

체외생명구조장치에서 역박동 방법이 혈류역학 응답에 미치는 영향에 대한 수치적 연구

김인수[†], 임기무, 최성욱, 전형민, 심은보^{*}

Numerical Study of Effect of counter-pulsation on Hemodynamic Response in the ECLS

In Su Kim, Ki Moo Lim, Seoung Wook Choi, Hyung Min Jun, Eun Bo Shim

Key Words: Counterpulsation (역박동), copulsation (정박동), continuous flow (연속류), Extra-corporeal life support system; ECLS (체외생명구조장치), hemodynamic response (혈류역학적 응답), cardiovascular model (심혈관 모델), pulse pressure (맥동압), cardiac output (심박출량)

Abstract

Extra-corporeal Life Support System (ECLS) is the device used in emergency cases to substitute a extracorporeal circulation in open heart surgery, cardiac arrest or in acute cardiopulmonary failure. To obtain the effect of counter-pulsation on hemodynamic response in the ECLS quantitatively, we developed cardiovascular model which consists of 12 compartment model of heldt et al. and 3 compartment model of Schreiner et al. based on windkessel approximation. We compared coronary perfusion, arterial pulse pressure, cardiac output, and left ventricular pressure-volume diagram according to flow configuration such as counter-pulsation, copulsation, and continuous flow. When counter-pulsation was applied, 5% higher coronary perfusion, 26% lower pulse pressure, and 2% higher cardiac output than copulsation condition were calculated. We conclude that counter-pulsation configuration in the ECLS is hemodynamically more stable than copulsation and influences the positive effect to recover ventricles.

1. 서론

체외생명구조장치(ECLS: Extra-Corporeal Life Support System)는 심장수술, 심박정지 또는 심각한 응급상황에서 혈액순환을 대신하기 위해서 사용되는 장치이다. 이 장치는 심장과 동일한 방식

으로 산소와 혈액을 공급하는 체외순환 보조 목적으로 사용되고 있으며 사용영역이 점차 확대되고 있다.

본 논문에서는 지금까지 주로 사용되어진 연속형 생명구조장치와 박동형 생명구조장치를 사용하는 경우 관상동맥의 혈류량과 대동맥의 압력을 비교함으로써 박동형 생명구조장치의 효율성을 분석하고자 한다. 또한 박동형 생명구조장치에서 역박동을 사용하는 경우와 정박동을 사용하는 경우를 비교함으로써 자연심장과 생명구조장치의 위상 차이에 따른 생명구조장치의 효율성에 대해서 분석하고자 한다.

† 강원대학교 기계메카트로닉스공학과 대학원

E-mail : insummm@kangwon.ac.kr

TEL : (033)250-6595 FAX : (033)257-6595

* 강원대학교 기계메카트로닉스공학과

2. 수치 해석적 방법

체의생명구조장치의 사용에 따른 혈류역학적 응답에 대한 연구는 동물실험이나 임상실험이 힘들기 때문에 수치해석적인 접근이 필요하다.

2.1 심혈관 시스템 모델

시뮬레이션을 하기 위해 자연심장을 포함한 전체의 체/폐순환 circuit이 필요하다. 심장을 포함한 체/폐순환은 Heldt[1]의 lumped model을 사용하였다. Heldt 모델은 4개 영역으로 표현되며 12개의 요소로 구성된다. 각각은 선형적, 비선형적 그리고 시간에 종속적인 저항(resistance), 캐패시턴스(capacitance)로 식(1)과 같이 표현된다.

$$\frac{d}{dt}P_n = \frac{P_{n-1} - P_n}{C_n R_n} - \frac{P_n - P_{n+1}}{C_n R_{n+1}} + \frac{d}{dt}P_e \quad (1)$$

여기서, P는 혈관내 압력, C는 혈관의 컴플라이언스, R은 혈관을 통한 유동저항을 나타낸다. 아래첨자 n은 각 요소를 나타내며, e는 혈관외부를 말한다.

2.2 관상동맥 모델

생명구조장치의 사용에 따른 관상동맥의 혈류량변화를 분석하기 위해서 Schreiner에 의해 발표된 관상동맥 순환 모델을 심혈관 시스템 모델과 병렬로 연결하였다 [2].

Scheriner 모델은 3개의 요소로 구성되어 있으며, Left common coronary artery에서 부처 말초 모세혈관 까지 Lumped parameter 모델로 표현하고 있다. Scheriner 모델은 우관상동맥을 모델링하지 않았기 때문에 심혈관 시스템 모델과의 결합에서는 2배의 혈류량으로 통합을 하였다.

