

(I)

† . * . ** . **

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

Jungsu Park, Juhee Chang, Suyeon Moon and Sehyun Shin

Key Words : Heart(심장), Coronary artery(관상동맥), Hemodynamics(혈류역학), Microcirculation(미세순환), LCCA(좌주간부 관상동맥), Order number(도수), Segments(분절), Elements(요소), Compliance(탄력성)

Abstract

The present study investigated the microcirculation of blood in the left common artery (LCCA). 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 conditions. In this study, the statistical distribution of blood pressure, blood flow, and blood volume in the LCCA were determined based on the anatomical branching pattern of the coronary arterial tree and the statistical data of blood vessel dimensions. Our calculations were in good agreement with the previous studies. The present results showed that the mean longitudinal pressure drop profile was function of the vessel order numbers. It was found that the normalized pressure drop was a logarithmic function of the compliance.

ω : 맥동류의 라디안 주파수(radian frequency)

1.

D : 지름
L : 길이
n : 관상혈관의 도수(order number)
N : 관상혈관의 개수
P : 압력
P' : 탄력성을 고려한 압력
 \dot{Q} : 유량
 μ : 점성계수
R : 유동 저항(resistance)
G : 유동 전도성(conductance)
 α : 탄력성 상수(compliance constant)

† 경북대학교 대학원 기계공학과
E-mail : pjsue@dreamwiz.com
TEL : (053)954-5035 FAX : (053)956-7907

* 경북대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 경북대학교 기계공학과

1.1

최근 미국 질병통제예방센터(Centers for Disease Control and Prevention, CDC)가 발표한 보고서에 따르면 좋은 치료법이 개발되고 예방 활동이 활발히 펼쳐졌음에도 불구하고 심장병이 미국인들의 사망 원인 제 1 위인 것으로 밝혀진 바 있다.⁽¹⁾

심혈관계 질환(Cardiovascular Diseases, CVD) 중 관상동맥질환(Coronary Heart Disease, CHD)으로 인해 사망한 비율이 54%로 가장 높고,⁽²⁾ 특히 65 세 이상 노인의 심장병 사망 위험이 높으며, 65~74 세의 노인 중 관상동맥성 심장질환으로 숨진 사람은 55~64 세의 노인 중 같은 병으로 숨진 사람에 비해 21 배나 높았다. 지금까지는 이러한 질환에 대한 현상학적인 치료와 단기 대처만이 이루어져 왔다.

1.2

혈액과 산소의 공급은 인체에 매우 중요하므로 발생학(embryology)적으로도 심장은 가장 중요한 기관이다. 심장(heart)은 혈액을 신체 각 부위에 전달하는 펌프(pump)의 기능을 한다. 이러한 심장도 스스로 펌프 역할을 할 수 없으며, 관상동맥 순환으로 심근(myocardium)의 말초까지 에너지를 공급해야만 펌프로써의 기능을 하게 된다.

관상순환(coronary circulation)은 심근의 말초로 산소와 영양분을 공급하고, 이산화탄소를 포함하는 부산물을 배출하는 순환계이다. 관상동맥(coronary artery)은 대동맥(aorta)에서 맨 처음 분기되는 혈관으로써 좌주간부 관상동맥(Left Common Coronary Artery, LCCA)과 우관상동맥(Right Coronary Artery, RCA)으로 나뉘어진다. 좌주간부 관상동맥은 좌전하행지(Left Anterior Descending Branch, LAD)와 좌회선지(Left Circumflex Branch, LCX)로 갈라져 주로 좌심실 전벽과 측·후벽을 관류(perfusion)하며 우관상동맥은 우심실벽과 좌심실의 하벽에 혈류를 공급한다. 그러나 좌회선지가 좌심실 하벽에 혈액을 공급하는 경우도 있다.

