

## 공압식 박동형 심실보조장치에서 공압관 내 공기압에 따른 박출량 추정<sup>§</sup>

강유민\* · 이진홍\* · 허 균\*\* · 최성욱\*†

\* 강원대학교 융합시스템공학과, \*\* 순천향대학병원 흉부외과

### Estimation of Stroke Volume Based on Air Pressure in Air Tube with Pneumatic Pulsatile Ventricular Assist Device

Yu Min Kang<sup>\*</sup>, Jin Hong Lee<sup>\*</sup>, Keun Her<sup>\*\*</sup>, Seong Wook Choi<sup>\*†</sup>

<sup>\*</sup> School of Fusion System Engineering, Kangwon Nat'l Univ.

<sup>\*\*</sup> Dept. of Cardiovascular and Thoracic Surgery, Soonchunhyang University Hospital

(Received March 28, 2014 ; Revised July 25, 2014 ; Accepted August 29, 2014)

**Key Words:** Ventricular Assist Device(심실보조장치), Estimation of Stroke Volume(박출량 추정), Air Pressure(공기압)

**초록:** 심실보조장치는 심장질환자에게 심장이식까지의 가교로서 사용된다. 공압식 박동형 심실보조장치를 체내에 이식했을 때, 심실보조장치를 통과하는 혈류가 느려질 경우 혈전이 발생할 수 있기 때문에 박출량을 측정하는 것이 중요하다. 심실보조장치의 박출량을 측정하기 위해 각종 센서를 함께 이식할 경우, 감염의 위험성이 커지기 때문에 본 연구에서는 체외에서 측정할 수 있는 공압관 내 압력을 통해 심실보조장치의 상태를 추정하고자 한다. 체외실험을 통해 공압식 박동형 심실보조장치의 공압관 내 차동압력과 심실보조장치 박출량의 상관관계를 계산하였다. Pearson correlation coefficient  $r=0.623$  으로 두 값의 상관관계가 높으며, 박출량 추정값과 측정값에서 오차가 있었지만 공기 분자의 이동에 따른 식을 개발하여 박출량 추정의 정확성을 높일 수 있을 것으로 보인다.

**Abstract:** A ventricular assist device (VAD) is used for bridge to heart transplantation and heart diseases. Knowing the status of a pneumatic pulsatile VAD when implanting it into the body is important: when the velocity of blood flow through the VAD is slow, a thrombus may occur, and thrombosis can be fatal to a patient. In order to determine the state of a VAD, various sensors need to be implanted. Because this introduces the risk of infection and difficulties with sensor management, we developed a method for estimating the state of a VAD indirectly via the pressure in an air tube that can be measured in vitro. We compared the measured values to in vitro experimental results. The estimated and measured values showed some errors, but the accuracy can be improved by refining the estimation process to minimize the risk of infection.

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 필요성

국내에서 말기심부전 환자는 일반적으로 심장이식을 통한 치료법이 유일하다. 기계식 인공심장을

이용한 치료는 이미 외국에서 보편적으로 실시하고 있는 방법으로, 최근 국내 의료원에서 치료법을 시도하는 경우가 증가하고 있는 추세이다.

인공심장의 한 종류인 심실보조장치는 심장질환 환자에게 심장이식까지의 가교로서 심장의 기능을 보조하기 위해 사용되는 장치이다.<sup>(1,2)</sup> 또한 심실보조장치는 말기 심장질환 환자의 생존률을 향상시킬 수 있는 가장 효과적인 수단임이 증명되었다.<sup>(3)</sup> 심실보조장치는 심장 박출의 혈류를 모사한 박동형과 체내 이식에 최적화를 위해 소형화 시킨 연속류형 혈액펌프로 구

§ 이 논문은 2014년도 대한기계학회 바이오공학부문 춘계 학술대회(2014. 4. 9.-11., The-K 경주호텔) 발표논문임

† Corresponding Author, swchoe@kangwon.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

