

협착이 발생된 복부대동맥 분기부에서의 혈액유동특성

유 상신*, 서 상호, 노 형운, 조 민태

*한국항공대 기계설계학과, 숭실대 기계공학과

Blood Flow Characteristics in the Abdominal Aortic Bifurcation with Stenosis

S.S. Yoo*, S.H. Suh, H.W. Roh, M.T. Jo

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

Dept. of Mech. Eng. Soongsil Univ.

Abstract

The three dimensional, steady flows of blood and blood analogue fluids in the abdominal aortic bifurcation are simulated using the finite volume method. The objective of this investigation is to understand the generation and progression of site-specific atherosclerosis from a hydrodynamic point of view. Due to complexity of blood in conducting experimental study, aqueous polymer solutions are used as the substitutional fluids. For comparison purpose of the flow characteristics of blood and substitutional fluids, rheologically different fluids such as water soluble polymers of Carbopol-934 and Separan AP-273 are employed for the numerical simulation. In order to understand the role of hydrodynamics in the formation and development of atherosclerosis lesions flow velocities, pressures and shear stresses along the vessel are calculated for steady flows

Key words : Blood Flow Characteristics(혈액유동특성), Abdominal Aortic Bifurcation(복부대동맥 분기부), Stenosis(협착), Blood Analogue Fluids(혈액대용유체), Finite Volume Method(유한체적법)

서론

동맥경화는 임상적으로 관상동맥질환, 뇌허혈성 뇌동맥질환, 폐쇄성 말초혈관질환등으로 발현되는 서구사회의 가장 흔한 사망원인인데, 우리나라에서도 이로 인한 유병률이 급속한 증가추세를 보이고 있다⁽¹⁾. 동맥경화는 경동맥분지부(carotid artery bifurcation), 관상동맥분지부(coronary artery bifurcation) 그리고 장골동맥분지부(iliac artery bifurcation)등과 같이 동맥혈관이 분지되거나 만곡되는 곳(curved area of arteries)에서 주로 발생한다^(2,3). 동맥경화가 발생하면 혈관 내피세포의 손상과 함께 평활근(smooth muscle cell)의 증식과 섬유조직의 증가로 인해 혈관 내경이 좁아지면서 동맥혈관을 통하여 혈액의 공급을 받는 장기의 혈류량이 감소함에 따라 심각한 문제가 발생한다. 더욱이 동맥경화로 좁아진 관상동맥혈관내에서는 혈전(thrombus)이 발생하여 심근경색(myocardial infarction)을 초래하기도 한다. 동맥경화증의 발생과 진행기전에 관한 연구는 크게 동맥벽(arterial wall), 혈관계 유체역학(vascular fluid mechanics) 그리고 내피세포(endothelium)에 관한 연구로 구분되어 진행되고 있다⁽²⁾.

인체혈관내 혈액유동에 관한 in vivo 및 in vitro 실험 그리고 수치적 연구는 선진국에서 21세기의 최첨단 과학기술분야의 하나로 선정하여 활발히 연구되고 있는 중이나, 국내에서는 이 분야에 대한 연구가 아직은 미약한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 인체혈관계통에 발병하는 병적원인을 규명하기 위한 기초연구로서 복부대동맥 분기부에서의 혈액과 혈액대용유체의 유동특

성을 구하여 혈액유동으로 인한 협착발생의 기전을 혈류역학적으로 밝히고, 혈류역학적 연구결과를 중재적 치료와 시술에 활용하고자 한다.