1.3

혈류역학(hemodynamics)적 측면의 관상순환계는 유동의 시·공간적 불균질성(heterogeneity), 혈관의 탄력성(compliance), 그리고 자동조절기능(auto-regulation) 등의 현상이 보인다.⁽³⁾ 혈류역학적 분석에 있어서 가능한 한 해석 모델을 단순화시키기 위해서 혈관은 최대치로 이루어져 있으며, 혈류는 정상상태(steady state)에서 흐른다고 가정한다. 궁극적으로는 이렇게 단순화한 모델에 대해서 차후에 실제 모델에 가깝도록 다음과 같은 보완 작업이 필요하다. 혈관이 분기되는 패턴(branching pattern), 혈관 외부 조직의 압력, 이완(systole)과 수축(diastole)에 의한 경계조건이 시간의 함수일

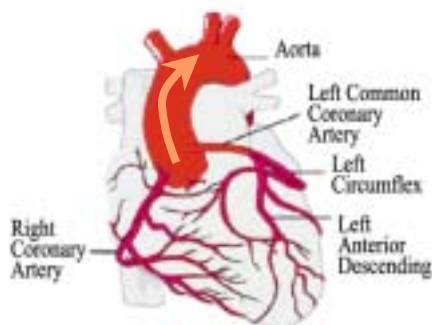


Fig. 1 Schematic of coronary circulatory system

때의 영향, 혈관의 직경에 따른 혈액의 점도 변화, 그리고 혈류의 유동 특성 등이 고려되어야만 한다. 이러한 보완 작업은 단순화한 지배방정식과 해석 모델을 수정함으로써 해결될 수 있다. 따라서 본 연구는 돼지의 LCCA 에 대해서 1 차원의 수치해석을 통해 혈류의 분석방법을 결정하고, 그 방법을 사용하여 혈류의 압력 및 유량 분포 등의 혈류역학적 특성을 분석하는 것을 목적으로 한다.

2.

생물의 각 종들에서 기관(organ)의 형태나 작용은 다르지만, 개체발생학(ontogeny)적으로 각각의 기관의 기원(origin)이 동일할 때 서로 상동(homology)이라 한다. 인간 심장과 돼지의 심장은 상동기관(homologous organ)에 해당한다. Kassab 등⁽⁴⁾은 돼지의 관상순환계에 대해서 도수(order number), 지름, 길이, S/E(segment to element ratio), 그리고 연결성 행렬(connectivity matrix) 등의 형태계측 데이터를 얻은 바가 있다. 본 연구에서는 Kassab 등⁽⁵⁾이 얻은 형태계측 데이터를 사용했다. 돼지의 관상동맥과 관상정맥은 위상기하학(topology)적으로 나뭇가지처럼 분기되는 양상이지만 관상모세혈관은 망상(network)의 형상을 가지고 있다.

Strahler 시스템(Diameter-defined Strahler System)은 혈관 직경에 기초해서 도수를 부여하게 된다.⁽⁷⁾ 지름이 가장 작은 모세혈관에 대해서 도수 0 을 부여하고, 관상동맥에서 모세혈관으로 분기되는 지름이 가장 작은 관상 세동맥(arterioles)에 대해서 도수 1 을 부여한다. 그리고 도수 1 인 두 개의 세동맥이 만나서 합류되는 혈관은 기준이 되는 도수 2 의 임계지름보다 크면 도수 2 가 부여되며, 그렇지 않으면 도수 1 이 된다. 이렇게 모든 혈관 분절(segments)에 대해서 지름이 가장 작은 혈관에서부터 도수를 1, 2, 3, ..., j, ... 로 부여하면 직경이 가장 큰 관상동맥 입구에서는 도수 11 이 부여된다. 그리고 세동맥과 연결된 관상모세혈관은 도수 0a 를 부여하고, 세정맥(venules)과 연결된 부분은 도수 0v 를 부여한다.

