

# 퍼지 subtractive 클러스터링 기법을 이용한 좌심실보조장치 모델링 및 흡입현상 검출

## Modeling of Left Ventricular Assist Device and Suction Detection Using Fuzzy Subtractive Clustering Method

박승규\* · 최성진\*\*\*

Seungkyu Park and Seongjin Choi†

\*창원대학교 메카트로닉스공학부

\*\*고려대학교 전자및정보공학과

### 요 약

좌심실보조장치의 모델과 안전한 장치 구동을 위한 흡입현상 검출을 위한 방법을 제안한다. 좌심실보조장치인 축류혈액펌프는 심장에 문제가 있는 환자를 보조하기 위하여 사용되어 왔다. 축류혈액펌프는 비맥동성 펌프이며, 맥동성 펌프에 비하여 작은 크기와 효율성과 같은 장점이 있으나, 안전한 펌프 운전 조건을 결정하는 데 어려움이 있다. 축류혈액펌프는 정상상태와 흡입상태와 같은 상이한 펌프 동작 상태를 가지며, 이는 좌심실에서 흡입현상 발생여부에 좌우된다. 퍼지 subtractive 클러스터링 기법을 이용하여, 이와 같은 동작 특성을 가지는 축류혈액펌프 모델을 개발하며, 개발한 펌프 모델을 이용하여 흡입현상 발생 전후의 펌프 혈류량을 추정한다. 또한 퍼지 subtractive 클러스터링 기법을 이용하여 좌심실에서 흡입현상 발생여부를 감지할 수 있는 흡입현상 검출 모델을 개발한다.

**키워드** : 좌심실보조장치, 퍼지 모델 추정, subtractive 클러스터링, 펌프 동작 조건, 흡입현상 검출

### Abstract

A method to model left ventricular assist device (LVAD) and detect suction occurrence for safe LVAD operation is presented. An axial flow blood pump as a LVAD has been used to assist patient with heart problems. While an axial flow blood pump, a kind of a non-pulsatile pump, has relative advantages of small size and efficiency compared to pulsatile devices, it has a difficulty in determining a safe pump operating condition. It can show different pump operating statuses such as a normal status and a suction status whether suction occurs in left ventricle or not. A fuzzy subtractive clustering method is used to determine a model of the axial flow blood pump with this pump operating characteristic and the developed pump model can provide blood flow estimates before and after suction occurrence in left ventricle. Also, a fuzzy subtractive clustering method is utilized to develop a suction detection model which can identify whether suction occurs in left ventricle or not.

**Key Words** : LVAD, fuzzy model identification, subtractive clustering, pump operating conditions, suction detection.

## 1. 서 론

좌심실 보조장치는 심장에 문제가 있는 환자를 지원하기 위한 보조장치이다. 일반적으로 심실보조장치는 사용하는 펌프의 종류에 따라 맥동성과 비맥동성 보조장치로 구분된다. 비맥동성 펌프는 크기와 효율에 있어 맥동성 펌프보다 우위에 있으며, 상대적으로 새로운 심실 보조장치이다. 비맥동성 펌프의 일종인 축류혈액펌프는 좌심실 보조장치로서 펌프의 속도에 비례하여 펌프를 통한 혈류량을 공급하게 된다. 보다 많은 혈류량이 필요한 경우, 고속의 펌프 속

도가 요구된다. 그러나 과도하게 펌프를 고속으로 운전할 경우, 좌심실내 펌프에 의한 흡입현상이 발생하게 되어 심장에 해를 미치게 된다[1-2].

좌심실에 펌프에 의한 흡입현상이 발생할 경우, 펌프의 특성은 급격하게 변화하게 된다. 이와 같이 흡입현상을 전후하여 급격하게 변하는 펌프 특성 때문에 단순한 펌프 모델은 흡입현상 전후를 한꺼번에 표현하지 못한다[3]. 또한 센서를 사용하지 않고 축류혈액펌프 모델을 이용하여 펌프를 통과하는 혈류량을 추정할 경우, 흡입현상이 일어나기 전의 혈류량만을 추정할 수 있다. 펌프의 동작 특성은 흡입현상 전후로 급격하게 변화하여, 흡입현상 전후로 별개의 동작 특성이 나타난다. 이는 펌프의 동작 특성이 여러 개로 구분되는 것처럼 보인다. 이와 같이 다수로 구분되는 펌프 특성은 다수의 모델을 결합하여 표현가능하며, 다수의 모델은 퍼지 클러스터링 기법을 사용하여 모델링이 가능하다

접수일자: 2012년 3월 19일

심사(수정)일자: 2012년 3월 19일

게재확정일자 : 2012년 8월 14일

† 교신 저자

[4-8].

본 논문에서는 퍼지 subtractive 클러스터링 기법을 사용하여 흡입현상이 수반된 펌프의 모델을 개발하고자 한다. 이는 전통적인 퍼지 c-means 클러스터링 기법이 아니라, 클러스터의 중심과 개수를 추정하는 mountain 기법에 기반을 둔 subtractive 기법을 사용한다[5-7]. 또한 개발된 펌프 모델을 이용하여 혈류량을 추정할 뿐만 아니라, 퍼지 subtractive 클러스터링 기법을 이용하여 펌프의 동작 상태를 정상 또는 흡입상태로 판정할 수 있는 흡입현상 검출 모델을 개발하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 축류혈액펌프의 동작 특성과 펌프 속도변화에 따른 흡입현상을 전후한 혈류량 등의 신호에 대하여 설명하고 3장에서는 퍼지 subtractive 클러스터링 기법에 관하여 소개한다. 4장에서는 실제 측정된 축류혈액펌프 데이터를 사용하여 클러스터링 기법을 적용한 축류혈액펌프 모델을 구현한다. 또한 펌프의 구동 특성을 예측할 수 있는 펌프 흡입현상 검출 모델을 개발한다. 5장에서는 본 논문의 결론을 설명한다.

