좌주간부 관상동맥(LCCA)에 관한 혈류역학적 분석 (II)

문수연† ·장주희*·박정수*·신세현**

Hemodynamic Analysis of Pig's Left Common Coronary Artery (LCCA) (II)

Su-Yeon Moon, Ju-Hee Jang, Jung-Su Park and Seh-Yun Shin

Key Words: Heart(심장), Connectivity Matrix(연결 행열), Hedodynamic Matrix(혈류학적 행열) Left Common Coronary Artery(좌주간부 관상동맥)

Abstract

The distributions of blood pressure, blood flow, and blow volume in the left common artery (LCCA) were determined using the lumping parameter method. In order to develop a mathematical model for microcirculation in LCCA, the present study adopted preexisted set of measured morphological data on anatomy, mechanical properties of the coronary vessels, viscosity of blood, the basic laws of physics, and the appropriate boundary condition. Pressures and volumes of blood and flow resistance were expressed in terms of electrical voltages, current, and resistances, respectively, in the electrical analog model. The results of two mathematical models, symmetrical and asymmetrical models, were compared with other investigator's data. The present results were in good agreement with previous studies. It was found that the mean pressure profiles were similar in both models.

기호설명

D : 지름
L : 길이
n : 관상혈관의 도수(order number)
N : 관상혈관의 도수에 따른 해당 개수
P : 압력
Q : 유량
μ: 혈액의 점성계수
R : 유동저항
G : 층류유동에서의 유동전도성

† 회원, 경북대학교 기계공학과
E-mail : symoon@knu.ac.kr
TEL : (053)954-5035 FAX : (053)956-7907
* 경북대학교 대학원 기계공학과
** 회원, 경북대학교 기계공학과

1. 서 론

전기회로 해석에 기반을 둔 lumped parameter 모델은 순환 시스템의 전체적인 거동에 관한 정보를 얻는 값싼 방법을 제공해준다. 이 모델에서는 전압 차와 전류를 각각 압력차과 유량으로 나타낸다. 각 혈관(또는 여러 혈관들)은 저항, 캐패시터 그리고 인덕터의 적절한 조합을 통해 표현된다. 전기적 저항을 통해 점성 소산(dissipation)을 모델링화 할 수 있고 캐패시터(capacitor)를 통해 혈관의 컴플라이언스(compliance)를 계산 할 수 있으며, 인덕터(inductor)는 관성항을 모델링하여 사용 한다[1, 2]. 그러므로 모든 혈관 영역은 전기회로로 연결되어 나타나게 된다.

본 연구에서는 지배 방정식인 Hagen-Poiseuille식에서 압력을 전압으로, 부피를 전류로, 혈관내의 유동 저항을 전기저항으로, 동사(analogy) 시킨 후 전기 회로를 써서 기능적 자료

를 계산 했다. 전기회로도는 컴퓨터 모사 프로그램인 SPICE를(Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) [3] 이용하여 혈관의 동맥 선도를 그렸다. 이 방법은 다른 방법에 비해 관상 동맥의 전체 회로도를 볼 수 있다는 점과 각 회로의 자료계산을 값싸게 얻을 수 있다는 점 외에도 프로그램이 가진 다양한 기능인 과도특성 해석 및 주파수 응답해석 등에 대한 여러 가지 물리적인 해석을 할 수 있다는데 장점이 있다.

Lumping 매개 변수 방법은 단지 평균적인 자료를 제공함과 동시에 변수에 대한 동사(analogy)에 주의를 요한다. 이에 비해 일차원 모델의 수치계산은 Lumping방법에 비해 정확 하다는 장점이 있다. 그러므로 이 논문에서는 Kassab [4, 5]의 일차원 수학적 모델과 비교 검증을 통해 정확도를 검증함으로써 관상 동맥의 압력, 혈류의 양, 및 확산 현상을 분석함에 있어서 효과적이고도 정확한 방법을 제시 하고자한다.

.

2. 수학적 모델화

기존의 연구에서 사용되었던 Poiseuille식[6]을 이용하여 본 연구에서는 동맥에서의 혈관분포를 전기회로로 나타내었으며 혈관의 분포는 대칭모델과 비대칭모델을 사용하였다. 이 전기 회로를 해석하는데 전자회로 상용 해석 프로그램인 PSPICE를 이용하였다.

