

혈관내 맥동유동의 FSI 모사

김윤기* · 김경천†

FSI simulation of pulsatile flow in the blood vessel

Yun Gi Kim, Kyung Chun Kim

Key Words : Fluid Structure Interaction(유동구조연성해석), Elastic Blood Vessels(탄성혈관), Pulsatile Flow(맥동유동)

Abstract

Characteristics of pulsatile flow in 3-dimensional elastic vessel wall should be investigated in order to understand the physiological blood flow in human body. In this study, the modelling of the physiological blood flow in the elastic blood vessel is proposed. Variation of the pressure and the velocity waveforms are obtained using the FSI method

기호설명

p : 정압(Pa)
u : 속도(m/s)
D : 입구직경(m)
 ρ : 밀도(kg/m³)
 ν : 동점성계수(Pa·s)

1. 서론

순환계는 심장, 동맥, 정맥 및 모세혈관으로 이루어져 있다. 심장은 시스템에 있어서 펌프에 해당하며 동맥 및 정맥은 혈액의 이동통로, 모세혈관은 혈액과 조직과의 산소, 영양분, 노폐물 등을 교환하는 역할을 수행한다. 혈류의 유동은 혈관계 질환의 발생과 진행에 영향을 미치며, 인공장기나 의료기기에 영향을 미치므로 이에 대한 많은 연구가 진행되어져 왔다.

혈류의 유동이 영향을 미친다고 알려져 있는 혈관계 질환은 동맥경화, 동맥류, 내막거식증등이

있다.

이러한 혈관계질환은 혈류의 속도, 전단응력, 혈관벽의 컴플라이언스 (compliance)의 변화등과 밀접한 관계를 가진다. 기존의 연구동향은 주로 혈액 유동해석과 혈액의 유변학적 성질에 대한 연구가 일반적이다. 혈류역학적 연구를 실제 임상연구와 연관시키기 위해서는 혈관벽이 강체벽이 아닌 탄성을 가지는 탄성체임을 고려해야만 한다. 기존의 연구로서는 노¹⁾등은 혈관벽을 수학적으로 모델링하여 맥동유동을 분석하였다.

본 연구에서는 CFX/ANSYS 코드를 이용한 유동/구조연성해석(Fluid Structure Interaction) 통해 혈관유동을 해석해 보고 이를 기존연구의 결과와 비교함을 통해 혈관유동의 특성을 고찰하였다.

2. 지배방정식

탄성혈관내 혈액유동 해석에 있어 유동은 비정상, 비압축성으로 가정하였으며 지배방정식은 연속방정식, 운동량방정식, 재료방정식을 사용하였다.

† 회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : kckim@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-3947 FAX : (051)516-3910

* 부산대학교 기계공학과

연속 방정식과 운동량 방정식은 유체유동과 관련되어 있으며 식(1), 식(2)과 같이 나타낸다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \times U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (2)$$

고체부분의 변형과 관계된 재료방정식은 식(3)과 같이 나타낼 수 있으며 식(4)~ 식(6)으로 풀어쓸 수 있다.

$$\sigma_{ij,j} + f_i = \rho u_{i,tt} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial x_3} + f_1 = \rho \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \sigma_{21}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{23}}{\partial x_3} + f_2 = \rho \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \sigma_{31}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{32}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial x_3} + f_3 = \rho \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} \quad (6)$$

3. 맥동유동의 해석

탄성혈관내 혈액의 맥동유동을 모델링하기 위해 원형혈관을 사용하였다. 이때 사용된 혈관의 지름은 1cm 이고 두께는 0.55mm 이며 길이는 직경의 10 배이다. 혈관벽의 체적탄성계수는 $E=5.0 \times 10^5$ Pa, 푸아송비는 0.3 을 적용하였다.¹⁾

혈액유동은 심장의 수축 및 확장작용으로 인해 주기성을 갖는 매우 불규칙한 과형의 박동유동을 갖는다. 혈류학적 특성을 이해하기 위해서 정확한 박동유동의 속도과형을 적용하여야 하지만 본 연구에서는 탄성혈관의 문제를 풀기 위하여 사인과형을 기본과형을 적용하였다. 탄성혈관내 혈액의 맥동성 유동에 관한 연구를 수행하기 위해 점성계수는 혈액의 무한전단율 점성계수와 같은 값을 적용하였다. 이때 혈액대용유체의 점성계수는 혈액의 무한전단율점성계수인 $0.00345(\text{Pa} \cdot \text{s})$ 로 정하였다.