복부대동맥 분기부 유동해석

혈액과 혈액대용유체의 겔보기점성계수

혈액의 유변학적 특성을 고찰해 보면 대동맥, 동맥 등과 같이 직경이 비교적 큰 혈관내를 유동할 때 혈액의 점탄성 특성은 거의 무시할 수 있으므로 많은 경우에 혈액은 순수점성비뉴턴유체(purely viscous non-Newtonian fluid)로 취급한다. 그러나, 혈액을 구성하는 혈구의 크기와 거의 동일한 크기의 위수(order of magnitude)로 되어 있는 모세혈관속을 유동할 때는 비뉴턴유체로 취급하는 것보다는, 액체에 입자가 떠있는 뉴턴유체로 취급하여야 한다⁽⁴⁾. 실험으로 측정된 혈액의 점성은 전단율의 영향을 크게 받는다. 전단율의 변화에 따른 혈액과 혈액대용유체로 사용되는 Carbopol-934 1.0 w%수용액과 Separan AP-273 500 wppm 수용액의 겔보기점성계수는 Fig. 1과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 비뉴턴유체의 특성을 갖는 혈액과 혈액대용유체의 겔보기점성계수는 전단율이 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다.

지배방정식과 구성방정식

혈액과 혈액대용유체들의 복부대동맥 분기부내 정상유동을 수치적으로 해석하기 위한 지배방정식을 텐서형으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

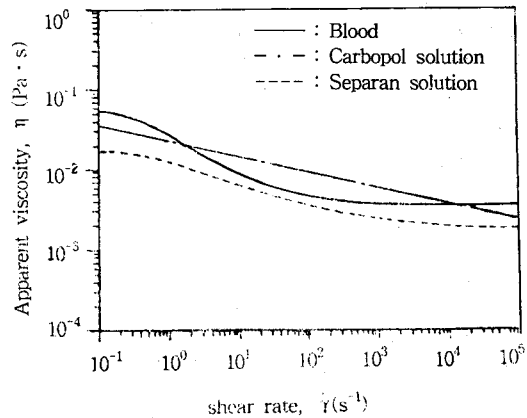


Fig. 1 Apparent viscosity versus shear rate for blood and blood analogue fluids.

식 (1)과 식 (2)는 각각 정상, 비압축성 유동에 대한 연속방정식과 운동량방정식이다. 식 (1)과 식 (2)의 u, p, ρ, τ 는 각각 속도, 정압, 밀도와 전단응력이다. 식 (2)의 전단응력터는 식 (3)과 같이 전단율의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\tau_{ij} = \eta(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (3)$$

본 연구에서는 비뉴턴유체들의 점성계수를 문헌에 보고된 실험치⁽⁶⁾를 곡선점합(curve-fits)한 자료를 근거로 하여 Carbopol 1.0 w% 수용액은 구성방정식 중에서 수정멱법칙모델(modified power-law model)⁽⁶⁾을 적용하고, Separan 500 wppm 수용액과 혈액은 Carreau 모델⁽⁷⁾을 적용하여 겔보기점성계수를 전단율의 함수로 나타내었다. 수치계산에 사용된 혈액 및 혈액대용유체의 유변학적 파라미터들을 Table 1에 나타내었다.

수정멱법칙모델

$$\eta = \begin{cases} m \dot{\gamma}_0^{n-1} & \dot{\gamma} < \dot{\gamma}_0 \\ m \dot{\gamma}^{n-1} & \dot{\gamma} \geq \dot{\gamma}_0 \end{cases} \quad (4)$$

Carreau모델

$$\eta = \eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty)[1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{-\frac{(q-1)}{2}} \quad (5)$$

수정멱법칙모델에 관한 식 중에서 m 과 n 은 비뉴턴유체의 유변학적 성질을 나타내는 상수이고, $\dot{\gamma}_0$ 는 하한컷오프(cut-off) 전단율이다. 또한 식 (5)의 η_0 는 영전단율(zero shear rate)점성계수이고, η_∞ 는 무한전단율(infinite shear rate)점성계수이며, λ 와 q 는 특성시간과 상수이다. 국소전단율이 계산되면 혈액과 혈액대용유체의 겔보기점성계수는 구성방정식 모델로 결정할 수 있다.