분될 수 있다. 그 중 박동형 심실보조장치는 실제 심장에서 발생하는 박동혈류를 모방하여 체내에 공급해주며, 박동혈류는 연속혈류에 비해 체내에 더욱 많은 혈류를 공급할 수 있다고 알려져 있다.<sup>(4)</sup>

위와 같은 장점에도 불구하고 공압식 박동형 심실보조장치의 경우 구조상 체외로 구동부가 연결되어 있어서 감염의 위험성이 크다고 할 수 있다.<sup>(5-7)</sup> 게다가 심실보조장치를 사용함에 있어 혈류 속도가 느려질 경우 혈전이 생길 수 있다.<sup>(8,9)</sup> 특히 심실보조장치의 혈액 박출량을 모니터링 하는 것은 의료기기의 안전성 측면에서 매우 중요한 부분이다. 때문에 각종 센서도 함께 이식하며 심실보조장치의 상태와 함께 환자의 상태를 관찰하는 기술이 많이 개발되어 있다. 심박출량을 측정하는 가장 일반적인 방법인 열회석법은 연속적으로 사용할 수 없고 심실보조장치와 함께 이식되어 영구적으로 사용하는 것이 불가능하다. 초음파 혈류 측정장치 역시 센서와 증폭단이 크기 때문에 심실보조장치와 함께 이식하여 영구적으로 사용하는 것이 어려울 수 있다. 대부분의 심실보조장치는 초음파센서를 이용하여 심실보조장치의 박출량을 측정하거나 소모전력을 이용하여 박출량을 추정하는 방법을 사용하는데 심장의 박동 조건에 따라 매 박동마다 큰 부하 변화를 유발할 수 있는데 비해 이러한 측정 방법은 시간이 오래 걸리기 때문에 심장부하의 안정된 상태를 유지하기 위해 신속한 측정이 가능한 관정 방법이 개발되어야 한다. 위와 같은 직접적으로 센서를 삽입하여 모니터링 하는 기술은 한계점이 있으며 특히 감염의 위험성을 높이는 경우가 발생한다.

본 연구에서는 심실보조장치의 이식부와 구동부를 연결하는 감염경로를 줄이기 위해 체외로 연결된 공압관의 압력을 측정하고 심실보조장치의 구동부와 이식부의 상태에 따라 변하는 공기의 유량을 측정하여 심실보조장치에 의한 혈액 박출량을 추정하려 한다. 또한 본 연구는 국내 (주)리브라하트에서 개발한 공압식 박동형 심실보조장치인 LibraHeart I 에 적용하여 혈액 박출량 추정과 안전성 향상을 위해 진행하였으며, 모의순환장치를 사용한 체외실험을 통해 공압관내에서 측정된 differential pressure 와 심실보조장치의 박출량간의 상관관계를 계산하여 정확성과 효과 입증의 연구를 진행하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 Differential pressure 측정을 위한 저항체 제작

공압식 박동형 심실보조장치는 체외 장치인 액츄에이터와 제어기, 공압관 그리고 이식부인 혈액펌프로 나뉜다. 혈액펌프의 공기의 양은 혈액펌프 내의

공기압과 이동한 공기의 양에 의해 결정되는 데 공기압에 영향을 미치는 가장 중요한 요인은 혈압이다. 체내 혈액펌프에 공기압을 측정하는 관을 삽입하기 어려우며 감염의 위험이 있으므로 가능한 체외의 액츄에이터에서 측정된 압력을 통해 체내 혈액펌프의 공기압을 추정한다. 혈액펌프의 최대 공기압은 혈압과 동일하며, 이송되는 공기는 압력에 따라 압축되므로 공기의 압력에 따른 부피의 감소비를 추정함으로써 심실보조장치의 박출량을 알 수 있다. 따라서 수식 (1)에 따른 공기의 유량을 계산하기 위해 공압관 내의 differential pressure 를 측정한다. Fig. 1 은 액츄에이터와 케플라를 통한 공기압 전달 구조를 나타낸 그림으로 실린더의 압력 P1, 이식부의 압력 P2, 저항체 R, 저항 Rm, 저항체 양단의 압력 Pm1, Pm2 이다. 공압관 사이에 저항체를 연결하였으며, Fig. 2 는 제작된 저항체로 내경 5mm, 길이 10mm 로 제작하였고, Fig. 3 은 공압관 사이에 저항체를 연결한 그림으로 저항체 양단에는 차동압력센서(MPX2053DP)를 연결하여 differential pressure 를 측정한다. 또한 식 (2)에 따라 differential pressure 와 pulse rate 을 곱하여 박출량을 계산한다.