## 2. 축류혈액펌프의 동작특성

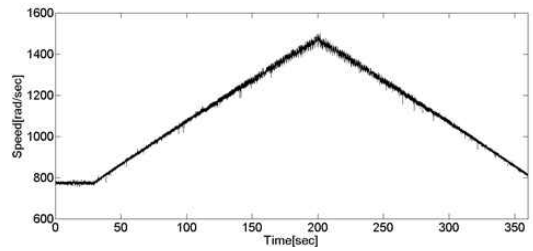
축류혈액펌프는 크기와 효율성에 있어 맥동성 펌프보다 우위에 있으나, 맥동성 펌프와 달리 펌프 속도를 제어하기 어려운 동작특성을 갖는다. 축류혈액펌프가 보다 많은 혈류량을 인체에 공급하기 위하여 펌프를 보다 고속으로 운전하여야 한다. 그러나 과도하게 펌프 운전 속도를 증가할 경우, 심실 내부의 혈류량보다 많은 혈류량의 요구하게 되어, 좌심실내 조직이 펌프로 빨려 들어가는 흡입현상이 발생할 수 있다. 또한 요구되는 인체 혈류량의 변화에 따라 펌프의 운전속도도 변화하여야 한다. 만일 펌프를 통과하는 혈류량을 측정할 수 있다면, 측정된 혈류량을 이용하여 펌프의 속도를 제어할 수 있다. 혈류량을 측정에 필요한 센서는 현실적으로 체내에 삽입함에 어려울 뿐만 아니라 장기간 사용시 신뢰성 문제가 발생한다[9].

이를 해결하기 위하여 외부에서 측정 가능한 신호인 펌프 속도와 모터 구동에 필요한 전류를 이용하여 센서를 사용하지 않고 펌프를 통한 혈류량을 추정할 수 있는 수학적 모델이 개발되었다. 그러나 개발된 모델은 펌프 흡입현상이 발생하지 않은 펌프 데이터를 이용한 제한적인 펌프 모델이다. 개발된 모델은 흡입현상 발생전의 혈류량을 추정할 수 있으나, 흡입현상 발생이 임박했을 경우 또는 발생 후 혈류량을 추정에 어려움이 있다[2, 3].

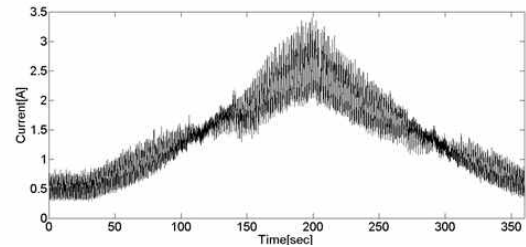
그림 1은 본 논문에서 사용할 축류혈액펌프의 동작특성을 나타내고 있다. 펌프 속도가 증가함에 따라 펌프를 통한 혈류량은 지속적으로 증가하나, 흡입현상 발생한 후에는 펌프 속도가 증가하더라도 펌프를 통한 혈류량이 증가하지 않고 있음을 보여주고 있다. 펌프의 흡입현상이 발생한 경우 펌프의 속도 증가에 무관하게 펌프를 통한 혈류량은 거의 일정하게 유지된다. 펌프 속도를 최고 속도에 도달한 후 최저 속도까지 지속적으로 감소시키면, 특정 펌프 속도에서 흡입현상이 해제된다. 흡입현상이 해제된 이후 혈류량은 펌프 속도가 감소함에 따라 감소하게 된다.

또 다른 축류혈액펌프의 특성은 펌프 속도가 증가에 따른 혈류량의 펄스세기이다. 펌프의 운전속도를 증가하게 되면, 펌프 속도의 증가에 따라 혈류량의 펄스세기는 지속적

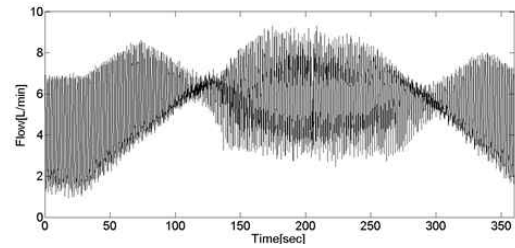
으로 감소하게 된다. 흡입현상이 발생한 이후에는 펌프속도의 증가에도 불구하고 펄스세기는 증가하게 되며, 펌프속도가 감소하여 혈류량의 펄스세기가 감소하고 흡입현상이 해제된 이후에는 속도감소에 따라 다시 펄스세기가 증가하게 된다. 이는 심실의 맥동성이 유지되고 있을 경우 발생하는 축류혈액펌프의 동작특성이다. 따라서 단순한 혈류량의 펄스세기만을 이용할 경우, 심실내의 흡입현상여부를 판단에 어려움이 있음을 알 수 있다.