지름은 가장 중요한 혈류역학적 파라미터이고, 그에 따른 가장 작은 표준 편차를 구하는 것이 지름에 기초한 Strahler 시스템의 가장 중요한 특징이라 생각된다. 임계지름에 기초해서 도수를 부여하는 방법은 각각의 도수에 대한 표준편차를 최소화한다. LCCA 의 평균직경을 구해서 도수를 부여

Table 1 Diameters, lengths, and number of vessel elements in each order of vessels in the porcine LCCA

Order	Diameter (μm)	Length (mm)	Number of order	Branching Ratio
0a	6.2	0.052	1,789,365	3.38
1	9.0	0.115	530,045	2.63
2	12.1	0.136	201,823	3.17
3	17.1	0.149	63,723	2.44
4	30.1	0.276	26,120	2.99
5	65.2	0.508	8,739	4.23
6	138	1.42	2,066	4.08
7	290	3.68	506	2.99
8	460	5.58	169	3.52
9	778	11.8	48	6.00
10	1695	23.9	8	8.00
11	3276	52.9	1	

하면 분기점을 중심으로 상위 요소와 하위 요소의 직경이 비슷하면 같은 도수를 부여하게 된다. 그래서 각각을 임계 지름의 하한과 상한의 범위를 다음과 같이 정한다.

$$\text{하한: } [(D_{n-1} + \Delta_{n-1}) + (D_n - \Delta_n)]/2$$

$$\text{상한: } [(D_n + \Delta_n) + (D_{n+1} - \Delta_{n+1})]/2$$

이렇게 구한 임계지름의 범위는 각각의 도수에 대해서 어느 정도의 간격을 가지고 있다. 이러한 간격을 없애면 개정된 평균직경과 표준편차를 얻게 되고, 이렇게 개정된 평균직경과 표준편차를 다시 임계지름의 식에 대입하면 새로운 범위의 임계직경을 얻게 되고, 이러한 작업을 초기의 평균직경 변화가 1%내에서만 허용해서 수렴하도록 반복한다. 그러면 개정된 Strahler 시스템의 도수에 대한 평균직경과 표준편차가 구해지게 된다.

형태계측으로부터 얻은 좌주관부 관상동맥에 대한 용어는 다음과 같다.⁽⁵⁾ 혈관 분기점(bifurcation point)을 중심으로 연속적인 각각의 혈관을 분절(segment)이라 하고, 일련(series)으로 연결된 도수 n의 분절들(segments)을 일률적으로 취급해서 도수 n의 요소(element)라고 명명한다.

도수 1에서 도수 11까지 각각의 도수들은 서로 연결되어 있으며 이를 연결성 행렬(connectivity matrix)로 표현한다.⁽⁵⁾ 연결성 행렬의 성분을 나타내는 C_{mn} 의 정의는 도수 n인 요소에서 분기되는 도수 m 요소의 개수를 도수 n 요소의 전체 개수로 나눈 값이다. 즉, 하나의 도수에서 각각의 다른 도수로 분기되는 비를 C_{mn} 라 한다.

Table 1은 돼지의 좌주관부 관상동맥(LCCA)의 형태계측 데이터로써 관상혈관이 최대로 이완되었을 때 측정되었으며 도수에 따른 지름, 길이, 요소의 개수, 그리고 분기비(branching ratio)를 나타내고

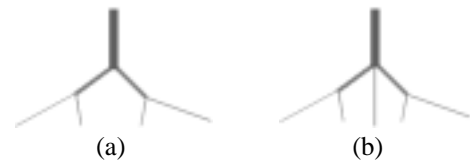


Fig. 2 Symmetric model (a) Asymmetric model (b)

있다. 도수 n의 분기비란 도수 n+1의 혈관 개수에 대한 도수 n의 혈관 개수의 비를 나타낸다. 그리고 해석 모델의 단순화를 위해서 대칭모델에 대한 수학적 모델을 적용하기로 한다.