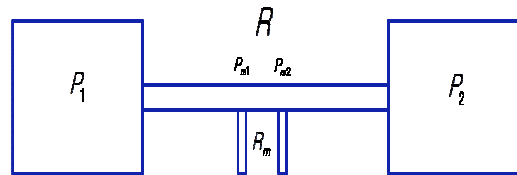


Fig. 1 Models of ventricular assist device

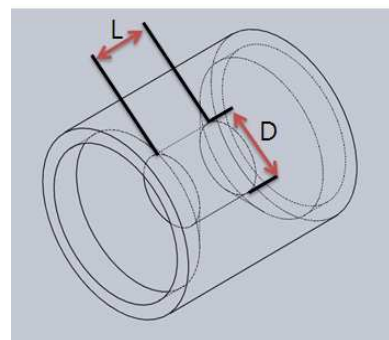


Fig. 2 Resistors

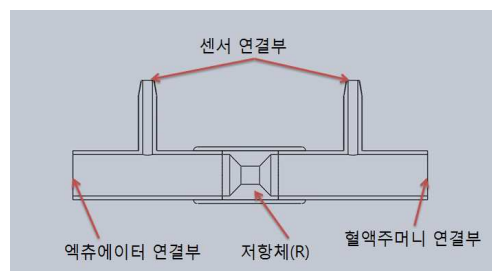


Fig. 3 Resistor connection

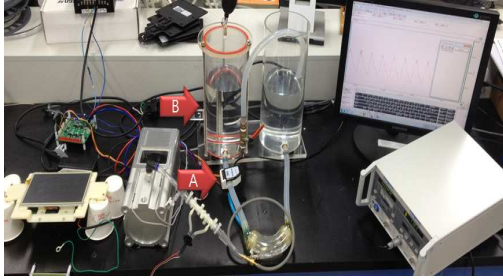


Fig. 4 In vitro experimental composition

2.2 체외실험을 통한 박출량 측정

㈜리브라하트(대한민국, 제주)의 공압식 박동형 심실보조장치인 LibraHeart I 을 사용하여 체외 실험을 수행하였으며 Pulse rate 을 50~80bpm 으로 조절하였다. 심박출량은 Ventricular Assist Device (VAD)의 outflow 부위(Fig. 4 의 A)에서 Flow meter(Transonic Systems, Inc.)을 이용하여 측정하였으며 압력계(Biopac Systems, Inc.)를 사용하여 모의순환장치의 대동맥에 해당하는 부위(Fig. 4 의 B)에서 후부하를 측정하였다. 동시에 제작된 저항체 양단에 연결된 차동압력센서로 differential pressure 를 측정하였으며, outflow 와 differential pressure 는 오실로스코프(Tektronix Inc.)를 사용하여 샘플링주파수 1kHz 로 데이터를 수집하였다.

$$P_{m1} - P_{m2} = Flow \times R_m \quad (1)$$

$$CardiacOutput = StrokeVolumex \times HeartRate \quad (2)$$

(Pm1-Pm2 : 저항체 양단의 압력차, Flow : 저항체를 지나는 공기의 유량, Rm : 저항체의 저항)

