방법이 시변 시스템에서 잘 적용된다는 것을 알 수 있었다.

한편 본 연구에서 사용한 ARX 모델의 경우 시스템의 동적 특성을 충분히 반영하지 못하였다. 단지 ARX 모델의 차수를 결정하는 데에만 시스템이 동적 특성이 사용되었는데 앞으로는 고정된 시스템의 동적 특성을 반영할 수 있는 방법에 대한 연구가 요구된다.

### reference

[1] Lennart Ijung : Theory and Practice of Recursive Identification. The MIT Press

[2] Torsten Soderstrom, Petre Stoica : System Identification. Prentice Hall International

[3] Timothy L. Ruchti, Et al : Identification Algorithm for Systemic Arterial Parameters with Application to Total Artificial Heart Control. Annals of Biomedical Engineering, Vol. 21, PP 221-236, 1993

[4] matlab system idetification user's manual

[5] 이상우 : 압력 파형 분석을 이용한 이용한 전기 유압식 좌심실 보조 장치 박출량 조절 알고리즘. 서울대학교 의용생체공학과 석사학위 논문, 1995