Table 1 Rheological properties and density of blood and blood analogue fluids

Properties Fluids	ρ (kg/m ³)	Rheological model	Reological values
Blood	1050	Carreau	$\eta_0 = 0.056 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ $\eta_\infty = 0.00345 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ $\lambda = 3.31 \text{ s}$ $q = 0.357$
Separan AP-273 500 wppm solution	1000.4	Carreau	$\eta_0 = 0.018 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ $\eta_\infty = 0.0016 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ $\lambda = 2.5 \text{ s}$ $q = 0.62$
Carbopol-934 1.0 w% solution	1003.6	Modified power-law	$m = 0.023 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ $n = 0.799$ $\dot{\gamma}_0 = 0.1 \text{ s}^{-1}$

수치해석방법

분기관내 혈액과 혈액대용유체들의 정상유동에 관한 지배방정식을 유한체적법을 이용하여 이산화방정식으로 바꾸었다. 하이브리드 차분법(hybrid differencing scheme)⁽⁸⁾을 사용하여 지배미분방정식의 대류항을 처리하였고, 압력항은 연속방정식에 있는 간접적인 정보를 압력계산을 위한 직접적인 알고리즘으로 변환시키는 SIMPLE-C⁽⁹⁾압력수정법을 적용하였다. 이산화방정식의 해를 구하기 위해 STONE⁽¹⁰⁾반복법을 이용하였다. 분기관내 유동문제를 해석하기 위한 출구경계조건은 압력경계조건을 적용하였고, 혈액과 혈액대용유체의 겔보기점성계수를 계산하기 위하여 사용자 서브루틴을 FORTRAN으로 작성하여 CFD3-FLow3D와 연계시켰다. 수렴조건은 상대오차가 1×10^{-6} 이 되도록 하였다. 계산에 사용된 컴퓨터 기종은 SUN SPARCstation 20이다.

복부대동맥 분기부 모델

복부대동맥 분기부를 Fig. 2와 같이 이상화하였다. 이때, 복부대동맥의 직경 D_1 와 하류분기관의 직경 D_{b1} 과 D_{b2} 는 같게 하였다. 분기각은 θ 와 ϕ 가 30°로 동일하고, $D_1 = 2 \text{ cm}$ 이다. 참고문헌[11]에 의하면 분기부 부근에서 유동방향이 갑자기 바뀔 때 라 유동방향의 내벽쪽으로 원심력이 작용하여 내벽쪽의 속도는 빨라지고 외벽쪽으로는 협착현상이 일어나는 원인의 하나가 되는 재순환영역이 형성된다고 보고하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 이 결과를 토대로 협착부의 형상을 식 (4)와 같은 코사인곡선으로 표현하여 Fig. 2에 나타내었다.

$$R(t) = \frac{D_{b1}}{2} - \frac{t}{2} [1 + \cos(\frac{\pi t}{L/2})] \quad (4)$$

이때, t 와 L 은 각각 협착부의 높이와 길이로서 $t = 0.375 D_{b1}$, $L = 1.5 D_{b1}$ 이다.

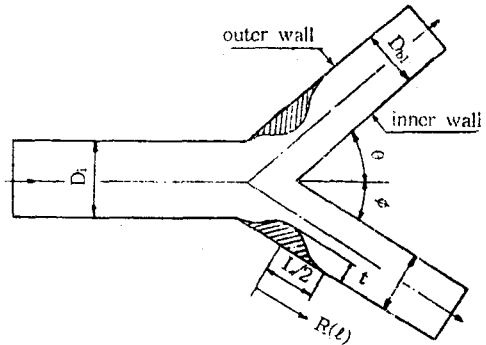


Fig. 2 Idealized geometric configuration of the abdominal aortic bifurcation model

