

좌관상동맥 분지부내의 정상혈류와 박동성혈류의 유동특성비교

서상호, 유상신*, 권혁문**, 노형운
 숭실대 기계공학과, *한국항공대 기계설계학과, **연세대 내과

Comparison of Steady and Physiological Blood Flow Characteristics in the Left Coronary Artery Bifurcation

S. Suh, S. S. Yoo*, H. M. Kwon**, H. W. Roh

Dept. of Mech. Eng. Soongsil Univ.,

*Dept. of Mech. Eng. & Design, Hankuk Aviation Univ.,

**Dept. of Internal Medicine, Yonsei Univ.

Abstract

The objective of this investigation is to understand the role of hemodynamics in the formation and development of atherosclerosis lesions in the human left coronary artery. This study also aims to compare the blood flow characteristics of steady and physiological flows. Three dimensional, steady and physiological flows of blood in the left coronary artery are simulated using the Finite Volume Method. Apparent viscosity of blood is represented as a function of shear rate by the Carreau model. Distributions of velocity, pressure and shear stress in the left coronary artery bifurcation are presented to compare the steady and physiological flow characteristics.

Key Words : Left coronary artery bifurcation(좌관상동맥분지부), Blood(혈액), Steady and Physiological Flow(정상 및 박동성혈류), Numerical simulation(수치시뮬레이션), Velocity and shear stress distributions(속도와 전단응력분포),

서론

동맥경화로 인한 관상동맥질환, 경동맥질환, 폐쇄성 말초혈관질환 등은 서구사회의 가장 흔한 사망원인이며 최근 우리나라에서도 이로 인한 유병률이 급속히 증가하는 추세를 보이고 있다⁽¹⁾. 동맥경화는 경동맥 분지부(carotid artery bifurcation), 관상동맥 분지부(coronary artery bifurcation), 그리고 장골동맥 분지부(iliac artery bifurcation)등과 같이 동맥혈관이 분지되거나 만곡되는 부위(curved area of arteries)에서 주로 발생한다^(2,3). 동맥혈관에서 동맥경화(atherosclerosis)에 의한 협착(stenosis)현상이 발생하는 기전(mechanism)에 대해서는, (1) 압력관련가설(pressure-related hypothesis)⁽⁴⁾, (2) 고전단응력과의 연관설(high wall shear stress dependent hypothesis)⁽⁵⁾, (3) 저전단응력과의 연관설(low wall shear stress dependent hypothesis)⁽⁶⁾, (4) 난류와 관련된 가설(turbulence-related hypothesis)⁽⁷⁾과 같이 많은 가설이 있으나 어느 것도 완전하게 동맥경화의 발생과 진행의 기전을 설명하지 못하고 있다. 특히 심근의벽을 따라 주행하며, 함몰되어 있는 관상동맥계에서 혈관질환의 발생 및 진행의 기전과 혈관질환에서 중재적 시술후 재협착의 발생기전에 관한 연구는 시급히 해결해야 할 과제이다. 따라서, 관상동맥내 혈액 유동특성에 관한 연구는 동맥혈관계 질환에서 생체유체역학적 측면의 병인론을 설명할 수 있는 기초연구자료로 활용될 수 있다.

관상동맥내 혈액유동의 특성에 관한 연구는 동맥경화증으로 인한 협착발생의 기전을 혈류역학적으로 밝히고, 이를 토대로 중재적 치료와 시술에 활용하고자 함이 본 연구의 목적이다. 관상동맥내 전단응력분포와 관상동맥질환의 호발부위와의 상관관계

를 밝히기 위하여 전산유체역학적인 방법을 이용하여, 관상동맥내 정상혈류의 유동특성을 해석하고, 그 결과를 박동성혈류의 유동특성을 구하는데 이용하여 정상혈류와 박동성혈류의 유동특성을 비교·분석하고자 한다.