먼저, Poiseuille's 식.에서

$$Q = \frac{\pi D^4}{128 \mu l} \Delta P \tag{1}$$

이 식을 각각 혈관의 도수(order)에 대한 요소(element)로 나타내면 Poiseuille식은 아래와 같이 정리된다.

$$\Delta P_n = \frac{128 \mu_n l_n}{\pi D_n} q_n \tag{2}$$

이 때 ΔP_n는 혈관의 도수의 입구 압력과 출구 압력의 차와 같고, n은 임의의 혈관 도수이다. 식 (2)를 다시 정리하면 아래와 같다.

$$\Delta P_n = R_n q_n \tag{3}$$

여기서 R은 식 (4)와 같다.

$$R_n = \frac{128 \mu_n l_n}{\pi D_n} \tag{4}$$

ΔP는 양단간의 차를 나타내는 값이므로 이를 전기회로 변수로 나타낸다면 전압(V)로 나타낼 수 있다. 또 Q는 양단을 통과하는 일정한 값이므로 전기회로 변수로 나타내면 전류(I)로 나타낼 수 있다. 식 (3)을 전기회로 변수로 나타내면 아래와 같이 정리된다.

$$V_n = R_n I_n \tag{5}$$

식 (5) 를 이용하여 PSPICE로 전체회로를 그리고 압력 차를 전압 source의 값으로 넣으면 각 혈관 도수에서의 압력과 유량을 간단하게 얻을 수 있게 된다.