본 연구의 혈류역학적 해석은 혈관의 분기 패턴(branching pattern), 지름, 그리고 길이를 기초로 해석하였다. 혈관의 분기 패턴은 대칭모델(symmetric model)과 비대칭모델(asymmetric model)이 있으며 Fig. 2에 보는 바와 같다.⁽⁶⁾ 대칭모델은 상위 혈관에서 하위 혈관으로 분기될 때, 같은 직경의 하위 혈관으로만 분기되는 반면, 비대칭모델은 상위 혈관에서 하위 혈관으로 분기될 때, 여러 직경의 하위 혈관으로 분기된다. 본 연구에서는 대칭모델에 대한 해석을 했지만 차후의 연구에서 비대칭 모델에 대한 해석도 수행할 예정이다.

3.

본 연구에서는 적용할 모델이 대칭모델이기 때문에 연결성 행렬(connectivity matrix)에서 m열의 성분은 m+1의 행으로부터 분기되는 것으로 간주하는 것과 같다. 이러한 대각선 성분의 물리적인 의미는 도수 m의 개수를 도수 m+1의 개수로 나누는 것과 같으며, 이렇게 나누어진 값을 분기비(branching ratio)라고 명명한다.⁽⁶⁾ 결국 이러한 가

정으로부터 우리가 얻을 수 있는 것은 특정 도수에서 모든 요소는 병렬로 연결되어 있으며, 그에 따른 특정 도수에서의 모든 입구 분기점과 모든 출구 분기점 사이의 압력강하는 같다는 것이다.

본 연구의 지배 방정식은 유동이 발생하는 관은 무한히 길고, 단면적의 형상은 원형이며, 강성관(rigid pipe)으로써 흐름은 완전히 발달된 층류로 가정하여 Poiseuille 식을 사용한다.

$$\dot{Q} = \frac{\pi d^4 \Delta P}{128 \mu L} \quad (1)$$

$$\dot{q}_n = \frac{\pi D_n^4}{128 \mu_n L_n} (P_{n+1} - P_n) \quad (2)$$

식 (1)을 도수 n 의 요소에 적용하면 식 (2)를 얻을 수 있으며, \dot{q}_n 은 도수 n 의 요소들 중에서 요소 하나에서의 체적유량, D_n 은 도수 n 의 요소 지름(vessel diameter), μ_n 은 도수 n 에서 혈액의 점성계수(coefficient of viscosity), L_n 은 도수 n 의 요소 길이(length), 그리고 P_n 과 P_{n+1} 은 각각 도수 n 의 혈관 요소 입구와 출구의 압력이다. 식 (1)의 압력강하 ΔP 는 다음과 같은 물리적 의미가 있다.

$$\Delta P = \text{Resistance} \times \text{Flow Rate}$$

이때 유동 저항은 식 (3)과 같다.

$$\text{Resistance} = \frac{128 \mu L}{\pi d^4} \quad (3)$$

도수 n 의 요소 개수가 N_n 이면, 식 (2)는 식 (4)와 같이 도수 n 의 전체 유량 \dot{Q}_T 로 표현된다.

$$\dot{Q}_T = \dot{q}_n N_n \quad (4)$$

수학적 해석모델에 대한 경계조건은 다음과 같다. 관상동맥이 최대로 확장(diastole)되어 있을 때 입구 압력은 100mmHg 이며, 도수 0a 인 관상 모세혈관에서의 압력은 26mmHg 로 주어진다. 각각의 도수에 해당하는 혈액의 점도는 도수가 11~5 까지는 4cP 로 가정하며, 도수 0a 에서는 1.5cP 로 주어진다. 그 외의 도수 4~1 은 도수가 감소함에 따라 점도가 선형적으로 감소한다.⁽⁷⁾

입구에는 도수 i , 출구에는 도수 j 가 연결되는

요소에 대해서 지름을 D_{ij} , 길이를 L_{ij} , 점성계수를 μ_{ij} , 요소 개수를 N_{ij} , 그리고 압력강하를 ΔP_{ij} 라고 할 때 식 (2)와 식 (4)로부터 다음과 같다.

$$\dot{Q}_{ij} = \dot{q}_{ij} N_{ij} = \frac{\pi D_{ij}^4}{128 \mu_{ij} L_{ij}} \Delta P_{ij} \cdot N_{ij} \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{ij} = G_{eq,ij} \Delta P_{ij} \quad (6)$$