4. 결과 및 검토

혈류역학에 관한 기본적인 해석을 위해 같은 압력조건일때의 탄성계수와 최대변형량과 최대응력이 관계를 Fig. 1 에 나타내었다. 탄성계수가 작아지면 최대변형량과 최대 응력은 증가하지만 선형적인 관계는 아님을 알 수 있다.

Fig. 2, Fig. 3 은 탄성변형이 지속되고 있는 두 주기동안의 압력과 변위, 그리고 속도의 상관관계를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 변위는 압력의 변화에 민감하게 잘 따라가면서 위상차가 거의 없는 것으로 나타났고 속도는 어느정도의 시간지연이 일어남을 관찰할 수 있었다. 인가압력이 500[Pa]일 때 최대 변위는 0.045mm 정도로 그 변화가 미미하였으나 속도는 최대 5.7m/s 정도로 높은 값을 가졌으나 그 변동량은 약 0.1m/s 미만이었다.

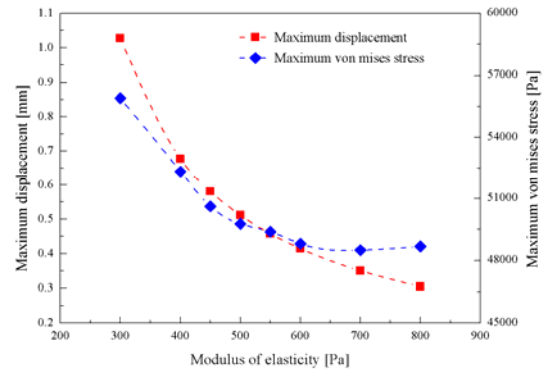


Fig. 1 Variation of Max. displacement and Max. von mises stress according to Modulus of elasticity

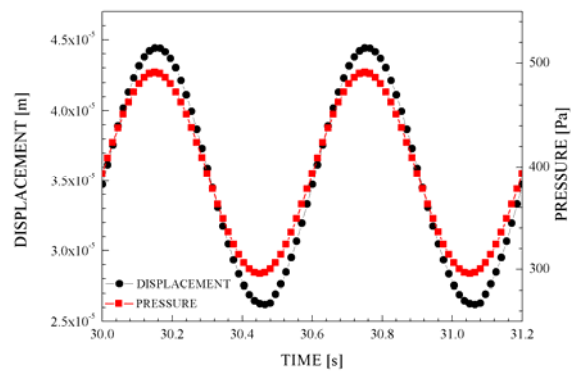


Fig. 2 Time variation of pressure and displacement

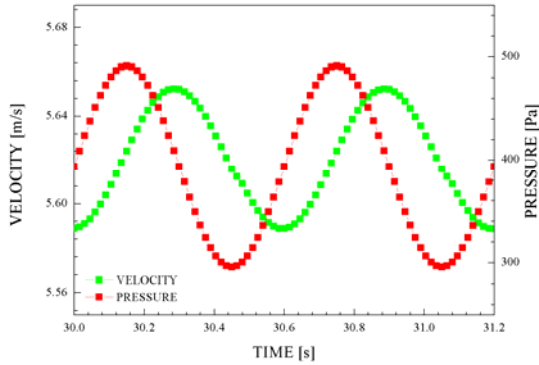


Fig. 3 Variation of pressure and velocity

5. 결론

ANSYS/CFX 를 이용하여 혈액유동에 대한 FSI (Fluid Structure Interaction) 해석을 성공적으로 수행하였으며 그 결과로 얻은 결론은 다음과 같다. 혈관의 팽창 및 수축으로 인한 혈관벽의 운동은 맥동유동의 유동속도 변화 보다 영향이 크게 받으며 이는 압력의 변화에 따른 혈관의 특성변화를 잘 나타내준다. 그리고 비록 미미한 압력변화를 가지지만 한번의 박동으로 큰 순간속도가 나옴을 계산을 통해 확인하였다.

후 기

5.1 본 연구는 한국보건산업진흥원 보건의료기술연구개발사업(CIBST)에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 노형운, 서상호, 유상신, 1999, “탄성혈관내 맥동유동의 모델링”, 대한기계학회 1999 년도 춘계학술대회 논문집, pp. 397-400
- (2) 서보성, 이우식, 2006, “인간혈관계 유동해석에 관한 연구”, 2006 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 384-388
- (3) 노형운, 서상호, 유상신, “입자영상유속계를 이용한 혈관내피세포 모형주위의 유동가시화”, 대한기계학회 2000 년도 추계학술대회 논문집 B, pp. 381-384