3. 결과 및 토의

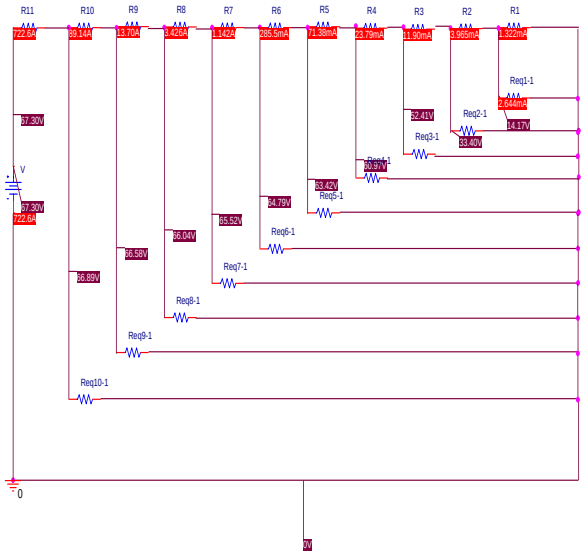

Fig. 1 Electric analog circuits for a symmetric model

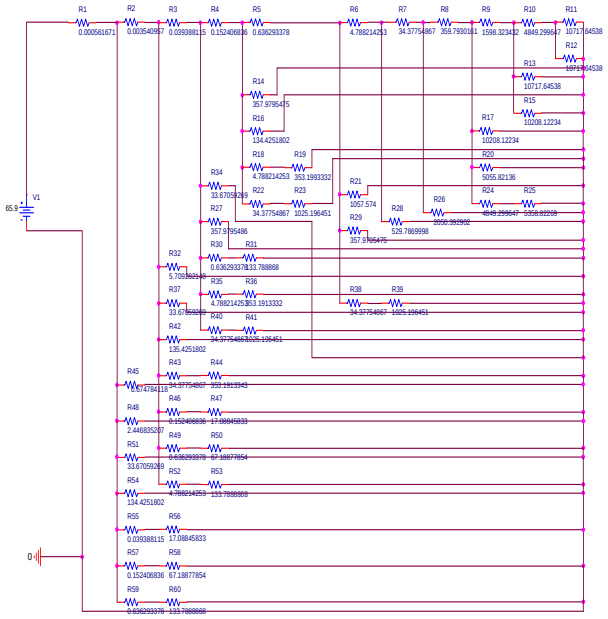

Fig. 2 Electric analog circuits for an asymmetric model

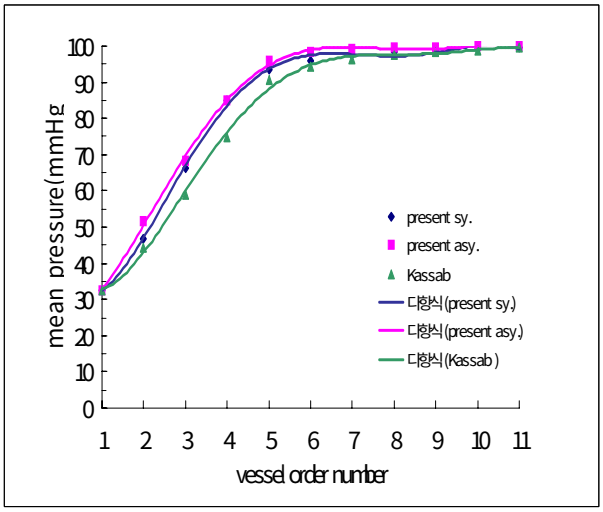

Fig. 3 Pressure distributions with a variance in a vessel order number

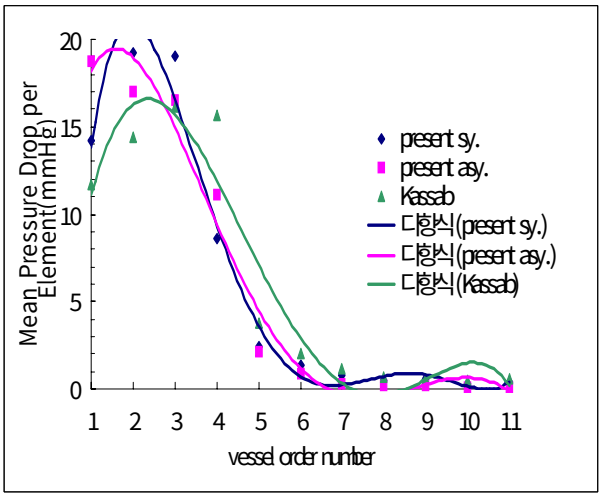

Fig. 4 Pressure drop distributions with a variance in a vessel order number

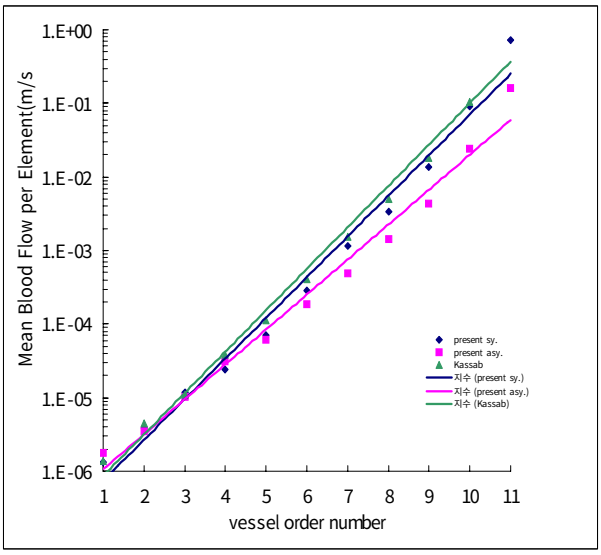

Fig.5 Blood flow distribution with a variance in a vessel order number

Figs 1과 2는 대칭 및 비대칭 모델의 전기회로를 이용하여 각 회로 당 전압과 전류를 구하였다. 전압과 전류는 각각 혈관에서의 압력과 혈류의 부피를 나타내는 것이다. 다음에서 구한 전압의 단위를 voltage를 압력 단위인 mmHg로 생각하여 전류의 값에다 0.001을 곱하면 혈류의 부피속도 단위인 ml/sec 나오도록 하였다. 개략도에서 알 수 있듯이 혈관의 순환을 전기적 회로