여기에서

$$G_{eq,ij} = \frac{\pi N_{ij} D_{ij}^4}{128 \mu_{ij} L_{ij}} \quad (7)$$

$$\Delta P_{ij} = P_i - P_j \quad (8)$$

도수 i 의 요소에서 m 개의 도수 j 의 요소로 분기되는 분기점에 대해서 질량보존법칙을 적용하면 식 (9)와 식 (10)이 된다.

$$\sum_{i=1}^{m_j} \dot{Q}_{ij} = 0 \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^{m_j} (P_i - P_j) G_{ij} = 0 \quad (10)$$

각각의 분기점에 식 (10)을 적용하면 11 개의 연립 일차방정식을 얻게 되며, 이때 미지의 압력이 11 개, 방정식이 11 개가 되어서 가우스 소거법을 이용해서 각각의 도수에서의 압력을 구할 수 있다.

혈관은 탄성을 지닌 관이다. 식 (1)에 가정한 조건에 관의 탄력성을 고려할 경우, 혈액의 유량은 혈관의 축방향 길이에 대해서는 일정하므로 상수이고 단지 혈관의 지름과 혈류 압력에 의해 탄력성이 결정되며, 각각 식 (11)과 식 (12)와 같다. 식 (12)는 관 입구의 지름이 D 일 때 압력은 P' , 출구 지름이 D^* 일 때의 압력 P'^* 일 경우, 지름, 압력, 그리고 탄력성 상수(compliance constant) α 의 관계를 나타내는 식이다.

$$\frac{dP'}{dx} = \left(\frac{128 \mu}{\pi D^4} \right) \dot{Q} \quad (11)$$

$$D - D^* = \alpha (P' - P'^*) \quad (12)$$

식 (12)를 사용하여 식 (13)을 얻을 수 있으며, 식 (13)을 Poiseuille 식인 식 (11)에 대입한 후, 변수 분리해서 적분을 하면 지름에 대한 5 차 방정식을 얻게 된다.

$$\frac{dP'}{dx} = \frac{dP'}{dD} \cdot \frac{dD}{dx} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{dD}{dx} \quad (13)$$

$$(2\alpha/D)\Delta P'^2 + \Delta P' = (128\mu L \dot{Q} / \pi D^4) \quad (14)$$

$$\Delta P'_n = [-D_n + (D_n^2 + 8\alpha_n \Delta P'_n D_n)^{1/2}] / 4\alpha_n \quad (15)$$

이를 Taylor series 로 전개해서 탄력성을 고려한 압력강하 $\Delta P'$ 에 대한 식으로 정리하면, 식 (14)와 같이 $\Delta P'$ 에 대한 2 차 방정식을 얻는다.⁽⁸⁾ 요소 n 의 혈관에 대해서 $\Delta P'$ 의 해를 구하면 탄력성을 고려한 압력을 구할 수 있다. 식 (15)는 탄력성이 고려된 혈관의 지배방정식이다. 관이 탄력적이지 않은, 즉 α 가 0 이면 식 (14)는 식 (1)과 같다. 식 (15)에서는 이를 구별하기 위해서 탄력성을 고려한 압력강하를 $\Delta P'_n$ 라 표기하고, 탄력성을 고려하지 않은 식 (1)의 압력강하와 같은 것을 Poiseuille 압력 ΔP_n 이라 했다.

4.

지배방정식으로부터 대칭모델에 대한 모든 분기점에서의 압력을 얻었으며 Fig. 3 은 LCCA 의 대칭모델로부터 얻은 도수에 따른 요소 출구에서의 평균 압력을 나타내며 이로부터 5 차 다항식으로 나타낸 길이방향의 압력 분포(longitudinal pressure distribution)를 알 수 있다.