3. 실험 결과

저항체의 공기 저항을 전 후단의 케놀라에 비해 각각 20% 이내로 설계하였을 때, 충분한 압력이 혈액주머니에 전달되는 것을 확인하였다. Fig. 5 는 차동압력과 측정박출량, VAD rate 과 측정박출량간의 상관관계를 나타내는 그래프이며, Pearson correlation coefficient(r)을 계산한 결과 각각 r=-0.0299, r=0.775 로 측정박출량과의 상관관계가 차동압력보다 VAD rate 과 더 높아 보이지만 VAD rate 만으로는 혈액의 증감 정도를 정확하게 파악하는 것이 어려웠다. Fig. 6 은 추정박출량과 측정박출량간의 상관관계를 나타내는 그래프이다. r=0.623 으로 박출량추정값과 측정값의 상관관계가 비교적 낮았지만 혈액의 증감 정도를 확인할 수 있었으며, 추정값과 측정값의 t-value 는 2.518 로 t0.25 의 기준인 2.228 보다 높기 때문에 유의한 결과이다.

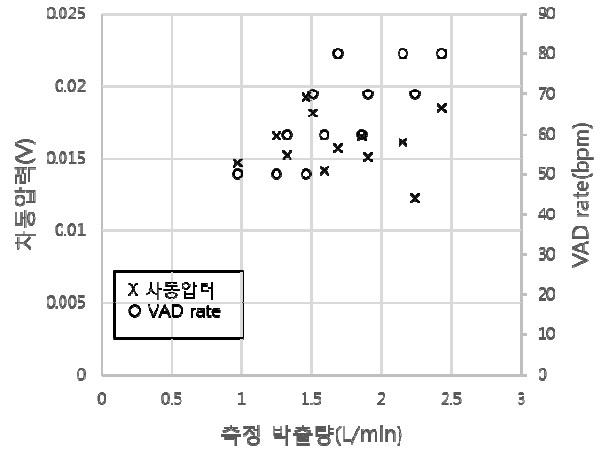


Fig. 5 differential pressure and measured outflow, VAD rate and measured outflow, the correlation graph

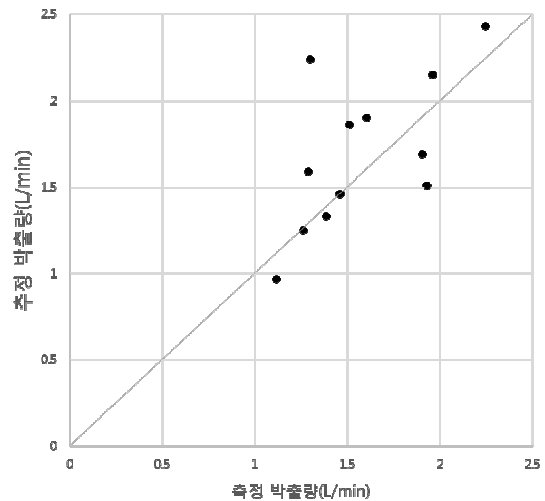


Fig. 6 The correlation graph of Estimated outflow and measured outflow

4. 토 의

공압식 심실보조장치를 사용함에 있어 혈전 생성 방지를 위해 심실보조장치의 박출량을 측정하고 제어하는 것은 중요하다. 기존의 박출량 측정법인 초음파 혈류 측정장치를 사용한 방법이나 열희석법은 감염경로를 늘리기 때문에 적합하지 않다. 본 연구에서 개발한 공압관 내 공기압에 따른 박출량 추정 방법은 체외의 공압관에서 공기압을 측정해 간접적으로 심실보조장치의 박출량을 추정하는 방법이므로 감염경로를 효과적으로 줄일 수 있어 보다 적합하다 할 수 있다. 그리고 본 연구에서 개발한 박출량 추정방법에 의한 추정값과 실제 측정값을 비교하였을 때 제시된 방법이 대략적으로 혈액의 증감 정도를 알 수 있으나 정확한 박출량을 측정하는 것과는 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 오류의 원인으로는 공