(a) 펌프 구동 속도



(b) 펌프 구동 전류



(c) 펌프 혈류량

그림 1. 펌프 구동 속도 변화에 따른 축류혈액펌프의 동작 특성: (a) 펌프 구동 속도, (b) 펌프 구동 전류, (c) 펌프 혈류량

Fig. 1. Operating characteristics of axial flow blood pump with a pump operating speed change: (a) pump operating speed, (b) pump operating current, (c) pump blood flow

그림 2는 앞에서 설명한 펌프의 동작상태를 전류, 속도, 그리고 혈류량의 관계로 나타낸 것이다. 그림에서 'o'로 표시된 것은 흡입현상이 발생하기 전의 정상상태를 나타내고 있으며, 'x'로 표시된 것은 흡입현상이 발생한 이후의 펌프의 동작상태를 나타내고 있다. 흡입현상 발생 여부에 따라 펌프의 동작 영역이 분리되고 있음을 나타내고 있으며, 이는 특정 동작상태에 따라 클러스터링이 이루어지고 있음을 보여준다. 이와 같은 펌프 동작특성을 클러스터링 기법을 사용하여 효율적으로 모델링 하고자 한다.

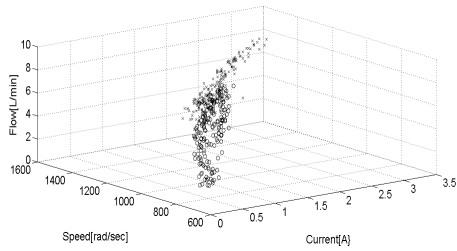


그림 2. 펌프 동작 특성: 펌프 혈류량과 펌프 속도 및 펌프 구동 전류

Fig. 2. Pump operating characteristics: pump blood flow vs. pump operating current and pump

### 3. 퍼지 subtractive 클러스터링 기법을 이용한 모델링

퍼지 c-means 클러스터링은 주어진 데이터의 특성에 따라 특정한 중심을 갖는 클러스터로 데이터를 분류할 수 있음에 기반을 두고 있다[4]. 다음과 같은 n개의 p차 데이터를 고려하자. 퍼지 c-means 클러스터링은 다음과 같은 비용함수를 최소화하는 추차적인 기법이다.

$$J = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c \mu_{ik}^m \|x_k - v_i\|^2 \quad (1)$$

여기서 n은 데이터 포인트 숫자이며, c는 클러스터 개수,  $x_k$ 는 k번째 데이터 포인트,  $v_i$ 는 i번째 클러스터 중심이며,  $\mu_{ik}$ 는 i번째 클러스터 중심과 k번째 데이터의 멤버십의 정도이다. m은 1보다 큰 상수이다. (일반적으로  $m=2$ 이다.) 이때  $\mu_{ik}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mu_{ik} = \frac{1}{\sum_{j=1}^c \left( \frac{\|x_k - v_i\|}{\|x_k - v_j\|} \right)^{\frac{2}{m-1}}} \quad (2)$$

원하는 클러스터 수와 클러스터 중심을 선택하면, 퍼지 c-means 클러스터링 기법은 모든 데이터를 정해진 c개의 클러스터에 할당하며 그 정도는 0과 1사이의 퍼지값으로 주어진다. 퍼지 c-means 클러스터링 기법은 초기 클러스터 중심과 클러스터 수와 같은 초기 값 선정에 따라 그 특성이 좌우되는 단점이 있다.

퍼지 subtractive 클러스터링 기법은 퍼지 c-means 클러스터링 기법의 단점인 초기 클러스터 중심과 클러스터 수의 선정과 같은 작업을 효율적으로 수행한다. 퍼지 subtractive 클러스터링 기법은 모든 데이터 포인트가 클러스터 중심의 자격이 될 수 있다는 가정에서 출발하며, 추차적인 방법으로 클러스터 수 및 중심을 갱신하여 클러스터의 수를 조정한다[6, 7]. 다음과 같이 특정 데이터 포인트  $x_i$ 에서 포텐셜 정도를 정의한다.

$$P_i = \sum_{j=1}^n e^{-\alpha \|x_i - x_j\|^2} \quad (3)$$

여기서  $\alpha = \frac{4}{r_a^2}$ 이며  $r_a$ 는 양의 정수이다. 위의 정의된 포텐셜 정도는 주변을 둘러싸고 있는 다른 데이터 포인트와 거리에 따라 달라지며, 보다 가까운 데이터 포인트가 많을수록 그 값이 크다. 모든 데이터의 포텐셜을 구한 후 가장 큰 포텐셜을 가진 포인트를 첫번째 클러스터 중심  $x_1^*$ 이라 하고 그 포텐셜 값을  $P_1^*$ 라 한다. 주어진 클러스터 중심  $x_1^*$ 과 포텐셜 값  $P_1^*$ 을 이용하여 데이터 포인트  $x_i$ 에서의 포텐셜 정도를 다음과 같이 갱신한다.

$$P_i = P_i - P_1^* e^{-\beta \|x_i - x_1^*\|^2} \quad (4)$$

이때  $\beta = \frac{4}{r_a^2}$ 이며 양의 상수이다. 새로 갱신된 포텐셜의 값은 첫 번째 클러스터 중심에 가까울수록 그 값이 작으며 갱신된 포텐셜 정도의 값이 가장 큰 데이터 포인트를 두번째 클러스터 중심으로 선택한다. 세 번째 클러스터 센터는 두 번째 클러스터 중심  $x_2^*$ 과 포텐셜 값  $P_2^*$ 을 이용하여 구한다. 일반적으로 k번째 클러스터 중심  $x_k^*$ 에서 모든 데이터의 포텐셜 정도는 다음 식과 같이 갱신하며 이를 이용하여 다음 클러스터 중심을 구한다.

$$P_i = P_i - P_k^* e^{-\beta \|x_i - x_k^*\|^2} \quad (5)$$

데이터 클러스터링을 위한 필요한 클러스터 중심은 위와 같은 추차적인 방법을 이용하여 구한다.