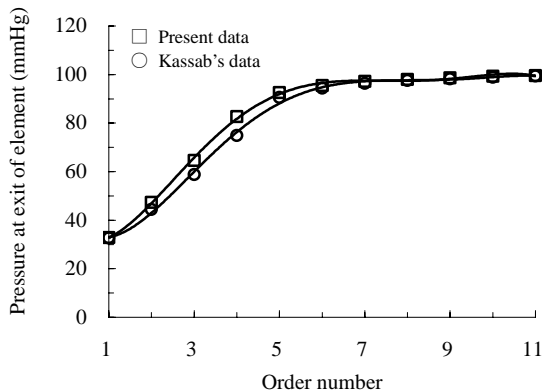


Fig. 3 Relationship between pressure and order number

본 연구로부터 얻은 대칭모델의 압력과 Kassab 등⁽⁵⁾ 이 얻은 비대칭모델의 압력의 정량적인 차이는 비대칭 모델의 경우는 연결성 행렬에서 각각의 성분들을 모두 고려했지만, 대칭모델에서는 대각선 성분, 즉 분기비만을 고려했기 때문에 차이가 발생한 것이라고 생각된다. 특히, 도수 2~7 에서 도수가 감소함에 따라 요소 개수의 지수 함수적인 증가에 따라서 이런 차이가 뚜렷이 나타나는 것이라 보인다.

Fig. 4 는 LCCA 의 혈관 요소의 대칭모델로부터 얻은 도수에 따른 요소 입구와 출구에서의 압력강하를 나타내며 5 차 다항식으로 나타낸 길이 방향의 압력강하 분포를 나타낸다. 본 연구의 압력강하와 Kassab 등⁽⁵⁾ 이 얻은 압력강하로부터 도수 2 와 도수 3 에서 가장 많은 압력강하가 발생됨을 알 수 있다. LCCA 각각의 도수에서는 유량이 일정하기 때문에 이곳의 혈관에서 가장 많은 저항이 발생하고, 이로부터 도수 2 와 도수 3 의 혈관 내 피세포(endothelial cell)가 상대적으로 더 많이 손상될 수 있음을 알 수 있다. 정상적인 혈관 내피세포는 혈관내의 혈류량이 많아지면 혈관을 확장시키며, 혈관을 협착시키는 혈전 형성을 막아주는 기능을 한다.

도수에 따른 유량을 Fig. 5 에 나타내었으며, 이들 데이터를 지수 다항식으로 나타낸 것이다. 본 연구에서는 LCCA 의 입구와 출구의 압력이 각각 100mmHg 와 26mmHg 로 주어졌다. 이렇게 일정한 압력강하의 경계조건 때문에 비대칭모델이 대칭모델보다 더 많은 유량을 가지는 것으로 보인다. 이러한 유량의 차이는 도수 11 에서 확연히 보인다.

Poiseuille 식은 무한한 길이의 원형관 내에서 작동유체는 뉴턴성 유체이며 흐름은 정상유동으로 가정했을 때 적용 가능하다. 하지만 유한한 길이의 원형 관에서도 Reynolds 수와 Womersley 수가

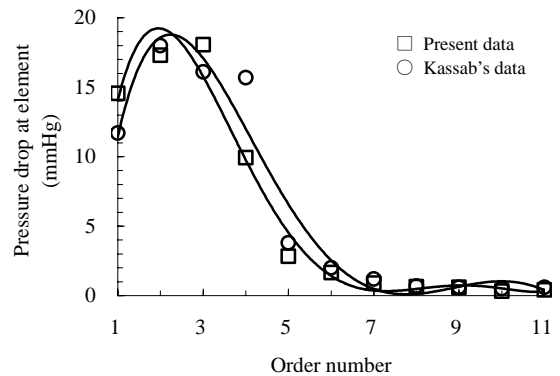


Fig. 4 Relationship between pressure drop at element and order number

Table 2 Symmetric model: the computed mean blood pressure at the exit section, mean blood pressure drop per element, mean blood flow per vessel, Reynolds number per order, and Womersley number in each order of vessels in the porcine left common coronary arteries.