결과 및 검토

협착이 없는 분기부내 혈액유동특성

Fig. 2와 같이 협착이 없는 복부대동맥 분기부에서 분기각이 30°이고, 질량유량이 동일할 때 혈액과 혈액대용유체인 Separan 수용액 그리고 Carbopol 수용액의 분기관내 유동을 수치계산하여 서로 비교하였다. 계산결과인 중심선상의 무차원속도와 압력변화를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 그림의 B.P.는 분기점(Bifurcation Point)을 나타내며, U_m 과 Δp 는 각각 복부대동맥의 평균속도와 중심선상의 두 점사이의 정압차이다. 복부대동맥에서는 중심선상의 속도가 일정한 상태로 진행되다가 분기부를 지나면서 유동이 양분됨에 따라 중심선상의 속도는 급격히 감소한 뒤 곧 완전히 발달된 유동이 된다. 유변학적 특성이 다른 비뉴턴 유체들의 유동특성을 비교해 보면 복부대동맥에서 Carbopol 수용액, Separan 수용액 그리고 혈액의 순으로 중심선상의 속도가 높게 나타난다. 그 이유는 혈액의 반경방향의 속도분포가 Separan 수용액이나 Carbopol 수용액보다 평탄하기 때문이다. 분기관 하류에서의 속도분포는 복부대동맥의 경우와 동일한 경향을 나타낸다. 혈액유동의 압력손실은 Carbopol 수용액과는 큰 차이가 없지만, Separan 수용액의 압력강하가 혈액이나 Carbopol 수용액보다 작아진다. 이는 Separan 수용액의 겔보기점성계수가 혈액이나 Carbopol 수용액의 값보다 작기 때문이다. 또한, 분기점(B.P.) 부근에서는 분기점을 지난 후 Separan 수용액의 중심선속도가 가장 낮게 떨어졌다가 하류분기관에서 회복되고, Carbopol 수용액도 이와 비슷한 경향을 나타낸다. 분기점의 위치가 관의 단면적이 확장되는 부위에 있으므로 중심선속도

협착이 발생된 복부대동맥 분기부에서의 혈액유동특성

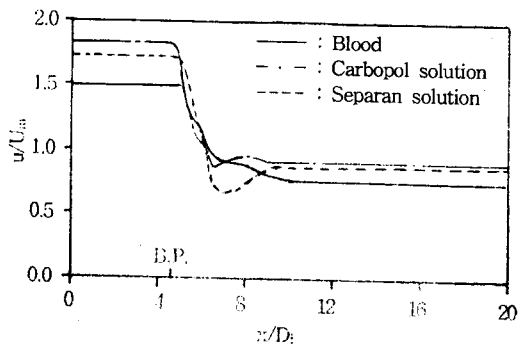


Fig. 3 Centerline velocity variations for blood and blood analogue fluids in the aortic bifurcation model

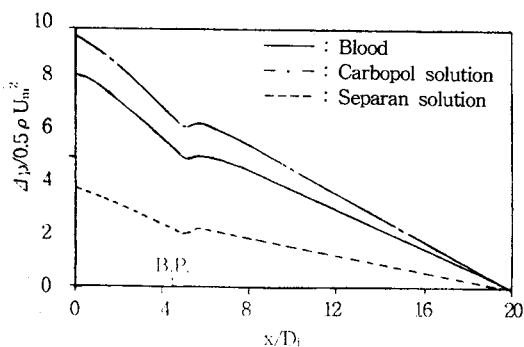


Fig. 4 Pressure variations for blood and blood analogue fluids in the aortic bifurcation model