주어진 클러스터 중심을 이용한 퍼지 시스템 모델은 구성된 클러스터 중심이 계통의 행동을 규정할 수 있는 법칙이라 가정하며 구성된 클러스터 중심이 다음과 같다고 가정한다.

$$\{x_1^*, x_2^*, \dots, x_{c-1}^*, x_c^*\}$$

클러스터 중심  $x_i^*$ 은 p차원의 데이터며 처음 q개의 변수를 입력벡터  $y_i^*$ 이라 하고 나머지 p-q개의 변수를 출력벡터  $z_i^*$ 이라 가정한다.  $x_i^*$ 가 주어진 계통의 규정하는 하나의 법칙이라 할 경우, 입력  $y$ 가 클러스터 중심  $x_i^*$ 에 대한 충족 정도는 다음과 같이 정의된다.

$$\mu_i = e^{-\alpha \|y - y_i^*\|^2} \quad (6)$$

이때  $\alpha = \frac{4}{r_a^2}$ 이며  $r_a$ 는 양의 정수이다. 또한 주어진 입력  $y$ 에 대한 출력  $z$ 는 다음 식을 이용하여 계산한다.

$$z = \frac{\sum_{i=1}^c \mu_i z_i^*}{\sum_{i=1}^c \mu_i} \quad (7)$$

식 (6), (7)로 표현되는 계산식은 전형적인 퍼지 IF-THEN 법칙을 사용하는 퍼지추론시스템과 유사함을 알 수 있다. 이와 같이 클러스터링 기법을 이용하여 주어진 계

통의 퍼지 모델을 구현할 수 있으며  $z_i^*$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$z_i^* = G_i y + h_i \quad (8)$$

여기서  $G_i$ 는 매트릭스이며,  $h_i$ 는 벡터이다.  $z_i^*$ 는 입력벡터  $y$ 의 선형결합으로 표현되고 있으며, 자세한 내용은 [6, 7]를 참조한다.

#### 4. 축류혈액펌프 모델 및 흡입현상 검출모델의 개발

##### 4.1 클러스터링 기법을 이용한 축류혈액펌프 모델

축류혈액펌프 모델에 사용된 데이터는 실제 동물실험 데이터를 사용하였고 그림 1에 나타나있다. 축류혈액펌프 모델 개발을 위하여 구동 전류와 펌프 속도를 모델의 입력으로 정의하고 펌프를 통한 혈류량을 출력으로 정의하였으며, 펌프 모델은 MATLAB (Mathworks, U.S.A.) 환경에서 구현하였다.

주어진 동물 데이터에 subtractive 클러스터링 기법을 적용하여 축류혈액펌프 모델을 개발하였다. 펌프 모델을 훈련하기 위한 데이터는 전체 데이터의 반을 이용하였고 나머지 반은 훈련된 모델의 평가를 위하여 사용하였다. 즉, k 번째 데이터는 훈련을 위한 데이터이며 나머지 (k+1)번째 데이터는 평가를 위한 데이터이다. 모델 평가는 Root Mean Squares Error (RMSE)를 사용하여 정량화 하였으며 평가 데이터를 사용한 경우 RMSE는 0.6659이다. 결정된 모델은 5개의 클러스터 중심을 가지고 있으며, 클러스터 중심의 입력성분은 다음과 같다.

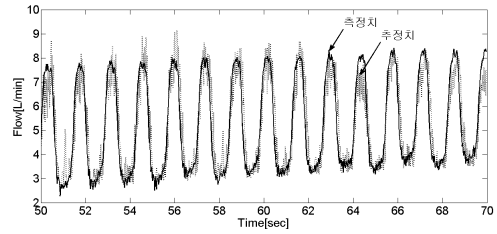
$$\begin{aligned} y_1^* &= \begin{bmatrix} 1.4 \\ 1120 \end{bmatrix}, y_2^* = \begin{bmatrix} 0.7 \\ 867 \end{bmatrix}, y_3^* = \begin{bmatrix} 2.3 \\ 1359.4 \end{bmatrix} \\ y_4^* &= \begin{bmatrix} 0.8 \\ 853.6 \end{bmatrix}, y_5^* = \begin{bmatrix} 1.9 \\ 1399.6 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

또한 식(8)과 같이 표현되는 클러스터 중심 출력식은 다음과 같이 주어진다.

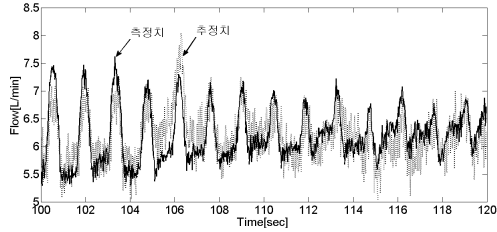
$$\begin{aligned} z_1^* &= [5570.3 - 21.7]y + 22928.3 \\ z_2^* &= [-1105.4 \ 1.6]y - 3909 \\ z_3^* &= [-10601.5 \ 3.3]y + 51067.3 \\ z_4^* &= [-1038.1 \ 1.1]y + 3258.3 \\ z_5^* &= [-13992.3 \ 22.6]y - 24168.3 \end{aligned} \quad (10)$$

특정 입력  $y$ 에 대하여, 식(9)에 주어진 클러스터 중심과 식(6)에 따라  $\mu_i$ 를 구한다. 이 후 식(10)과, 그리고 식(7)을 이용하여 특정입력에 대한 출력력을 얻을 수 있다.