Order	Pressure (mmHg)	Pressure drop (mmHg)	Flow (ml/sec)	Reynolds number	Womersley number
1	32.5	14.6	1.4E-6	0.100	0.004
2	47.1	17.4	3.6E-6	0.157	0.005
3	64.5	18.2	1.1E-5	0.294	0.007
4	82.6	10.0	2.8E-5	0.349	0.011
5	92.6	3.0	8.7E-5	0.444	0.023
6	95.6	1.5	3.2E-4	0.766	0.048
7	97.1	0.9	1.4E-3	1.636	0.100
8	98.0	0.7	4.3E-3	3.101	0.159
9	98.7	0.6	1.5E-2	6.376	0.269
10	99.3	0.3	9.0E-2	17.671	0.586
11	99.6	0.4	7.2E-1	73.144	1.132

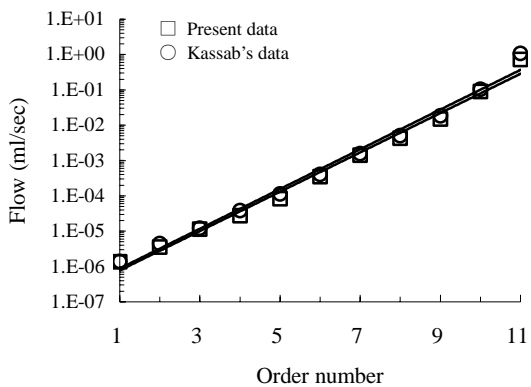


Fig. 5 Relation between blood flow and order number

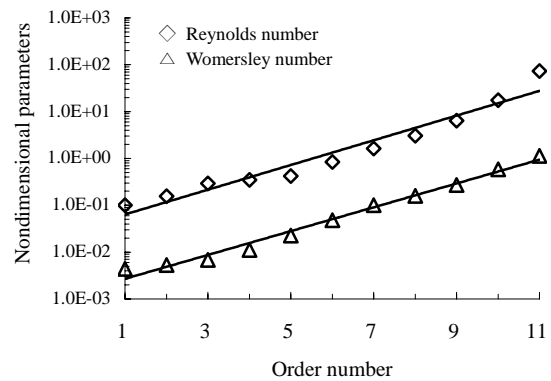


Fig. 6 Relationship between Reynolds number and Womersley number in successive orders

1 보다 적으면 그 결과는 길이가 무한하고 단면적이 원형인 관에서의 값에 가깝게 된다.^(9,10) 또한 Womersley 수는 $(D/2)(\omega/\nu)^{1/2}$ 로 정의되는 무차원 수이며, 여기에서 ω 는 맥동류의 주파수(radian frequency)를 의미하며 해석 모델에 대해서는 110 cycle/min 의 값을 택했다.⁽⁵⁾ Fig. 6 의 세미로그 그래프는 관상혈관의 도수에 따른 각각의 무차원 수를 나타내며, 도수 7 이하의 혈관에서 Reynolds 수가 1 보다 작다는 것을 알 수 있다. Reynolds 수가 1 보다 작으면 점성력이 관성력보다 유동에 지배적이게 된다. 도수가 작을수록 혈류의 유동에 점성력이 지배적임을 Fig. 6 을 통해 알 수 있다.

마지막으로 Fig. 7 은 혈관의 로그 스케일 탄력성 상수 α 를 10^{-7} , 10^{-6} , 10^{-5} , 10^{-4} , 그리고, 10^{-3} 로 변화시켰을 때 도수 1~11 의 무차원화된 압력강하를 그래프화 한 것이다. 탄력성 상수 α 가 커질수록 작은 도수일수록 혈관의 압력강하가 많이 발생함을 알 수 있다. 따라서 작은 도수일수록 혈관이

