

## 인공심폐기 작동시 관상순환계의 혈류역학에 대한 시스템 모델링

심 은보\* · 고 형종\* · 민 병구\*\*

### System modeling of the hemodynamics of coronary circulation during the operation of the T-PLS

Eun Bo Shim\*, Hyung Jong Ko\* and Byung Goo Min\*\*

**Key words :** T-PLS(이중 박동 생명 보조 장치), Coronary circulation(관상순환계), System modeling(시스템 모델링)

#### Abstract

Computational modeling is presented to investigate the hemodynamics of coronary circulation for the cardiac arrest model during the operation of an ECLS called T-PLS. A lumped parameter model is utilized to delineate the hemodynamics of coronary circulation. For verification of the present method, we compute the coronary circulation for normal case and compare those results with the existing data. Numerical results on the cardiac arrest model show that T-PLS can increase LAD flow significantly.

#### 1. 서론

체의 생명 보조 장치(ECLS, extracorporeal life supporting system)는 말기 심부전증 또는 호흡부전 환자들을 대상으로 수술장 내외에서 막형 산화기를 사용하여 시행하는 체외 순환 보조장치로 정의될 수 있다. ECLS는 1972년에 처음으로 호흡부전 환자에 사용되기 시작하여 현재는 신생아의 심폐보조에 이르기까지 폭 넓게 사용되고 있다. 기존의 ECLS의 단점을 보완하고 일정기간 생명유지에 필수적인 심장과 폐기능을 유지하여 병원이나 밖에서 생명구조 및 연장을 가능케 하고자 한국형 인공심장[1]의 원리를 이용하여 만들어진 것이 바로 이중 박동 생명보조장치(T-PLS, twin pulse life supporting system)이다.

본 연구에서는 이러한 T-PLS가 작동할 경우 관상동맥 순환계에 미치는 영향을 조사하기 위하여 수치적 모델을 사용하였다. 관상순환계는 심장에 혈액을 공급하는 혈관계로서 환자의 회복여부에 대한 주요한 근거가 된다. 이를 위하여 관상순환계에 대하여 Lumped model을 사용한 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 만들었으며, 기존의 연구결과와 비교하여 그 타당성을 검토한다. 그리고 심부전 모델에 대하여 T-PLS 사용의 효과 및 그 혈류역학적 특성을 검토한다.

#### 2. 수치적 모델

##### T-PLS의 작동원리

혈액 펌프의 중앙에 위치한 actuator가 산화기가 연결된 오른쪽으로 이동하면서 혈액주머니에 압력을 가하고 이에 의하여 혈액은 산화기 입구 방향으로 혈액을 밀어낸다(Fig. 1).

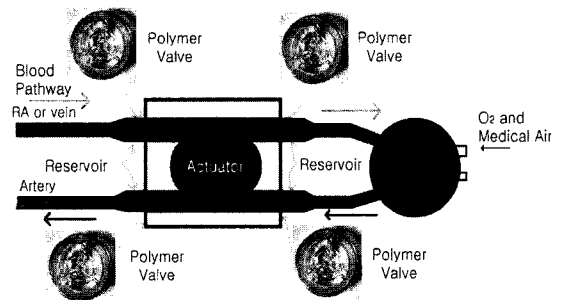


Fig. 1 Schematic of the T-PLS

이때 동시에 반대쪽의 산화기 출구 방향에 연결된 혈액주머니는 실리콘 튜브의 탄성으로 인하여 원래의 모양으로 복원되면서 유동을 흡입하게 된다. 그리고 입구와 출구에는 역류를 방지하기 위하여 각각 폴리머 밸브가 부착되어 있다.

##### 관상순환계 시스템 모델

본 연구에서는 T-PLS 작동시의 효과를 조사하기 위하여 전체 심혈관계 모델링에 관상순환계 및 T-PLS의 요소를 첨가한다(Fig. 2). 이때 전체 심혈관계는 좌, 우 심장 및 폐순환계 그리고, 말초순환계로 구성되는데, 이에 대하여 Lumped parameter 방법을 적용한다. 먼저 Fig. 2에서 보듯이 인체의 각 부분의 혈류역학적 특성을 전기회로적인 요소들로서 표현한다. 그리고 여기에 Kirchhoff의 법칙을 적용하여 각 요소에서의 압력 및 유량에 대한 상미분 방정식을 유도하는데, 이를 Runge-Kutta 방법으로 풀면 각 시간에서의 값들을 구할 수 있다. 이 모델에 대한 좀 더 자세한 내용은 참고문헌[2]에 잘 기술되어 있다.

\* 금오공과대학교 기계공학부, simeb@kumoh.ac.kr

\*\* 서울대 의대, bgmin@plaza.snu.ac.kr

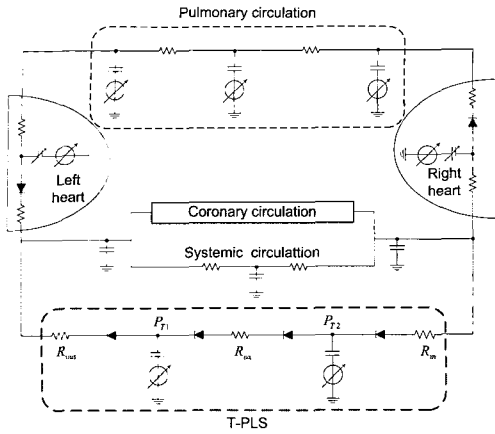


Fig. 2 Schematic of the lumped model of cardiovascular system.

이때 관상순환계에 대한 모델은 Fig. 3에 나타나 있는데, micro-circulation은 LAD(left anterior descending)와 LCX(left circumflex)의 두 병렬 패스로 구성된다[3].