관상동맥 분지관의 모델선정

본 연구에 적용한 관상동맥 분지부를 형상화하면 Fig. 1과 같다. 관상동맥은 대동맥동(aortic sinuses)에서 좌관상동맥(left coronary artery)과 우관상동맥(right coronary artery)으로 기시된다. 좌관상동맥은 좌전하행지(anterior descending branch)와 회선지(circumflex branch)로 나누어지며, 다시 좌전하행지와 대각분지부(diagonal branch)로 분지된다. 좌관상동맥에서 관상동맥질환은 주로 근위부 및 중부의 분지부에 호발되는 것으로 알려져 있다^(3,10). Fig. 1에서 x_A 는 좌전하행지를 따르는 외벽을 나타내고, x_D 는 대각분지관을 따르는 외벽을 나타낸다. 관상동맥 분지부주위의 유동특성을 구하기 위하여 본 연구에 적용된 관상동맥의 지수는 입상자료를 근거로 하여 좌관상동맥에서 대각분지부와 좌전하행지로 분지되는 각도는 45°로 택하였고, 주관상동맥에 대한 대각분지와 좌전하행지의 직경비는 각각 0.7과 0.5로 맞추어 주었다.

좌관상동맥의 속도파형은 대동맥의 속도파형과는 다른 수축-이완의 속도파형을 나타낸다. 수축기에 좌심실의 혈류가 대동맥으로 빠져 나갈 때 관상동맥동이 폐쇄될 때 관상동맥으로는 혈류량이 감소되며, 확장기에 관상동맥동이 개방되어 비로써 충분한 좌관상동맥 혈류속도파형이 유지된다고 할 수 있다. 바로 이 현상이 연구자들이 쉽게 오류를 범할 수 있는 부분인데, 박동성혈류의 관상동맥내 유동특성을 파악하기 위해서는 대동맥에서의

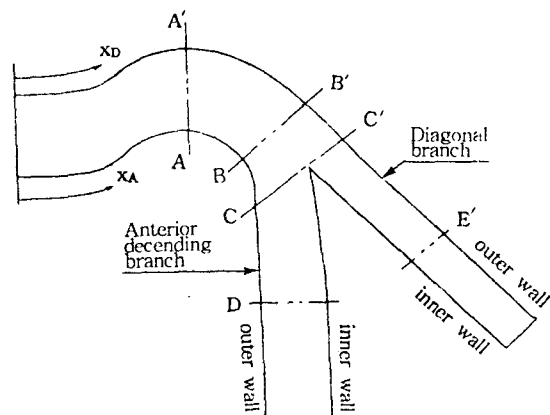


Fig. 1 Coronary artery bifurcation model

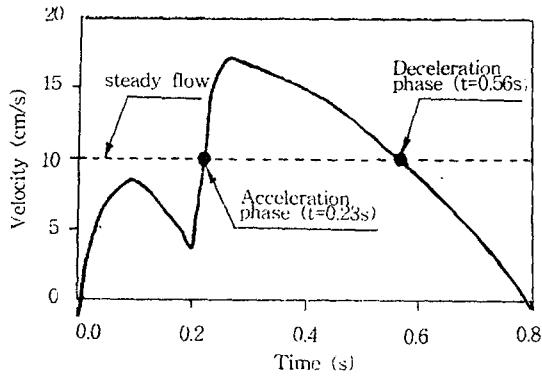


Fig. 2 Physiological waveform of phasic coronary blood flow

속도파형이나 압력파형과는 다른 관상동맥에 적합한 속도와 압력파형을 이용하여야 한다. 따라서, 박동성혈류의 관상동맥입구에서의 속도파형은 Fig. 2와 같이 임상적으로 측정된 자료값을 이용하여야 하였다.

혈액의 유변학적 성질

혈액의 걸보기점성계수는 전단율의 크기에 따라 달라진다. 따라서, 혈액의 유동문제를 수치적으로 해석하기 위해서는 유변학적 성질을 전단율의 함수로 나타낼 수 있는 구성방정식이 필요하다. 많은 구성방정식중에서 혈액과 같이 미약한 점탄성특성을 갖는 순수점성 비뉴턴유체의 유변학적 특성을 잘 나타내는 것으로 알려진 Carreau모델, 식 (1)을 이용하여 혈액의 걸보기점성계수를 전단율의 함수로 나타내었다.

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) [1 + \lambda^2 \dot{\gamma}^2]^{\frac{q-1}{2}} \quad (1)$$

식 (1)의 η_{∞} , η_0 , λ 는 각각 무한전단율점성계수, 영전단율점성계수, 그리고 전단율이며, λ 와 q 는 각각 특성시간과 상수이다. 본 연구에서 채택한 비뉴턴유체인 혈액의 유변학적 상수값은 $\eta_0 = 0.056 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\eta_{\infty} = 0.00345 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\lambda = 3.313 \text{ s}$ 와 $q = 0.356$ 이다. 국소 전단율이 계산되면 혈액의 걸보기점성계수는 식 (1)과 같은 구성방정식으로 결정할 수 있다. 혈액의 구성방정식에 관해서는 참고문헌 [11, 12]에 상세히 기술되어 있다.