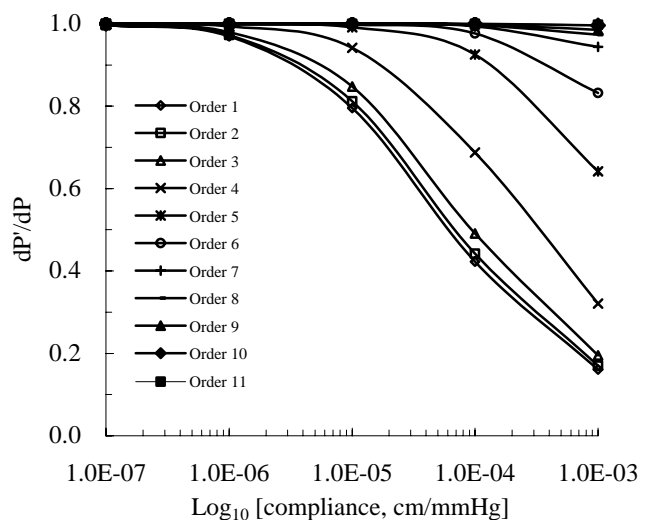


Fig. 7 Relationship between normalized pressure drop and logarithm of compliance constant

탄력적임을 알 수 있다.

5.

본 연구를 통하여 관상혈관 순환계의 수학적 모델링과 형태계측 데이터로부터 혈류역학적 특성을 고려해 보았다. 도수가 7 이상인 관상동맥에서는 압력 강하가 작으며 도수가 6 이하에서는 압력강하가 많은 것으로 보아서, 생리학적인 관점의 도관 동맥(conduit artery)과 저항 동맥(resistance artery)의 특징과 잘 일치하고 있다.

실제의 관상 순환계의 유동은 비정상 상태이며, Reynolds 수가 1 보다 큰 도수에 대해서는 속도에 대한 항을 고려한 지배방정식을 사용해서 고려해야 한다. 앞으로의 연구는 비대칭 모델에 대한 해석을 통해서 현재의 연구보다 좀 더 근접한 관상 심혈관계의 혈류역학적 특성과 현 연구에서 고려되지 않은 혈류의 유변학적 파라미터도 고려해야 할 것이다.

- (9) Fung, Y. C., 1990, "Biomechanics: Motion, Flow, Stress, and Growth." New York: Springer-Verlag, pp. 229-234.
- (10) M. Zamir, 2000, "The Physics of Pulsatile Flow", Springer-Verlag New York, Inc., pp.17-19.

- (1) Elizabeth Arias, Betty L. Smith, 2003, "Death; Preliminary Data for 2001", CDC National Vital Statistics Reports, Volume 51, Number 5, pp. 2-5.
- (2) American Heart Association, 2002, "Heart Disease and Stroke Statistics – 2003 Update", Dallas, Tex.: American Heart Association, pp. 5-10.
- (3) Fung, Y. C., 2001, "Introduction to Bioengineering", World Scientific Publishing Co. Ltd, pp. 93-105.
- (4) Kassab, G. S., Rider, C. A., Tang, N. J., Fung, Y. C., 1993, "Morphometry of Pig Coronary Arteries", Am. J. Physiol. 265 (Heart Circ. Physiol. 34), pp. H350-365.
- (5) Kassab, G. S., Berkley, J, Fung, Y. C., 1997, "Analysis of Pig's Coronary Artery Blood Flow with Detailed Anatomical Data", Annals of Biomedical Engineering, Vol. 25, pp. 204-217
- (6) Kassab, G. S., 1990, "Morphometry of the Coronary Arteries in the Pig", La Jolla: University of California, San Diego, Ph.D. Thesis, pp. 157-160.
- (7) Zhung, F. Y., Fung, Y. C. and Yen, R. T., 1983, "Analysis of Blood Flow in Cat's Lung with Detailed Anatomical and Elasticity Data", J. Appl. Physiol.: Respirat. Environ. Exercise Physiol. 55, pp. 1341-1448
- (8) Kassab, G. S., Le, K. N., Fung, Y. C., 1999, "A Hemodynamic Analysis of Coronary Capillary Blood Flow Based on Anatomic and Distensibility Data", Am. J. Physiol. 277 (Heart Circ. Physiol.46), pp. H2158-H2166.