

맥동유동시 탄성혈관의 운동특성

노형운* · 김재수* · 박길문** · 서상호***

1. 서 론

2001년 통계청 자료에 의하면 2000년 한국인 전체 사망원인중 순환기 질환에 의한 사망률은 36.5%인 것으로 발표되어 있다. 순환기질환은 주로 동맥경화로 인한 협착현상으로 알려져 있고, 동맥경화증의 발생원인은 아직 명확하게 밝혀져 있지 않으나, 현재까지 발표된 연구결과들을 종합해 보면 동맥경화성 죽종형성은 혈류의 속도, 전단응력, 전단응력구배, 유동박리와 난류, 혈관벽의 컴플라이언스(compliance) 변화 등에 따라 영향을 받는 것으로 알려져 있다^(1, 2).

탄성혈관과 관련된 기존의 연구동향을 살펴보면, 국내에서도 최근 주목할만한 내용들이 발표되고 있다. 최 등⁽⁶⁾의 연구에 의하면 속도나 압력파형의 변화에 대한 임피던스를 동맥경화증의 원인으로 연관시켰다. 또한 Kim 등⁽⁷⁾은 CFD방법을 이용하여 혈관내 혈류에 의해서 발생하는 벽면전단응력을 유동장해석과 동시에 혈관의 응력변화로 해석하려는 연구를 수행중이다. 그러나, 동맥경화증과 같은 질병과 관련된 실험성 있는 연구들을 수행하기 위해서는 혈관벽이 심장의 운동에 따라 움직이는 탄성성질을 가지고 있다는 사실과 혈액 유동은 맥동성 유동임을 고려하여만 하고 반드시 3차원 유동해석을 수행해야 한다.

본 연구에서는 혈관의 탄성을 고려할 때 혈류의 특성을 해석하기 위하여 혈관을 탄성체로 가정하고 입구와 출구파형이 사인파형과 맥동유동일 때, 입구와 출구의 압력차가 압력손실에 의하여 차이가 날 때, 각각 위상차를 15°, 30°, 45°로 바꿈으로써 위상차에 대한 혈액유동의 특성을 해석하였다. 또한, 맥동유동과 박동유동하에서 탄성혈관내 벽면전단응력의 변화를 뉴턴유체와 비뉴턴유체인 혈액유동과 벽면전단응력변화와의 상

관관계 및 탄성혈관내 위상차가 혈액유동특성에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 지배방정식

탄성혈관내 혈액유동특성을 수치적인 방법으로 해석하기 위한 지배방정식은 비정상, 비압축성 유동에 적용되는 다음 식을 사용하였다.

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

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \eta \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (2)$$

윗 식에서 ρ , u_i , p , η 는 각각 밀도, 속도벡터, 압력, 그리고 겔보기점성계수(apparent viscosity)이다. 이때 혈액대용유체의 점성계수는 혈액의 무한전단율점성계수인 0.00345Pa·s로 정하였고 혈액은 Bird-Carreau 방정식을 이용하여 모델링하였다. 탄성 혈관내 혈액유동특성의 지배방정식을 해석하기 위하여 CFX 4.4를 이용하였다.

3. 맥동유동의 해석

혈액유동은 심장의 수축 및 이완작용으로 인해 주기성을 갖는 매우 불규칙한 맥동유동특성을 나타낸다. 혈류역학적 특성을 이해하기 위해서는 정확한 맥동유동의 파형을 적용하여야 하지만 본 연구에서는 탄성혈관의 문제를 풀기 위하여 사인파형을 기본파형으로 하는 맥동파형과 박동파형을 적용하였다.

4. 결과 및 검토

혈액유동은 심장의 수축 및 이완작용으로 인해 주기성분 연구에서는 혈관을 탄성체로 가정하였고, 탄성체 혈관의 입구와 출구에서 압력손실에 따른 진폭의

* 조선대학교 항공조선공학부

** 조선대학교 기계공학부

*** 숭실대학교 기계공학과

차와 위상차에 따른 뉴턴유체와 비뉴턴유체인 혈액의 맥동유동특성을 연구하였다. Fig. 1과 같이 위상차가 45°일 때의 혈액과 뉴턴유체의 시간에 따른 속도파형을 비교하여 나타내었다.