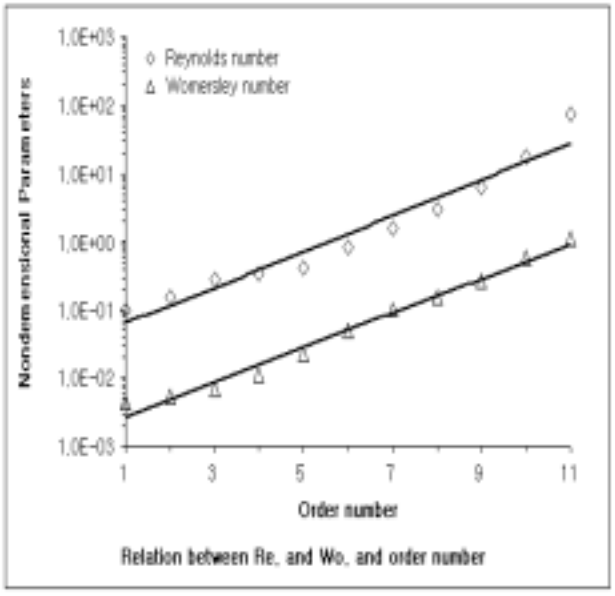

Fig. 6 Reynolds and Womersley's numbers with a variance in a vessel order number

를 사용해서 쉽게 정량적 압력 및 유량 값을 구할 수 있을 뿐만 아니라 혈관의 흐름을 알 수 있다. 단 지 유의할 사항은 개략도가 한 가지에 대해서만 부분적으로 그려졌다는 것이다. Figs 3, 4 및 5는 좌주간부 관상동맥(left common coronary artery, LCCA)의 대칭 및 비대칭 모델로부터 얻은 도수에 따른 요소 출구에서의 평균 압력, 압력 강하 및 부피속도를 각 각 나타낸다. 본 연구의 결과와 Kassab 등[5]이 비대칭 모델을 사용하여 구한 결과와 비교하여 볼 때 첫 번째 네 개의 도수(order)(1-4)를 제외하고는 거의 비슷한 분포를 보여 준다. 이것은 압력 분포에 있어서 계도 위상(tree topology)이 혈관의 기하학적 모양만큼은 중요하지 않다는 것을 의미한다. Fig 5에서는 비대칭 모델이 대칭 모델 보다 다소 많은 혈류를 운반하고 있음을 알 수 있다. Fig 6은 관상혈관의 도수에 따른 각각의 무 차원 수인 레이놀즈수(Reynolds number)와 워머슬리수(Womersley number)를 세미로그 스케일로 나타낸 것으로 도수가 7 이하에서는 세미 레이놀즈 수가 1보다 작다는 것을 알 수 있다. 이 결과를 통해 해석 모델의 혈류 역학적 분석 결과에 대한 지배방정식인 Poiseuille식의 타당성을 다시 검토해야 한다. Poiseuille식은 무한한 길이의 원형 관내에서 작동유체는 Newtonian 유체이며 흐름은 시간에 의존적이지 않은 정상유동을 가정했을 때 적용 가능하다. 하지만 유한한 길이의 원형 관에서는 레이놀드 수와 워머슬리 수가 1보다 훨씬 적을 때만 Poiseuille식이 유효하다. 그러므로 도수가 5이상인 경우는 Poiseuille식을 보정함으로써 가정에서 오는 오차를 줄여야 한다.

4. 결 론

본 연구는 lumping 매개변수 방법을 통하여 관상혈관 순환계의 수학적 모델링과 형태계측 데이터로부터 혈류 역학적 특성을 고려해 보았다. 기존의 연구와 비교해 볼 때 비교적 잘 일치함으로서 lumping 매개 변수 방법이 계산상에서 값싼 방법일 뿐 아니라 정확성도 있음을 보여주었다.

실제의 관상 순환계는 비정상 상태이며, 레이놀드 수가 1보다 큰 도수에 대해서는 속도에 대한 항을 고려한 지배방정식을 사용해서 고려해야 한다. 그러므로 앞으로의 연구에서는 현재의 연구 보다 좀 더 근접한 관상심혈관계의 혈류 역학적 특성과 현 연구에서 고려되지 않은 혈류의 유변학적 파라미터들도 고려할 것이다. 그와 함께 프로그램이 가진 다양한 기능인 과도특성 해석 및 주파수 응답해석 등에 대한 여러 가지 물리적인 해석을 통해 혈류역학의 특성을 면밀히 검토 할 것이다.

참고문헌

(1) Doedelin, E., 1972, "System Dynamics Modeling and Response", Bell&Howell Company, Columbus, Ohio.

(2) Dorny, C., 1993, "Understanding Dynamic Systems", Prentice-Hall, New Jersey.

(3) Dorf, R.C.,Svoboba, J. A. Introdution to Electric circuits(4th). Wilely

(4) Kassab, G.S., C.A. Rider, N.J. Tang and Y.C. Fung. 1993, “Morphometry of pig coronary arterial trees” Am. J. Physiol. 265 (Heart Circ. Physiol. 34): H350-H365.

(5) Kassab, G.S., J. Berkley and Y.C. Fung, 1997, “Analysis of pig's coronary arterial blood

flow with detailed anatomical data," Ann. Biomed. Eng. 25: 204-217.

(6) Fung, Y. C., 1984, Biodynamics: Circulation. New York: Springer-Verlag, pp. 83-84.