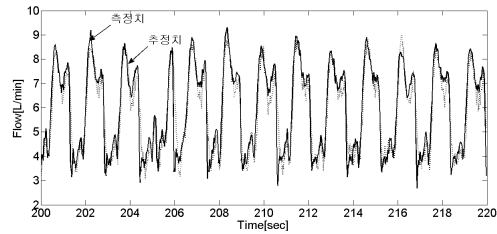
그림 1에 나타나있듯 펌프 속도가 증가함에 따라 흡입현상은 약 120초에서 발생하고 있으며, 그 후 펌프 속도를 감소할 경우 약 300초에서 흡입현상이 해제됨을 알 수 있다.



(a) 정상상태의 혈류량 비교



(b) 흡입현상 발생직전의 혈류량 비교



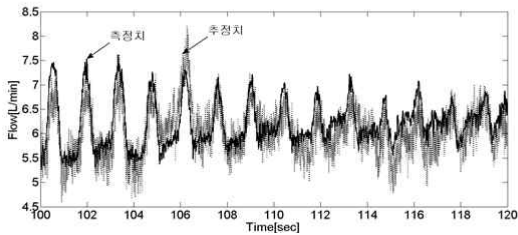
(c) 흡입현상 발생 중 혈류량 비교

그림 3. 축류혈액펌프 모델을 이용한 혈류량 추정: (a) 정상상태의 혈류량 비교, (b) 흡입현상 발생직전의 혈류량 비교, (c) 흡입현상 발생 중 혈류량 비교  
Fig. 3. Blood flow estimation using axial flow blood pump model: (a) blood flow comparison during normal status, (b) blood flow comparison just before suction occurrence, (c) blood flow comparison during suction occurrence

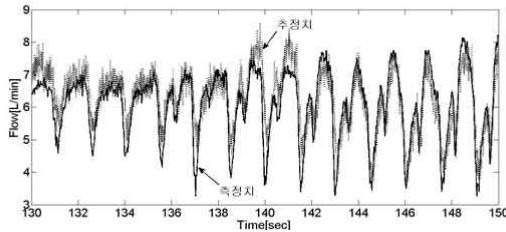
그림 3은 개발된 모델의 혈류량의 추정치를 측정치와 비교하여 나타내고 있다. 훈련된 모델은 흡입현상이 발생하기 전의 혈류량을 추정 (그림3-a)할 뿐만 아니라, 흡입현상이 발생하기 직전 (그림3-b), 그리고 흡입현상이 일어난 후 (그림3-c)의 혈류량을 추정하고 있다. 이는 혈액펌프 모델을 위하여 subtractive 클러스터링 기법을 사용할 경우, 흡입현상 발생에도 불구하고 효과적인 모델링이 가능함을 보여주고 있다.

또한 펌프 모델 훈련을 위하여 훈련 데이터로 흡입현상이 일어나기 전 데이터와 흡입현상 발생한 후 데이터를 사용하여 subtractive 클러스터링 기법을 적용하였다. 흡입현상이 발생하기 전인 0-100초의 데이터와 흡입현상이 발생 중인 150-200초의 데이터를 훈련 데이터로 사용하였으며 흡입현상 발생 전후의 데이터는 사용하지 않았다. 흡입현상 발생 전후인 100-150초의 데이터는 개발된 펌프 모델의 평가를 위한 평가 데이터로 사용하였다. 그림 4는 개발된 펌

프 모델을 이용하여 흡입현상 전후의 혈류량 추정에 대한 결과를 나타내고 있으며, 이때의 RMSE는 0.5112 이다. 결정된 클러스터 중심은 4개이며, 클러스터 중심의 입력과 출력식을 표 1에 요약하였다. 그림 4에서는 개발된 펌프 모델은 모델 훈련을 위하여 흡입현상 발생 전후의 데이터를 사용하지 않았음에도 불구하고 혈류량을 추정하고 있음을 알 수 있다. Subtractive 클러스터링 기법을 이용하여 효과적으로 흡입현상 발생을 포함한 혈액펌프모델 개발이 가능함을 알 수 있다.



(a) 흡입현상 발생직전의 혈류량 비교



(b) 흡입현상 발생 중 혈류량 비교

그림 4. 축류혈액펌프 모델을 이용한 혈류량 추정. (흡입현상 발생 전후의 데이터를 이용하지 않고 모델을 훈련한 경우) : (a) 흡입현상 발생 직전의 혈류량 비교, (b) 흡입현상 발생 중 혈류량 비교

Fig. 4. Blood flow estimation using axial flow blood pump model. (Case for training the model without using the data before and after suction occurrence.) : (a) blood flow comparison just before suction occurrence, (b) blood flow comparison during suction occurrence

표 1. 클러스터 중심의 입력성분과 출력식  
Table 1. Input components of cluster centers and output equations