지배방정식과 수치해석방법

관상동맥 분지부 주위의 유동특성을 수치적인 방법으로 해석하기 위한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \eta \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (3)$$

식 (2)와 (3)의 ρ , u_i , p , η 는 각각 밀도, 속도벡터, 압력, 그리고 걸보기점성계수이다. 식 (2)와 (3)을 이용하여 관상동맥내 혈액의 속도분포와 전단응력분포를 수치계산하여 구할 수 있다.

관상동맥내 혈액에 관한 지배방정식을 풀기 위하여 유한차적법을 이용하여 비엇물림격자계(non-staggered grid system)에 대한 이산화방정식을 구하였다.

본 연구에서 적용한 비엇물림격자계는 운동량방정식의 속도성분 u , v , w 와 p 를 같은 격자점에서 계산한다. 이 격자계는 이산화방정식을 단순화시킬 뿐만 아니라 컴퓨터 기억공간을 크게 줄

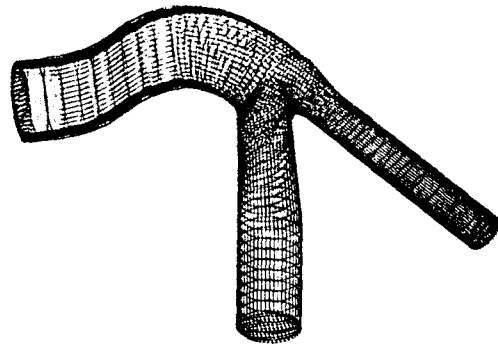


Fig. 3 Three dimensional left coronary artery bifurcation model

일 수 있다. 그러나, 비엇물림격자계를 사용하면 압력과 속도계산시 chequerboard oscillation현상을 야기시킨다. 본 연구에서는 Rhie-Chow알고리즘을 적용하여 이 문제를 극복하였다.

비정상 유동문제를 풀기 위하여 완전암시법(fully implicit scheme)을 이용하였으며, 이때 적용한 시간 간격은 0.01초이다. 운동량방정식의 대류항처리는 QUICK scheme을 사용하였고, 운동량방정식의 압력항처리는 압력수정방법을 이용하는 SIMPLE의 알고리즘을 적용하였다. 압력수정방정식은 근사방정식이기 때문에 수치해의 발산을 막기 위하여 압력은 속도보다 큰 하향이완계수를 적용하였다. Fig. 3에 수치계산에 사용된 3차원 관상동맥 분지부의 기하학적 모델을 도시하였다.

결과 및 검토

좌관상동맥 분지부 주위의 속도분포와 압력분포

관상동맥 입구에서 박동성 혈류의 평균속도를 이용한 레이놀즈수가 $Re=100$ 일 때 관상동맥 분지부 주위의 혈액의 속도벡터와 압력분포를 Fig. 4과 Fig. 5에 나타내었다.

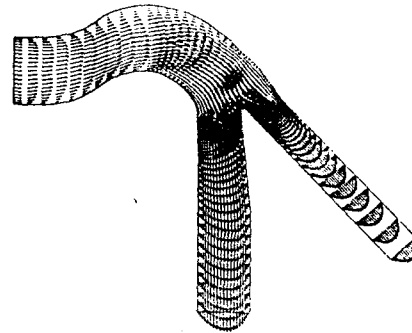


Fig. 4 Velocity vectors of steady blood flow in the left coronary artery bifurcation

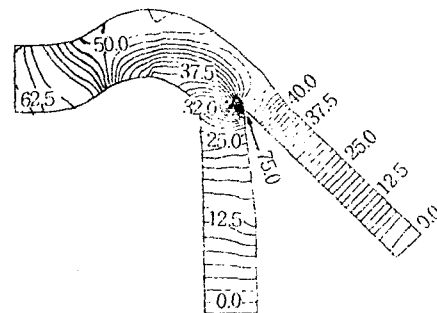
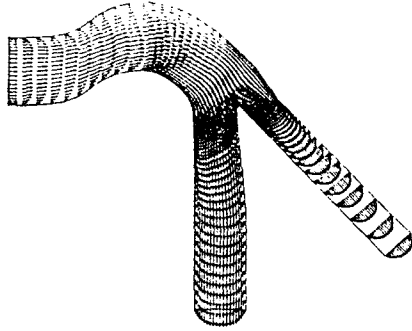
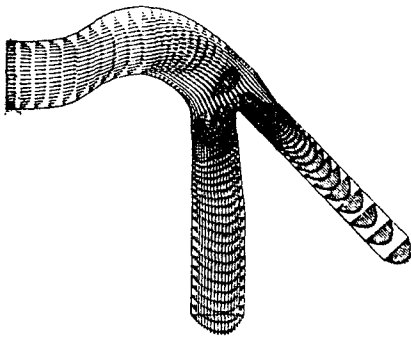