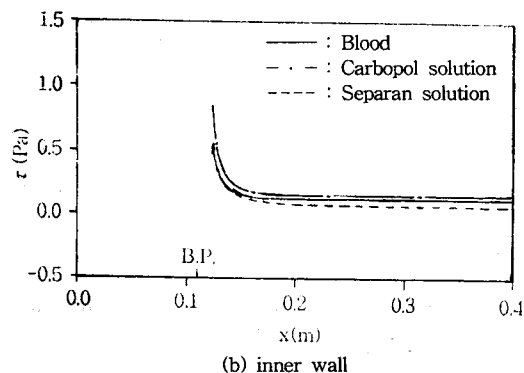
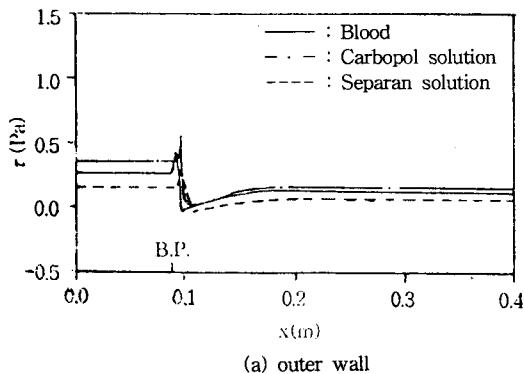


Fig. 5 Shear stress along the inner and outer wall for blood and blood analogue fluids in the aortic bifurcation model

는 감소한다. 속도가 감소함에 따라 압력은 잠시 회복되고 있다. 그러나 혈액의 경우는 중심선속도가 급격히 감소하는 것 같으나 하류분기관의 속도보다 작게 감소하지는 않는다. 이러한 현상은

혈액이 비뉴턴유체의 특성이 크기 때문에 단면이 급격히 확대되어도 그 영향을 적게 받는 것으로 볼 수 있다.

입구유동조건이 완전히 발달된 유동이고, 질량유량이 동일할 때 분기관의 외벽과 내벽을 따르는 전단응력분포를 각각 Fig. 5의 (a)와 (b)에 나타내었다. 상류주관의 벽면을 따른 전단응력분포는 일정하게 나타나다가 유동방향이 갑자기 바뀔 때 따라 전단응력이 갑자기 증가된 뒤, 재순환영역이 형성되는 분기관 외벽쪽의 전단응력분포는 감소하다가 분기관 하류의 벽면에서 다시 일정해진다. 그러나, 분기관의 내벽쪽 전단응력분포는 외벽쪽의 경우보다 높게 나타나는데 이것은 분기관 내벽쪽으로 원심력이 작용하여 전단율이 커지는 현상으로 설명할 수 있다. 분기관입구의 내벽으로부터 경계층이 형성되어 속도구배가 감소함에 따라, 내벽쪽의 전단응력의 값은 감소하게 된다. 또한, 분기관 하류로 유동이 진행하면서 내벽과 외벽의 전단응력의 값은 같이진다. 하류 분기관의 벽면전단응력의 값이 상류주관의 경우보다 작은 것은 유동속도가 감소하면서 전단율이 감소하기 때문이다. 유변학적 특성이 다른 비뉴턴유체들의 분기관내 벽면전단응력분포는 동일한 경향을 나타내지만, 벽면전단응력은 겔보기점성계수값의 크기에 따라 Carbopol 수용액, 혈액 그리고 Separan 수용액의 순으로 크게 나타난다.

협착이 발생된 분기부내 혈액유동특성

Fig. 2에 나타낸 바와 같은 협착이 분기부에 발생하였을 때 혈액과 혈액대용유체의 분기부내 속도와 압력변화를 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. 협착이 있을 때는 협착이 없는 복부대동맥 분기부유동과는 속도변화가 다르게 나타난다. 협착부의 상류와 하류에서의 거동은 협착이 발생하지 않은 분기부의 경우와 같다. 협착이 발생하면 유동단면적이 줄어들게 되어 협착이 발생되기 전보다 속도가 높게 나타난다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 협착이 발생된 분기관의 압력강하는 협착이 발생하기 전보다 크게 나타