클러스터 중심 입력성분	클러스터 중심 출력모델
$y_1^*$ [2.1 1364.4] <sup>T</sup>	$z_1^*$ [4.0667 -0.0191]y+21.8516
$y_2^*$ [0.7 867.2] <sup>T</sup>	$z_2^*$ [19.3850 -0.0154]y+5.5664
$y_3^*$ [2.6 1385.3] <sup>T</sup>	$z_3^*$ [2.2922 -0.0214]y+32.2009
$y_4^*$ [1.0 921.1] <sup>T</sup>	$z_4^*$ [4.4599 -0.0117]y+10.0264

기존의 흡입현상 발생 전의 데이터를 사용하여 개발된 혈액펌프모델은 흡입현상 발생 전후의 혈류량을 추정하기 어려운 단점을 가지고 있으나 [2, 3], 퍼지 subtractive 클러스터링 기법을 이용한 혈액펌프모델은 흡입현상 발생 전후의 혈류량 추정의 어려움을 효율적으로 대처하여 흡입현상 발생 전후의 혈류량 추정이 가능하다.

#### 4.2 흡입현상 검출 모델 개발

앞 절에서는 펌프 모델의 입력으로 펌프 속도와 구동 전류를 정의하고 출력으로 혈류량을 정의 하였다. 흡입현상 검출 모델은 펌프 모델과는 달리 흡입현상 여부를 출력으로 정의하였다. 흡입현상 검출 모델은 입력으로 펌프속도와 구동전류를 사용하였고 출력으로 흡입현상 발생여부를 사용하였다. 흡입현상 발생여부는 동물실험 데이터를 조사하여 발생여부를 결정한 후 이를 출력 데이터로 구성하였다. 그림 1에 나타난 펌프속도와 구동전류에 대응된 출력인 흡입현상 발생 상태는 0-120초는 정상상태, 120-300초는 흡입현상 발생상태, 그리고 300-350초 다시 정상상태로 정의하였다. 정상상태일 경우 출력을 1로, 그리고 흡입현상 발생상태일 경우 출력을 0으로 정하였다.

먼저 흡입현상 모델의 훈련을 위한 데이터는 전체 데이터의 반을 사용하였고 나머지 반은 개발된 모델의 평가를 위하여 사용하였다. 즉, 전체 데이터 중 k번째 데이터는 모델의 훈련을 위한 데이터이며 나머지 (k+1)번째 데이터는 모델의 평가를 위한 데이터이다. 그림 5는 개발된 흡입현상 모델을 이용한 펌프의 흡입현상 검출 여부를 나타내고 있다. 모델 개발을 위하여, 흡입현상의 발생 여부를 120초와 300초에서 명확하게 분리하여 출력으로 정하였으나 개발된 모델은 흡입현상 발생여부를 명확하게 분리하여 추정하지 않고 있다. 그 대신 흡입현상 발생 시점을 전후하여 과도적인 특성을 갖도록 펌프의 동작특성을 추정하고 있다. 사실 명확하게 흡입현상이 발생하기 까지 펌프의 속도를 높여 운전하는 것보다는 어느 정도의 안전 영역을 확보하며 펌프의 속도를 조절하여 운전하는 것이 환자의 안전을 위하여 보다 바람직하다. 퍼지 subtractive 클러스터링 기법을 사용하여 흡입현상 발생 모델을 개발할 경우, 개발된 모델은 흡입현상 발생여부를 예측하여 안전한 혈류 펌프의 운전에 기여할 수 있다. 평가 데이터를 사용한 경우 RMSE는 0.1877이다. 모델 결정에 필요한 클러스터 중심은 4개이며, 클러스터 중심의 입력성분과 출력식은 표 2에 나타내었다.

표 2. 클러스터 중심의 입력성분과 출력식 (흡입현상 발생 전후 데이터를 사용한 흡입현상 검출모델)

Table 2. Input components of cluster centers and output equations (Suction detection model trained with data before and after suction occurrence)

클러스터 중심 입력성분	클러스터 중심 출력모델
$y_1^*$ [0.8 913.2] <sup>T</sup>	$z_1^*$ [-0.2554 -0.0001]y+1.1768
$y_2^*$ [1.8 1278.9] <sup>T</sup>	$z_2^*$ [-1.7422 -0.0038]y+9.8658
$y_3^*$ [2.8 1461.4] <sup>T</sup>	$z_3^*$ [-0.1893 -0.0020]y+3.4898
$y_4^*$ [1.6 1159.7] <sup>T</sup>	$z_4^*$ [0.5426 -0.0162]y+16.6263

그림 5는 흡입현상 모델 개발을 위하여 흡입현상 발생 전후의 데이터를 포함한 모든 펌프 동작 상태의 데이터를 사용하여 개발한 경우이다. 보다 안전한 흡입현상을 검출을 위한 모델 개발을 위하여 흡입현상 발생 전후의 특정 구간 데이터를 배제하고 훈련에 필요한 데이터를 구성하여 흡입현상 모델을 개발하였다. 즉 모델 개발을 위한 훈련 데이터로 흡입현상 발생 전후의 일정구간의 데이터를 사용하지 않았다. 훈련 데이터로 펌프의 안전 운전구간인 0-100초간의 데이터와 흡입현상이 발생한 후인 150-250초간의 데이

터를 이용하였으며, 개발된 모델의 평가를 위하여 100-150 초간 데이터를 사용하였다. 이와 같은 평가 데이터를 사용한 경우 RMSE는 0.1957이다. 또한 모델 결정에 필요한 클러스터 중심은 2개이며, 클러스터 중심의 입력성분과 출력식은 표 3에 나타내었다.