2.3 체외생명구조장치(ECLS) 모델

본 연구에서 모사한 박동형 ECLS 시스템은 구동기가 좌우로 움직이면서 각각의 혈액량을 순차적으로 압박하게 되며 이때 대동맥 cannula쪽에 위치한 혈액주머니를 압박해서 혈액을 분출하는 형태이다. 따라서, 실제 박동형 ECLS 시스템의 임상실험시의 유량 파형을 모델의 입력으로 주었다. 연속형 ECLS 시스템은 일정한 유량을 박출하는 시스템으로 가정하여 박동형 ECLS 시스템의 평균 유량을 입력으로 주었다.

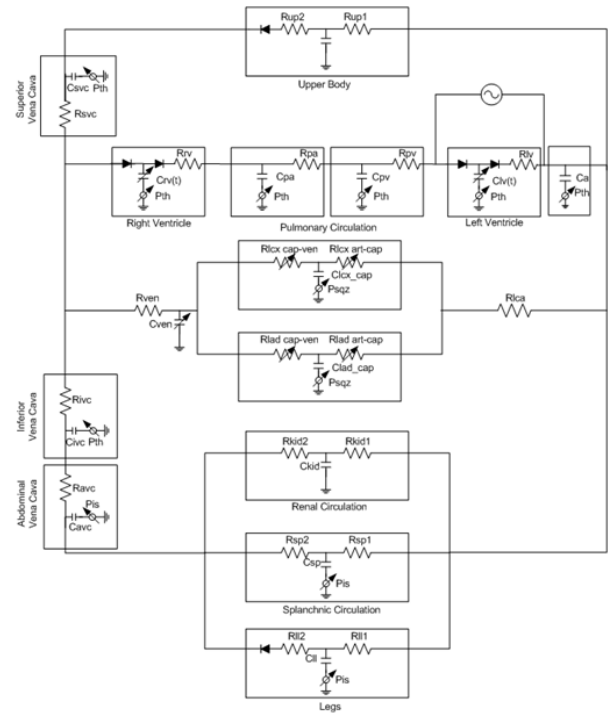


Fig. 1 Circuit diagram used for the hemodynamics of the cardiovascular system: the left ventricle (lv), aorta (a), right ventricle (rv), pulmonary artery (pa), pulmonary vein (pv), the superior vena cava inside the thoracic cavity (svc), the inferior vena cava inside the thoracic cavity (ivc), the vena cava outside the thoracic cavity or the abdominal vena cava (avc), the upper body (up), kidney (kid), splanchnic organs (sp), lower limb (ll), left circumflex artery (lcx), left anterior descending artery (lad), coronary venous bed (cven).

2.4 자율신경계 모델

자율신경계 모델은 Heldt 모델을 기반으로 모델링 되었다. Fig.2은 신경계 모델에 대한 개략도이다. 본 연구에서는 심혈관 시스템 모델의 단기간 조절을 위하여 Heldt 모델의 Arterial baroreflex system 모델과 Cardiopulmonary reflex system 모델을 통합하였다. 경동맥에 있는 receptor와 중심정맥에 있는 receptor는 자율조절신경계(ANS)에 압력의 변화를 전달한다.

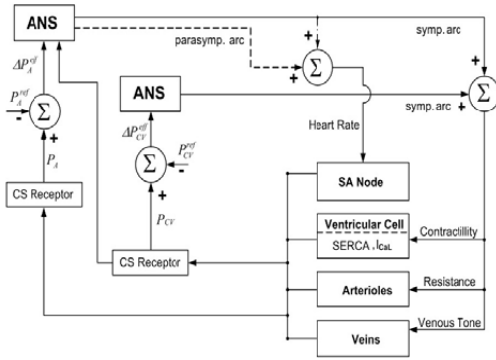
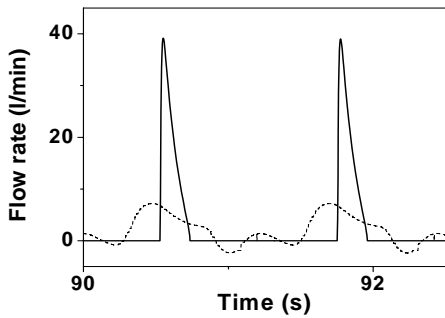


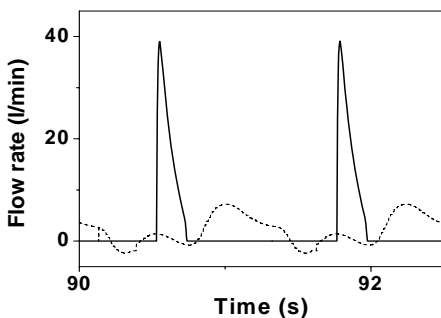
Fig. 2 Diagrammatic representation of the baroreflex model. CV: central vein, CP: cardio pulmonary, SA node: sinoatrial node.