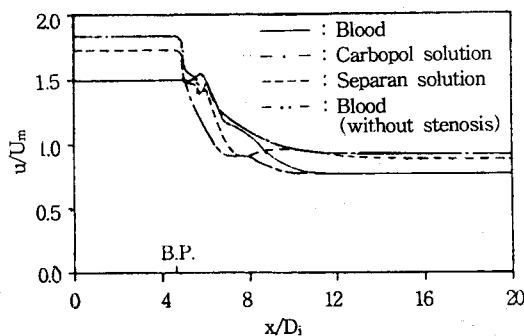


Fig. 6 Centerline velocity variations for blood and blood analogue fluids in the abdominal aortic bifurcation with stenosis

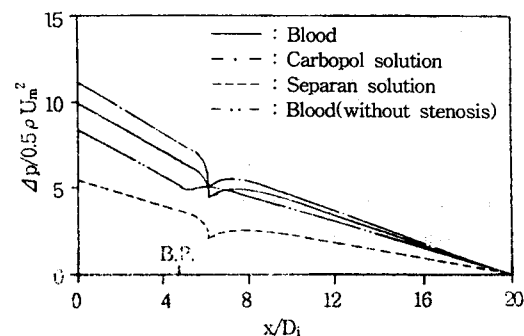


Fig. 7 Pressure variations for blood and blood analogue fluids in the abdominal aortic bifurcation with stenosis

난다. 유동이 분기가 되는 지점에서 협착이 발생한 분기관이 협착이 없는 분기관보다 압력이 낮아지는 것을 볼 수 있는데, 이는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 협착부위에서 속도가 크게 증가하기 때문이다. 또한 협착되기 전보다 속도가 급하게 감소하므로 압력 회복이 크게 나타난다. Fig. 8은 협착이 발생한 분기관과 협착이 없는 분기관의 벽면전단응력을 비교하여 나타낸 그림이다. 전단응력의 분포 역시 Fig. 6의 속도분포와 같이 상류주관과 분기부 하류에서 유동이 완전 발달한 영역이 되므로 협착이 없는 경우와 같은 경향을 나타낸다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 전단응력이 음의 값을 갖는 부분이 나타난다. 즉, 역압력구배에 의한 재순환영역이 협착이 없는 분기관의 경우보다 커진다. 또한, 재순환영역에서의 전단응력은 협착부가 없는 분기관보다 더 큰 음의 값을 갖는다. 이는 협착이 발생한 후에도 연속적으로 협착이 진행될 수 있음을 의미한다. 협착된 후의 외벽에서의 최대전단응력은 협착이 없는 분기관의 경우보다 크게 나타난다. 따라서 협착부가 분기관에 발생하면 전단응력이 외벽과 내벽에서 모두 크게 상승하게 되어 지속적으로 주기적인 협착부가 생성될 수 있음을 알 수 있다. 내벽보다 외벽에서 전단응력이 훨씬 크게 상승하므로 인체혈관에서는 내벽에 큰 손상이 예상될 수 있음을 유추할 수 있다. 협착이 발생한 복부대동맥 분기부내 혈액과 혈액대용유체인 Carbopol 수용액과 Separan 수용액의 유동특성은 협착이 없는 경우와 경향이 동일하게 나타난다. 분기부내 전단응력분포는 Carbopol 수용액, 혈액, 그리고 Separan 수용액의 순으로 크게 나타난다.