Fig. 5 Pressure contours of steady blood flow in the left coronary artery bifurcation

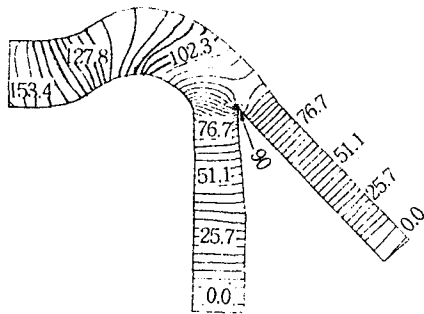


(a) acceleration phase (t=0.23s)

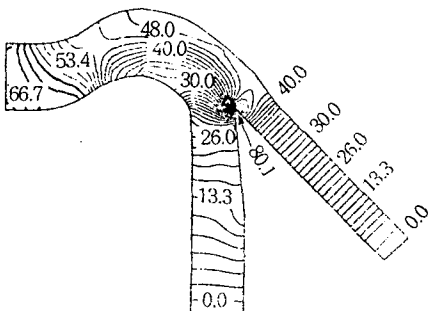


(b) deceleration phase (t=0.56s)

Fig. 6 Velocity vectors of physiological blood flow in the left coronary artery



(a) acceleration phase (t=0.23s)



(b) deceleration phase (t=0.56s)

Fig. 7 Pressure contours of physiological blood flow in the left coronary artery

입구유동조건이 균일유동일 때 좌관상동맥이 만곡되는 부위에서는 좌전하행지쪽의 속도가 높게 나타나고, 분지부에 가까운 곳에서는 대각분지관쪽의 속도가 높게 나타난다. 또한 분지부 상방외벽 속도의 현저한 감소는 재순환으로 인한 역류의 발생조건을 제공하여 동맥경화의 초기 병변발생의 병소로써 추정할수 있다. 그러나 속도의 감소로 인한 재순환영역은 유동이 분지부로 접근함에 따라 소멸된다. 분지부 입구에서의 유동은 대각분지쪽으로 치우치고 있음을 알 수 있다. 따라서 좌전하행지에서 속도는 좌전하행지 내벽쪽으로 치우치게 되고, 좌전하행지 외벽쪽에 다시 재순환영역이 형성되고 있음을 알 수 있다. 좌관상동맥의 분지부내 압력은 좌전하행지와 대각분지를 따라 감소함을 알 수 있다. 좌관상동맥외벽쪽의 압력은 좌관상동맥내벽의 압력보다 높게 분포되고, 대각분지쪽의 압력강하가 좌전하행지쪽의 압력강하보다 크다. 또한 대각분지부의 정점(vertex)부분에서 압력은 크게 증가됨을 알 수 있다.

박동성혈류의 속도분포와 압력분포를 비교하기 위하여 박동유동의 경우에 정상혈류와 혈액유동속도가 같은 가속시와 감속시의 속도와 압력분포를 각각 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다.

가속시에는 정상혈류의 경우와 달리 관상동맥이 만곡되는 곳에서 역류가 발생하지 않는다. 그 이유는 압력에 의한 힘보다 지속적으로 증가되는 운동량이 공급되기 때문인 것으로 사료된다. 그러나, 감속시의 속도와 압력분포는 가속시의 경우와 달리 정상혈류의 경우와 유사한 경향을 나타내지만 만곡부에서의 재순환영역은 확장되며 대각분지와 좌전하행지의 속도는 벽면의 점성영향으로 중심부근의 속도가 빨라지게 된다. 따라서 대각분지와 좌전하행지의 속도도 정상혈류의 경우보다 평탄한 분포를 나타내게 된다.