선행연구의 결과와 같이 강관인 경우에는 벽면의 운동이 없기 때문에 동일한 압력차에도 Fig. 1에서 보여진 최대속도의 값보다 약 1/5정도 작음을 알 수 있다. 따라서, 탄성혈관은 동일한 압력으로 강체관보다 더 많은 혈류량을 보낼 수 있도록 설계되어 있음을 확인할 수 있다. Fig. 2는 탄성혈관의 경우 입구와 출구에서 압력손실에 따른 진폭의 차와 압력 위상차가 벽면 전단응력에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 혈액의 길이방향 벽면전단응력을 시간에 따라 나타내었다.

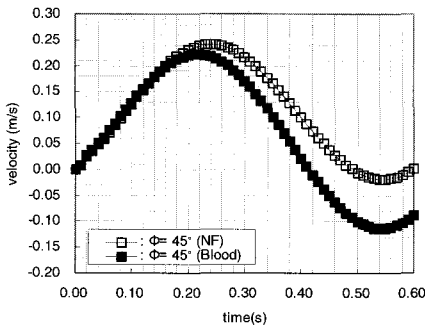


Fig. 1 Velocity variations in the elastic vessel for the Newtonian fluid and Blood with 45 degree

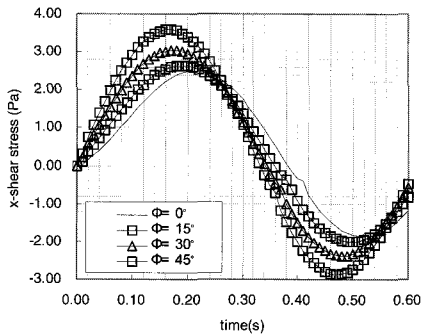


Fig. 2 Variations of wall shear stress along the elastic vessel axis for and Blood with different phase angle

Table 1 Amplitude index and phase angle lag

	$\phi = 0^\circ$		$\phi = 15^\circ$		$\phi = 30^\circ$		$\phi = 45^\circ$	
	$\Delta\phi$	I_{amp}	$\Delta\phi$	I_{amp}	$\Delta\phi$	I_{amp}	$\Delta\phi$	I_{amp}
NF	0°	1	-18°	5.93%	-24°	22.55%	-30°	45.41%
Blood	0°	1	-12°	2.16%	-24°	24.22%	-30°	47.94%

이때 적용된 위상차는 0°, 15°, 30°와 45°이다. Fig. 2에서 보듯이 위상차가 증가함에 따라 벽면전단응력의 값이 증가된다. 위상차 증가에 따른 변면전단응력의 변화를 파악하기 위하여 Table 1에 진폭지수와 위상 지연 값을 구하여 정리하였다. Table 1에서 보듯이 탄성혈관 중간지점에서 진폭지수 값을 살펴보면, 위상차가 증가하면 벽면전단응력의 진폭이 점점 더 증가하고 있고, 위상지연의 값이 음의 값을 가지므로 최대 전단응력값이 발생하는 시기가 빨라지고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 강체혈관보다도 10%이상 큰 전단응력 진폭을 가지고 있으므로 혈관의 팽창이 그 원인으로 판단된다.

5. 결론

탄성혈관의 운동을 고려하는 모델을 적용하여 혈관 내의 3차원 맥동유동을 수치해석하였다. 혈관의 팽창 및 수축으로 인한 혈관벽의 운동은 강체관보다 혈관내 속도분포를 크게 하고 이는 동일한 압력으로 강체혈관보다 더 많은 혈류량을 보낼 수 있다. 또한 혈관벽의 운동은 강체혈관보다도 10%이상의 큰 전단응력분포를 발생시킨다. 또한, 혈액인 경우 벽면에 미치는 전단응력분포가 전체적으로 뉴턴유체의 경우보다 4~5배정도 큼을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 2001년도 두뇌한국 21사업에 의하여 지원되었음

참고 문헌

- (1) C.H. Kwon, Y.H.Kim "Fluid-structure Interaction in the Axisymmetric Abdominal Aortic Aneurysm By Pulsatile Flow "J Biomed Eng Res, Vol. 22, No. 1, pp.59-68, 2001
- (2) Nichols, W. W. and O'Rourke, M. F., 1990, McDonald's Blood Flow in Arteries, 3rd ed., Lea & Febiger, Philadelphia.
- (3) 노형운, 서상호, 유상신, 1999, "맥동유동시 탄성혈관의 운동이 벽면전단응력분포에 미치는 영향", 대한기계학회 추계학술대회, pp.179-182.