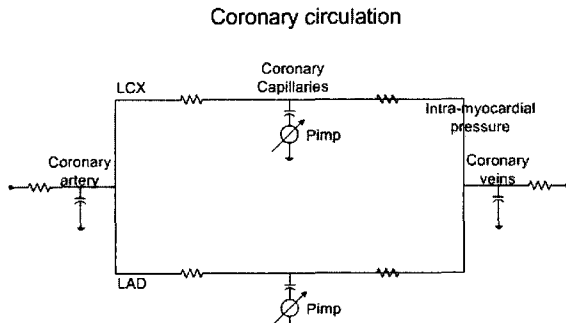


Fig. 3. Schematic of the lumped model of coronary circulation.

### 3. 계산결과 및 검토

#### 수치해석 방법의 검증

본 연구에서는 우선 정상적인 인체의 관상순환계에서의 혈류역학적 상태를 분석하고 이를 기존의 연구와 비교 검토하였다. Fig. 4(a)는 capillary와 vein에서의 체적을 나타낸 것이며, Fig. 4(b)는 capillary와 vein으로의 유량을 한 심장 주기에 대하여 표시하였다. 심장근육에 직접적으로 혈액을 공급하는 capillary로의 유량은 주로 심장의 이완기(diastole stage)에 크며, 수축기(systole stage)에는 심장의 수축으로 인한 저항의 증가로 유량이 매우 작다. 이러한 본 연구의 결과는 정량적 및 정성적으로 Shreiner등[4]의 결과와 잘 일치하고 있다.

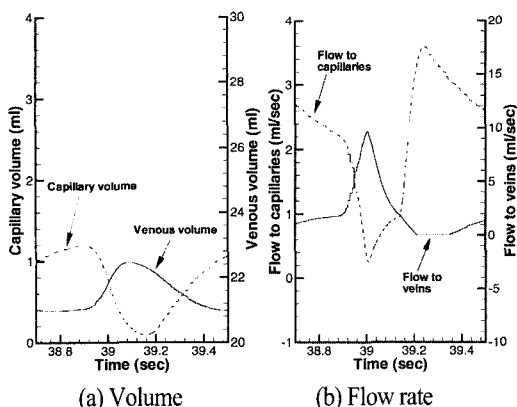


Fig. 4. Computed results for normal coronary circulation

#### T-PLS작동시의 관상순환계 혈류해석

여기에서는 심부전 모델에 대하여 T-PLS가 작동할 경우와 그렇지 않을 경우에 대하여 계산을 수행하였다. 여기에서 심부전 모델은 관상동맥을 결찰한 경우를 상정하였다. Fig. 5는 심부전 모델에 대한 혈류의 시간적 변화를 표시한 것이다. Assist device가 없는 심부전 모델의 경우 LAD에서의 유량이 매우 저하됨을 알 수 있다. 보통 만성적 심부전 환자의 경우, collateral circulation에 의하여 유량이 상당부분 회복되지만 본 연구와 같은 관상동맥 결찰 모델에서는 이와 같은 효과를 무시할 수 있다. 반면 T-PLS가 작동 중인 경우, 유량이 대폭적으로 증가함을 알 수 있다(Fig. 5(b)).

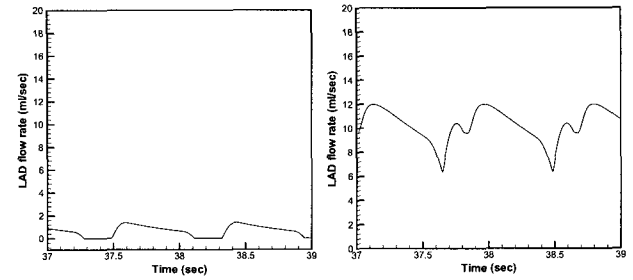


Fig. 5 Computed LAD flow rate for cardiac arrest model.

### 4. 결론

본 연구에서는 한국형 인공심폐기의 작동시 관상순환계의 혈류역학적 변화를 조사하기 위한 수치적 모델을 개발하였다. 사용한 방법은 lumped parameter model로서 전체 심혈관계에 T-PLS 및 관상순환계 요소를 첨가하였다. 수치해석 방법의 타당성을 검증하기 위하여 정상적 인체에서의 결과를 기존의 연구와 비교 검토하여 그 타당성을 검증하였다. T-PLS작동시의 관상순환계의 혈류역학적 변화를 평가하기 위하여 심부전 모델을 택하여 계산을 수행하였다.

#### 참고문헌

- [1] Min, B.G., Kim, H.C., Choi, J.W., Ryu, G.H., Seo, K.P., Rho, J.R., Ahn H., Kim, S.W., Diegel, P.D., and Olsen, D., "A Moving-Actuator Type Electromechanical Total Artificial Heart-Part A: Linear Type and Mock Circulation Experiments", IEEE Transactions On Biomedical Engineering, Vol. 37, No. 12 december 1990.
- [2] T. Heldt, E.B. Shim, R.D. Kamm, R.G. Mark, Computational modeling of cardiovascular response to orthostatic stress. J Appl Physiol. 2002 Mar; 92(3):1239-54.
- [3] Guiot C, Merletti A, Pagliaro P, Losano G, 2000, "Model-based assessment of pressure and flow-dependent coronary responses following abrupt pressure drops.," Comput Biol Med, Vol. 30(3), pp. 111-26.
- [4] Schreiner, W., Neumann, F., and Mohl, W., 1990, "Simulation of coronary circulation with special regard to the venous bed and coronary sinus occlusion," J. Biomed. Eng., Vol. 12, 429-443.