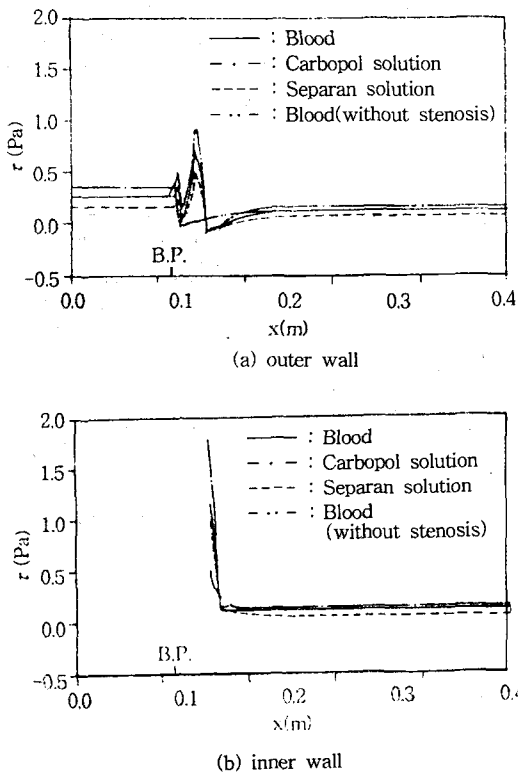


Fig. 8 Shear stress along the inner and outer wall for blood and blood analogue fluids in the abdominal aortic bifurcation with stenosis

결론

1. 협착이 발생한 분기관에 혈액이 유동할 때 협착부 상류와 하류에서의 속도분포는 협착이 없는 분기관의 속도분포와

동일하다. 협착부위에서는 유동단면적이 감소하게 되어 협착이 없는 분기부에서 보다 속도가 높게 나타난다.

2. 혈액유동에서 분기관내에 협착이 발생되면 협착부 하류쪽에 유동박리구역이 커지면서 협착이 없는 분기관의 경우보다 압력손실이 증가한다. 또한 협착이 있는 분기관의 전단응력은 협착이 없는 경우보다 증가한다.
3. 혈액대용유체들의 분기관내 벽면전단응력분포는 혈액과 동일한 경향을 나타내는데, 겔보기점성계수의 크기에 따라 전단응력값은 Carbopol 수용액, 혈액 그리고 Separan 수용액의 순으로 크게 나타난다.

참고문헌

- (1) 홍석근, 1993, "Mechanical Factors in the Pathogenesis, Localization and Evolution Atherosclerosis", Workshop on Biomedical Fluid Dynamics, AFERC, POSTECH, pp. 21~22.
- (2) Nerem, R. M., 1992, "Vascular Fluid Mechanics, the Arterial Wall, and Atherosclerosis", J. of Biomechanical Eng., Vol. 114, pp. 274~282.
- (3) Cheitlin, M. D., Sokolow, M. and McIlroy, M. B., 1993, Clinical Cardiology, Prentice-Hall Int. Inc., 6th ed.
- (4) 유상신, 서상호, 장남일, 1994, "혈액의 구성방정식에 관한 연구", 한국유변학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 44~48.
- (5) Pak, B., Cho, Y. I. and Choi, S. U. S., 1990, "Separation and Reattachment of Non-Newtonian Fluid Flows in a Sudden Expansion Pipe", J. of Non-Newtonian Fluid Mech., Vol. 37, pp. 175~199.
- (6) 서상호, 유상신, 1993, "떡법칙 비뉴턴유체의 협착관내 유동장해석", 공기조화·냉동공학 하계학술발표회 논문집, pp. 49~54.
- (7) Carreau, P. J., 1968, Ph. D. Thesis, Univ. of Wisconsin, Madison.
- (8) Spalding, D. B., 1972, "A Novel Finite Difference Formulation for Differential Expressions Involving Both First and Second Derivatives", Int. J. Num. Meth. Eng., Vol. 4, pp. 551~559.
- (9) Jang, D. S., Jetli, R. and Acharya, S., 1986, "Comparison of the PISO, SIMPLER, and SIMPLEC Algorithms for Treatment of the Pressure-Velocity Coupling in Steady Flow Problems", Numerical Heat Transfer, Vol. 10, pp. 209~228.
- (10) Stone, H. L., 1968, "Iterative Solution of Implicit Approximations of Multidimensional Partial Differential Equations", SIAM. J. Numer. Anat., Vol 5, No. 3, pp. 530~558.
- (11) 서상호, 노형운, 유상신, 1994, "협착이 발생한 분기관내 비뉴턴유체의 유동특성", 공기조화·냉동공학 하계학술발표회 논문집, pp. 233~237.