압관 사이에 연결된 저항체 양단에서 측정된 differential pressure 로 계산된 air flow 를 공기관 전체의 air flow 로 가정함에 따른 것으로 보이며 추후 저항체를 사용하지 않고 differential pressure sensor 의 증폭률을 높이고 공압관 내 공기 분자의 이동에 따른 별도의 계산식을 개발하여 적용한다면 좀 더 나은 결과를 얻을 수 있을 것으로 보인다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 인공심장의 공압관에서 differential pressure 측정을 통해 박출량을 예측 함으로써 기존의 박출량 측정방법을 개선 가능 하였으며, 박출량 추정을 통해 심실보조장치를 제어하여 혈전 생성을 방지할 수 있어 차후 심실보조장치의 안전성 및 성능개선에도 크게 기여할 수 있을 것이다.

## 후 기

이 논문은 2014 년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (C1010004-01-02)

## 참고문헌 (References)

- (1) Mathias C. Busch, MD, Michael Haap, MD, Arnt Kristen, MD, Christian S. Haas, MD, 2011, "Asymptomatic Sustained Ventricular Fibrillation in a Patient With Left Ventricular Assist Device," *Annals of Emergency Medicine*, Vol. 57, No. 1, pp. 25~28.
- (2) Eric A. Rose, MD, Annetine C. Gelijns, PhD, Alan J. Moskowitz, MD, Daniel F. Heitjan, PhD, Lynne W. Stevenson, MD, Walter Dembitsky, MD, James W. Long, MD, PhD, Deborah D. Ascheim, MD, Anita R. Tierney, MPH, Ronald G. Levitan, MSc, John T. Watson, PhD, and Paul Meier, PhD, 2001, "Long-Term Use of a Left Ventricular Assist Device for End-stage Heart Failure," *The New England Journal of Medicine*, Vol. 345, No. 20, pp. 1435~1443.
- (3) Kang, S. M. and Choi, S. W., 2011, "Blood Flow and Pressure Evaluation for a Pulsatile Conduit-Shaped Ventricular Assist Device with Structural Characteristic of Conduit Shape," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 35, No. 11, pp. 1191~1198.
- (4) Undar, A., Frazier, O.H. and Charles D. Fraser, Jr., 1999, "Define Pulsatile Perfusion: Quantification in Terms of Energy Equivalent Pressure," *Artificial Organs*, Vol. 23, No. 8, pp. 712~716.
- (5) William L Holman, MD, Jonathan L Skinner, MD, Ken B Waites, MD, Raymond L Benza, MD, David C McGiffin, MD, James K Kirklin, MD, 1999, "Infection During Circulatory Support with Ventricular Assist Devices," *The Society of Thoracic Surgeons*, Vol. 68, No. 2, pp. 711~716.
- (6) DMMyers, T.J., McGee, MG, Zeluff, B.J., Radovancevic, B. and Frazier, O. H., 1991, "Frequency and Significance of Infections in Patients Receiving Prolonged LVAD Support," *ASAIO J*, Vol. 37, pp. 283~285.
- (7) Daniel J. Goldstein, Nabeel G. El-Amir, Robert C. Ashton, JR, Kathaine Catanese, Eric A. Rose, Howard R. Levin, and Mehmet C. OZ, 1995, "Fungal Infection in Left Ventricular Assist Device Recipients: incidence, Prophylaxis, and Treatment," *ASAIO J*, Vol. 41, pp. 873~875.
- (8) Eckman, P. M. and John, R., 2012, "Bleeding and Thrombosis in Patients with Continuous-flow Ventricular Assist Devices," *American Heart Association*, Vol. 125, pp. 3038~3047.
- (9) John, R. and Lee, S., 2009, "The Biological Basis of Thrombosis and Bleeding in Patients with Ventricular Assist Device," *Journal of Cardiovascular Translational Research*, Vol. 2, pp. 63~70.