3. 시뮬레이션 결과

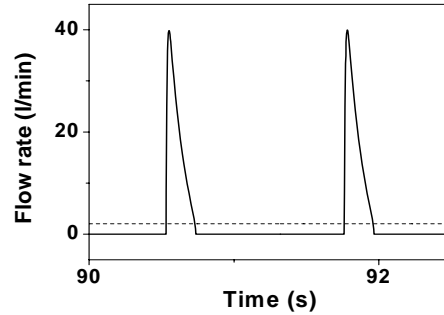
ELCS의 임상실험에서 flow waveform을 시뮬레이션의 입력으로 두고 역박동과 정박동의 위상을 132도 delayed phase와 24도 forward phase로 정하여 시뮬레이션을 수행했다. 둘의 위상 차이는 156도의 phase difference로 되었다. 연속류를 모사하기 위해 T-PLS의 평균 유량의 값의 constant flow rate로 주었으며, 그 파형을 Fig. 3에 나타내었다.



(a)



(b)

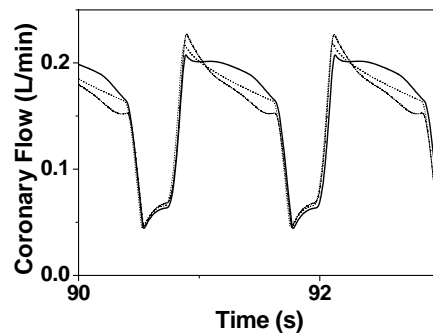


(c)

Fig. 3 Flow waveforms of left ventricle and blood pumps. Copulsation (a), counter-pulsation (b), continuous flow (c). straight line: left ventricular flow rate, dashed line: flow rate of blood pumps.

3.1 Coronary Artery Flow rate

순간적인 최대 혈류량은 정박동에서 227ml/min으로 가장 높았고, 연속류 일 때 217ml/min, 역박동일 때 207 ml/min으로 가장 낮았지만 [Fig. 4(a)], 평균 유량을 볼 때 역박동일 때 coronary flow rate가 153ml/min으로 가장 높았고, 정박동일 때 146ml/min으로 가장 낮았다. 연속류 일 때 150ml/min 이었다 [Fig. 4(b)].



(a)

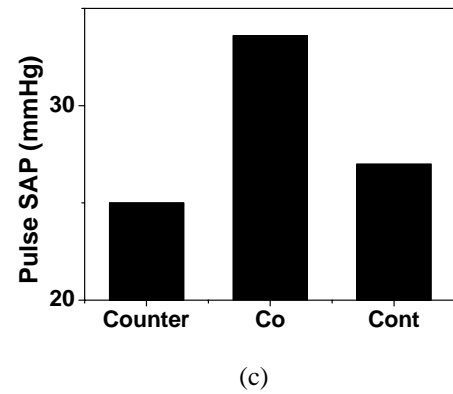
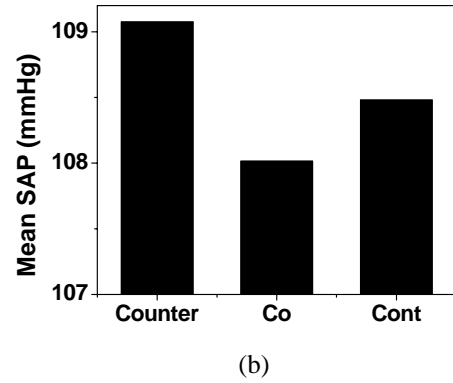
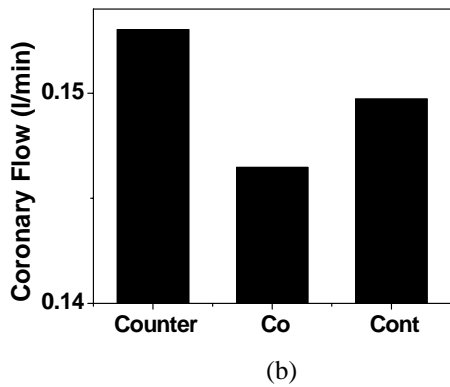


Fig. 4 Time variation (a) and average value (b) of coronary blood flow rates according to flow configurations; straight line, counter-pulsation; dashed line, copulsation; dotted line, continuous flow; Counter, counter-pulsation; Co, copulsation; Cont, continuous flow.