좌관상동맥 분지부내의 전단응력분포

좌관상동맥 분지부 주위의 전단응력분포와 관상동맥질환 호발부위의 상관관계를 알아보기 위하여 먼저 정상혈류일 때 관상동맥분지부 주위의 전단응력분포를 수치계산하여 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8은 좌관상동맥에서 좌전하행지로 분지되는 쪽의 내·외벽 전단응력분포와 좌관상동맥에서 대각분지로 분지되는 쪽의 내·외벽 전단응력분포를 나타낸 그림이다. 입구유동조건이 균일유동일 때 좌관상동맥입구에서 좌전하행지쪽으로 높게 나타난 외벽전단응력은 유동이 발달함에 따라 감소한 후 외벽이 만곡되기 시작하면서 외벽전단응력은 증가하고, 좌전하행지쪽의 속도가 빨라지는 곳에서 감소하기 시작한다. 분지부 바로 입구부위에서는 분지관의 유동저항증가로 인해 외벽전단응력은 다시 증가한 뒤 좌전하행지 외벽의 입구부근에서 전단응력이 작은 값을 갖는다. 이 부위는 Fig. 4에서 이미 검토한 바와 같이 재순환영역이 형성되는 곳이다. 이 재순환영역은 좌전하행지 하류에까지 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 관상동맥질환이 있는 환자들은 이 부위에 동맥경화가 발생함을 혈관조영사진으로 확인할 수 있다. 다시 말해 동맥경화의 호발부위는 전단응력의 값이 작은 부분이 좌전하행지 입구부근임을 알 수 있다. 좌관상동맥의 외벽과 대각분지관의 외벽을 따르는 전단응력분포를 살펴보면 좌관상동맥이 만곡되는 부위에서 전단응력분포가 0에 가까워짐을 알

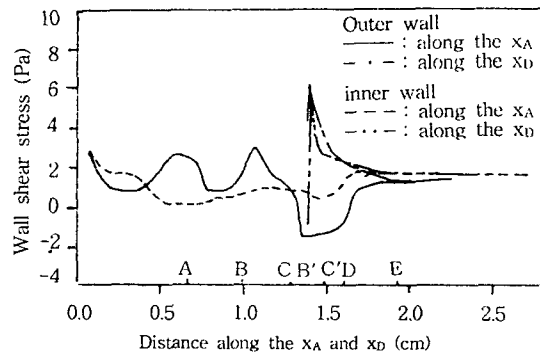


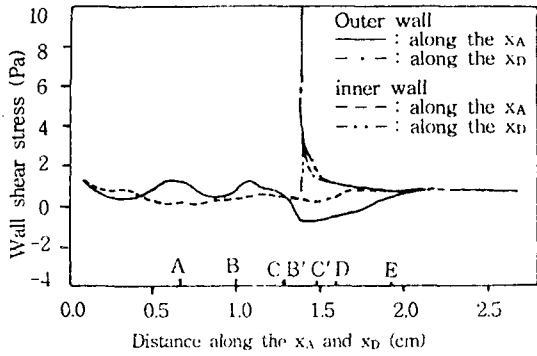
Fig. 8 Wall shear stress distributions of steady blood flow in the left coronary artery bifurcation

후기

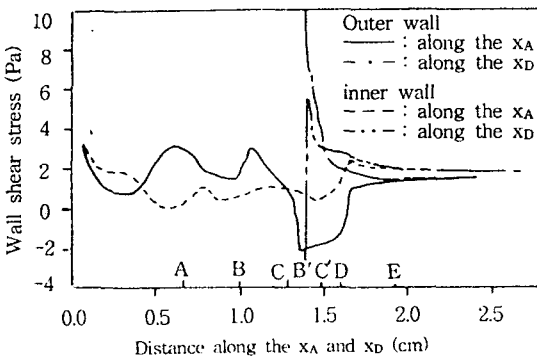
이 논문은 1995년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음