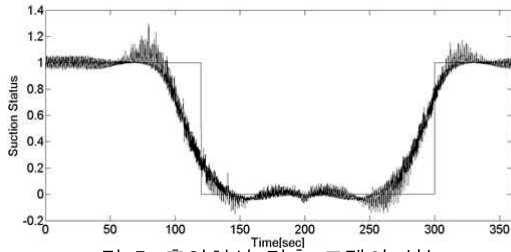


그림 5. 흡입현상 검출 모델의 성능  
Fig. 5. Performance of suction detection model

표 3. 클러스터 중심의 입력성분과 출력식 (흡입현상 발생 전후 데이터를 사용하지 않은 흡입현상 검출모델)  
Table 3. Input components of cluster centers and output equations (Suction detection model trained without data before and after suction occurrence)

클러스터 중심 입력성분	클러스터 중심 출력모델
$y_1^*$ [2.2 1370.2] <sup>T</sup>	$z_1^*$ [0.002617 -0.000065]y+0.084132
$y_2^*$ [0.7 857.9] <sup>T</sup>	$z_2^*$ [0.043064 0.000039]y+0.940018

그림 6은 위에 언급된 흡입현상 검출모델을 이용한 경우, 펌프의 흡입현상여부를 나타내고 있다. 개발된 모델은 그림 5와 마찬가지로 펌프 흡입현상 발생여부를 과도현상과 함께 표현하고 있다. 훈련에 사용된 흡입현상 데이터는 흡입현상 발생 전후의 과도기에 해당하는 값을 포함하지 않고 있음에도 불구하고 검출모델은 흡입 현상 여부를 과도기에 해당하는 값으로 표현하고 있다. 퍼지 subtractive 클러스터링 기법은 1과 0만의 결과가 아닌 과도상태 값을 제시함으로써 보다 안전한 펌프운전에 기여할 수 있다.

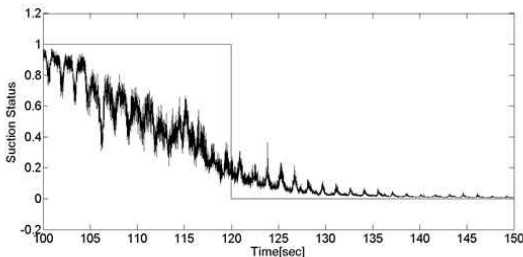


그림 6. 흡입현상 검출 모델의 성능 (흡입현상 발생 전후의 데이터를 사용하지 않고 검출모델을 훈련한 경우)  
Fig. 6. Performance of suction detection model (Case for training the detection model without using the data before and after suction occurrence.)

퍼지 subtractive 클러스터링 기법을 이용하여 개발된 흡입현상 검출모델은 모델 개발에 특별한 전처리 과정이 필요하지 않고 직접 측정된 데이터와 입력된 흡입현상 데

이터를 이용하여 간단하게 구성할 수 있다. 이는 흡입현상 검출모델 개발을 위해 다양한 전처리 과정을 필요한 경우와 대조적이다[10].

### 4.3 퍼지 subtractive 클러스터링 모델과 통계적 회귀모델과의 비교

퍼지 subtractive 클러스터링 기법을 사용하여 개발된 펌프모델 및 흡입현상 모델의 성능을 비교하기 위하여, 다음과 같은 통계적 회귀모델을 사용하였다[11].

$$z = \alpha_0 + \sum_{i=1}^k \alpha_i y_i + \sum_{i=1}^k \alpha_{ii} y_i^2 + \sum_i \sum_j \alpha_{ij} y_i y_j \quad (11)$$

여기서  $z$ 는 시스템의 출력,  $\alpha_i, \alpha_{ij}$ 는 회귀상수,  $y_i$ 는 시스템의 입력이며,  $k$ 는 입력의 수이다. 비교를 위하여 다음과 같은 네 가지 회귀모델을 구성하였다. 첫 번째 모델 (Type 1)은 식(11)의 처음 두 항을 이용하고 있으며, 두 번째 모델 (Type 2)은 처음 세 항으로 구성하였다. 세 번째 모델 (Type 3)은 식(11)의 처음 두 항과 넷째 항으로 구성하였고, 네 번째 모델 (Type 4)은 식(11)의 모든 항을 이용하여 구성하였다. 앞 절에서 퍼지 subtractive 클러스터링 모델을 결정하는 데 사용한 입출력 데이터를 이용하여 네 가지 회귀모델을 결정하였다. 회귀 모델의 성능 평가를 위하여 평가 데이터를 이용하여 RMSE값을 구하였고, 회귀모델과 퍼지 subtractive 클러스터링 모델의 RMSE값을 비교하여 표 4에 나타내었다. 네가지 회귀모델 중, Type4의 회귀모델이 펌프 모델의 경우 가장 좋은 특성을 나타내고 있다. 흡입현상 검출모델의 경우, Type 3와 Type 4의 회귀모델이 우위를 나타내고 있으나, 네가지 모델 모두 거의 유사한 특성을 가지고 있다. 그러나, 모든 경우에 있어 퍼지 subtractive 클러스터링 기법을 사용한 펌프 모델 및 흡입현상 검출모델은 통계적 회귀모델을 사용한 펌프 모델 및 흡입현상 검출모델에 비하여 RMSE에 있어 우위를 나타내고 있으며, 10% - 27%정도의 향상된 결과를 나타내고 있다.