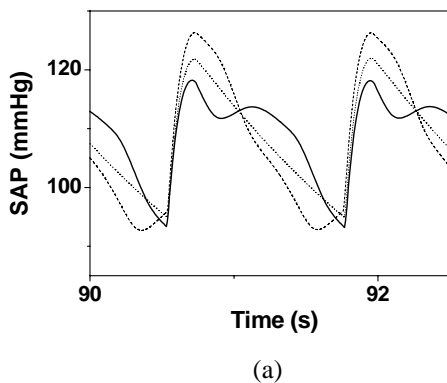
3.2 Systemic Artery Pressure

대동맥에서의 순간적인 최대압력은 정박동일 때 126mmHg로써 가장 높았고, 연속류에서 121mmHg, 역박동에서 118mmHg로써 가장 낮았다.[Fig. 5(a)]

평균 압력은 역박동에서 109mmHg 로써 가장 높았고, 연속류에서 108mmHg, 정박동에서 108mmHg로써 거의 차이가 나지 않았다 [Fig. 5(b)].

맥동압은 역박동일 때, 25mmHg로써 가장 낮고, 연속류일 때 27mmHg, 정박동일 때 34mmHg로써 가장 높았다.[Fig. 5(c)].

Fig. 5 Time variation (a), mean value (b), and pulse pressure (c) of SAP according flow configuration; straight line: counter-pulsation, dashed line: copulsation, dotted line: continuous flow; Counter: counter-pulsation, Co: copulsation, Cont: continuous flow.



3.3 좌심실의 Pressure-Volume Diagram

Volume difference 는 역박동일 때 68ml로써 가장 높았고, 연속류일 때 64ml, 정박동일 때 63ml로써 가장 낮았다. Pressure difference 는 역박동일 때 97mmHg 로써 가장 낮았고, 연속류일 때 99mmHg, 정박동일 때 103mmHg로써 가장 높았다.

참고문헌

- (1) Heldt, T., Shim, E. B., Kamm, R. D., & Mark, R. G., 2002, "Computational modeling of cardiovascular response to orthostatic stress" *Journal of Applied Physiology*, 92, 1239-1254.
- (2) Schreiner, W., Neumann, F., Mohl, W., 1990, "The role of intramyocardial pressure during coronary sinus interventions: A computer model study", *Ieee transactions on biomedical engineering*, 956-967

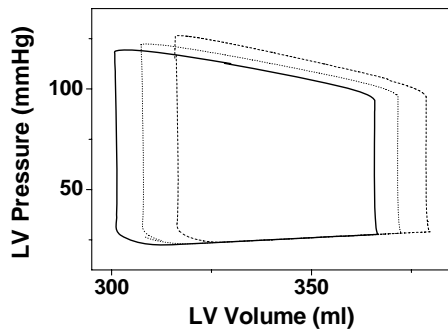


Fig. 6 Left ventricular pressure and volume diagram according to flow configuration; straight line, counter-pulsation, dashed line, copulsation; dotted line, continuous flow.

4. 결 론

본 연구에서는 박동형 생명구조장치의 효율성을 분석하기위해서 역박동, 정박동, 연속형 펌프를 수치적으로 모델링 하였고, 이 모델을 통해서 관상동맥의 혈류량과 대동맥의 압력, 좌심실의 PV 선도 등을 비교 하였다.

특히 역박동을 사용하는 경우 정박동을 사용하는 경우와 연속형 펌프를 사용하는 경우에 비해서 관상동맥의 평균 혈류량 증가와 대동맥 맥동압의 감소를 확인 하였다. 관상동맥의 혈류량 증가는 심장조직의 산소와 에너지 공급을 증가시키고, 대동맥의 Pulse Pressure의 감소는 심장의 후부하를 감소시켜 준다.

이번 연구를 통해서 체외생명구조장치의 일종인 역박동형 생명구조장치가 환자의 생명유지와 심장조직의 기능 개선 가능성을 높여주는 효과가 있음을 확인하였다.