참고문헌

- (1) 홍석근, 1993, "Mechanical Factors in the Pathogenesis, Localization and Evolution Atherosclerosis", Workshop on the Biomedical Fluid Dynamics, AFERC, POSTECH, pp. 21~22.
- (2) Nerem, R. M., 1992, "Vascular Fluid Mechanics, the Arterial Wall and Atherosclerosis", J. of Biomechanical Engineering, Vol. 114, pp. 274~282.
- (3) Cheitlin, M, Sokolow, M. and McIlroy, M., 1993, Clinical Cardiology, Prentice-Hill Int., 6th ed.
- (4) Texon, M, Imparato, A. M. and Helpert, M., 1965, "Role of Vascular Dynamics in the Development of Atherosclerosis", JAMA, Vol. 194, pp. 168~172.
- (5) Fry, D. L., 1973, "Response of the Arterial Wall to Certain Physical Factors in Atherogenesis: Initiating Factors", A Ciba Foundation Symp., Vol. 12, pp. 93~126.
- (6) Caro, C.G., and Nerem, R. M. 1973, "Transport of C-4-Cholesterol between Serum and Wall in the Perfused Dog Common Carotid Artery", Circ. Res. Vol. 24, pp. 187~204.
- (7) Ku, D. N., Giddens, D. P., Zarins, C. K. and Glasgow, S., 1985, "Pulsatile Flow and Atherosclerosis in the Human Carotid Bifurcation : Positive Correlation between Plaque Location and Low and Oscillating Shear Stress", Atherosclerosis, Vol. 5. pp. 293~302.
- (8) Mitchell, J. R. A. and Schwartz, C. J., 1965, Arterial Disease, Blackwell Scientific Publishers Ltd., Oxford.
- (9) Wesolowski, S. A., Fries, C. C., Sabani, A. M., and Sawyer, P. N., 1965, "Significance of Turbulence in the Hemic System and in the Distribution of the Atherosclerotic Lesion", Surg., Vol. 57, pp. 155~162.
- (10) Popma, J., Leon, M. and Tapel, E., 1994, Atlas of Interventional Cardiology W. B. Saunders Co.
- (11) Banerjee, R. K., 1992, A Study of Pulsatile Flows with Non-Newtonian Viscosity of Blood in Large Arteries, Ph. D. Thesis, Drexel University.
- (12) 유상신, 서상호, 장남일, 1994, "인체혈액의 구성방정식에 관한 비교연구", 한국유변학회 논문집, 제 7권 1호, pp. 157~164.



(a) acceleration phase (t=0.23s)



(b) deceleration phase (t=0.56s)

Fig. 9 Wall shear stress distributions of physiological blood flow in the left coronary artery bifurcation

수 있다. 또한, 좌전하행지와 대각분지로 분지되는 곳의 전단응력값이 가장 크게 나타나고, 그 값은 급격하게 감소한 뒤 일정해진다.

박동성혈류의 전단응력분포를 Fig. 9에 나타내었다. 가속시의 전단응력분포는 감속시의 전단응력분포와 다른 값을 갖는다. 박동성혈류와 정상혈류의 전단응력분포를 비교해보면, 감속시 전단응력분포와 정상혈류의 경우는 서로 유사한 경향을 나타냄을 알 수 있다. 그러나 박동성혈류의 좌전하행지 내벽의 전단응력값의 최대치는 정상혈류의 값보다 훨씬 크게 나타난다. 그리고, 좌전하행지로 분지되는 곳의 내벽쪽의 전단응력도 정상혈류의 경우보다 크게 나타난다. 감속시의 역류구역은 정상혈류의 경우보다 훨씬 증가함을 알 수 있다.

결론

1. 정상혈류와 박동성혈류의 경우에 좌관상동맥내 속도분포와 압력분포를 비교해 보면 감속시의 속도 및 압력분포가 정상혈류의 경우와 유사한 경향을 나타냄을 알 수 있다.
2. 정상혈류와 박동성혈류의 좌관상동맥내 벽전단응력분포를 비교해보면 박동성혈류의 감속시 전단응력분포는 정상혈류와 유사한 경향을 나타낸다. 그러나 박동성혈류의 감속시에 전단응력의 크기는 정상혈류의 전단응력보다 높게 나타난다.
3. 좌관상동맥내에서 동맥경화가 발생할 수 있는 호발부위는 대각분지쪽 좌관상동맥의 만곡부 외벽과 좌전하행지의 외벽쪽임을 수치계산으로 예측할 수 있고, 이 결과는 혈관조형사진으로 분석한 임상자료와 일치한다.
4. 좌관상동맥내에서 동맥경화의 호발부위에서는 벽전단응력분포는 음의 값을 나타냄을 알 수 있으므로 좌관상동맥내에서 동맥경화발생과 진행의 기전은 수치계산으로 구한 전단응력분포를 이용하여 예측할 수 있다.