표 4. 퍼지 subtractive 클러스터링 모델과 통계적 회귀모델과의 성능 비교

Table 4. Comparison between fuzzy subtractive clustering models and statistics regression models

	Type 1 모델	Type 2 모델	Type 3 모델	Type 4 모델	Subtractive 클러스터 링 모델	향상 정도 (%)
펌프모델 (흡입현 상 발생 전후 데이터 사용)	1.1496	0.7650	0.7663	<b>0.7470</b>	<b>0.6659</b>	10.8
펌프모델 (흡입현 상 발생 전후 데이터 미사용)	1.0916	0.6766	0.6782	<b>0.6319</b>	<b>0.5112</b>	19.1

흡입현상 검출모델 (흡입현 상 발생전후 데이터 사용)	0.2598	0.2580	<b>0.2597</b>	0.2580	<b>0.1877</b>	27.7
흡입현상 검출모델 (흡입현 상 발생전후 데이터 미사용)	<b>0.4042</b>	0.4098	0.4093	0.4104	<b>0.3197</b>	20.9

### 5. 결론

축류혈액펌프 모델과 흡입현상 검출 모델을 퍼지 subtractive 클러스터링 기법을 이용하여 개발하였다. 축류혈액 펌프는 운전조건에 따라 펌프에 흡입현상이 발생할 수 있으며, 흡입현상 전후로 펌프의 동작 특성이 현저하게 변한다. 퍼지 subtractive 클러스터링 기법을 적용한 펌프 모델은 이와 같은 펌프의 운전 특성을 효과적으로 대처하여, 흡입현상 전후의 펌프를 통한 혈류량을 추정할 수 있다. 또한 퍼지 subtractive 클러스터링 기법을 이용하여 개발된 흡입현상 검출 모델은 특별한 측정 데이터의 전처리 과정을 요구하지 않고 있어, 간편하게 흡입현상을 효과적으로 검출할 수 있으며, 검출 모델 훈련 데이터로 흡입현상 발생 전후 데이터를 배제하여 모델을 개발할 수도 있다. 개발된 흡입현상 검출 모델은 과도기적 흡입현상 발생을 표현할 수 있으며 안전한 혈액펌프의 운전 동작 특성을 예측할 수 있다.

### 참고 문헌

[1] S. Choi, J. F. Antaki, J. R. Boston, and D. Thomas, "A sensorless approach to control of a turbodynamic left ventricular assist system," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 9, no. 3, pp. 473-482, 2001.

[2] S. Choi, J. R. Boston, and J. F. Antaki, "Hemodynamic controller for left ventricular assist device based on pulsatility ratio," *Artificial Organs*, vol. 31, no. 2, pp. 114-125, 2007.

[3] S. Choi, J. R. Boston, D. Thomas, and J. F. Antaki, "Modeling and identification of an axial flow blood pump," *Proceedings of American Control Conference*, vol. 6, pp. 3714-3715, Albuquerque, NM, 1997.

[4] J. C. Benzek, *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*, Plenum Press, NY, 1981.

[5] R. R. Yager and D. P. Filev, "Approximate clustering via the mountain method," *IEEE Transactions on systems, man, and Cybernetics*, vol. 24, no. 8, pp. 1279-1284, 1994.

[6] S. L. Chiu, "A cluster estimation method with extension to fuzzy model identification," *Proceedings of The Third IEEE Conference on Fuzzy Systems*, vol. 2, pp. 1240-1245, Orlando, Florida, 1994.

[7] S. L. Chiu, "Fuzzy model identification based on cluster estimation," *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, vol. 2, pp. 267-278, 1994.

[8] K. M. Lee and K. M. Lee, "Fuzzy technique-based identification of close and distant clusters in clustering," *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, vol. 11, no. 3, pp. 165-170, 2011.

[9] H. Schima, W. Trubel, A. Moritz, G. Wieselthaler, H. G. Stohr, H. Thomas, U. Losert, and E. Wolner, "Noninvasive monitoring of rotary blood pumps: necessity, possibilities, and limitations," *Artificial Organs*, vol. 6, pp. 195-202, 1992.

[10] S. Choi, "Suction detection in left ventricular assist system: data fusion approach," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 1, no. 3, pp. 368-375, 2003.

[11] B. Kim, H. J. Kwon and S. Choi, "Use of adaptive network fuzzy inference system to predict plasma charging damage on electrical MOSFET properties," *Expert Systems with Applications*, vol. 36, pp. 6570-6573, 2009.

### 저 자 소 개



#### 박승규(Seungkyu Park)

1984년 : 고려대학교 전기공학과 공학사  
 1986년 : 고려대학교 전기공학과 공학석사  
 1990년 : 고려대학교 전기공학과 공학박사  
 1990년~현재 : 창원대학교 메카트로닉스 공학부 교수

관심분야 : T-S Fuzzy, Fuzzy Application, Robot Control  
 Phone : 055-213-3634  
 E-mail : skpark@changwon.ac.kr



#### 최성진(Seongjin Choi)

1984년 : 고려대학교 전기공학과 공학사  
 1986년 : 고려대학교 전기공학과 공학석사  
 1998년 : 피츠버그대학교 전기공학과 공학박사  
 2003년~현재 : 고려대학교 전자및정보공학과 교수

관심분야 : Fuzzy Systems, Modeling, Complex Systems  
 Phone : 044-860-1357  
 E-mail : choisj@korea.ac.kr