동맥경화반 점탄성 특성이 혈관 내경변화에 미치는 영향

노태헌 · 이계한*

Effects of viscoelastic properties of atherosclerotic plaque on lumen diameter variation

Tae Heon Noh, Kyehan Rhee

Abstract : Viscoelastic properties of plaque wall tissues provide important tissue characteristics related to tissue composition and pathological process. Because viscoelastic wall properties changed as plaque progressed, estimation of wall viscoelastiy can provide a valuable assessment tool for plaque rupture prediction. Motivated by the hypothesis that wall viscoelastic property is related with plaque progression, effect of plaque wall viscoelastic characteristics on lumen diameter variations is studied. Luminal diameter changes of an idealized coronary artery model under a pulsatile pressure loading were analyzed using finite element method for different plaque viscoelastic properties, and effects of viscoelastic parameters of the plaque on luminal diameter variations were explored.

1. 서 론

혈관벽은 내피세포, 평활근 세포, 콜라겐과 일라스틴으로 구성된 연결조직으로 구성되어 있어, 점탄성의 특성을 갖는다. 동맥경화의 진행에 따라 혈관벽의 형상과 조직의 구성이 변화하여 역학적 물성이 변화하는데, 이 물성의 변화는 동맥경화의 진행과 파열을 예측할 수 있는 중요한 인자이다. 최근 혈관내 초음파(IVUS)를 이용하여 혈관벽의 구조를 영상화 할 수 있는 기술이 개발되어, 혈관 단면의 구조를 진단할 수 있게 되었다. 그러나 IVUS는 혈관벽의 구조적 특성을 알려줄 수 있으나 물리적 특성을 정확하게 예측할 수 없다.

맥동하는 혈압에 의한 혈관 내경의 시간에 따른 변화는 혈관 조직의 물리적 특성의 변화를 반영하므로, 혈관 내경의 변화를 이용하여 혈관벽의 점탄성 특성의 변화를 평가하여 동맥경화반의 진행과 파열을 예측하는데 도움을 줄 수 있다. 본 연구에서는 동맥경화반 모델의 점탄성 특성의 변화에 따른 혈관 내경 변화를 유한요소해석을 통하여 계산하여, 이를 동맥경화의 진단에 활용하고자 한다.

* 명지대학교 기계공학과

2. 본 론

혈관 협착부 모델은 혈관 영상으로 얻은 혈관 형상을 기반으로 이상화된 관상동맥 협착부의 2 차원 형상을 사용하였다[1]. 단면은 외경이 4.1 mm 인 혈관에 내경이 1.25 mm 인 원형의 내강이 혈관 하단부 0.8 mm위에 있고, 내경 상단에 두께가 0.5 mm 인 섬유조직 (fibrous cap, FC)이 있고 그 위에 두께가 0.75 mm 인 동맥경화반 지질층 (lipid core, LC)가 내강 중심에서 60° 정도 방사형으로 분포한 모양으로 구성되었다. 이 모델은 혈관벽, LC, FC의 3개의 surface body로 구성되어 있는 모델과 혈관벽과 LC로만 구성되어있는 모델로 모델링하였다. LC는 탄성계수 1 kPa, 푸아송비 0.49로 고정하고 혈관벽과 FC에는 건강한 혈관일 때는 탄성계수 260 kPa, 점성계수 3 kPa • s인 Voigt 점탄성 모델을 사용하였다[2]. 혈관이 plaque로 변해가면서 점성을 잃은 모델은 탄성계수와 푸아송비를 E_r=100 kPa, $E_z=E_\theta$=1000 kPa, $V_{r\theta}=V_{rz}$=0.01, $V_{\theta z}$=0.27, $G_{rz}=G_{r\theta}=G_{z\theta}$=500 kPa 로 구성하고 0.001 초, 0.01 초, 0.1 초, 1 초, 10 초의 이완 시상수와 상대 탄성계수 0.1595, 0.1177, 0.0623, 0.1612, 0.2101을 갖는 프로니 급수로 구성하였다[3]. 혈관이 점성을 모두 잃은 탄성 모델은 점성을 조금 잃은 모델의 탄성계수와 푸아

송비만으로 구성하였다. 해석은 ANSYS (ANSYS Inc. Cannonsburg, PA) workbench를 이용하여 9966개의 삼각형 요소로 구성하였다. 혈관 외벽을 완전 구속하였고 최대압력이 17 kPa인 주기가 1 s인 파형을 인가하였다. 건강한 혈관(normal vessel, NV), FC부분에서 점성을 일부 잃은 혈관(less viscoelastic cap, LVC), FC부분이 완전히 점성을 잃은 혈관(elastic cap, EC), 혈관전체가 점성을 일부 잃은 모델(less viscoelastic vessel, LVV) 그리고 혈관전체가 점성을 완전히 잃은 모델(elastic vessel, EV) 이상 다섯 종류의 모델을 해석하여 내강 윗부분의 변위와 등가응력을 관찰하였다.

NV에서 혈관이 병들어 EV가 되기까지 2가지 과정을 가정하여 해석하였다. 하나는 NV에서 LVC가 되었다가 EC가 된 후 EV가 되는 과정이고 다른 하나는 NV에서 LVV가 되었다가 EV가 되는 과정이다. 두 과정 모두 점탄성 성질을 잃어갈수록 혈관 내강의 변형이 0.13 mm에서 0.063 mm로 줄어들었고 응력은 12.24 kPa에서 22.47 kPa 로 증가하였다. 또한 압력파형과 변위의 파형의 peak값의 위상차가 0.05 s 에서 0 s 로 점점 줄어드는 것을 확인하였다.

3. 결 론

동맥경화 진행에 의한 혈관의 점탄성 변화가 혈관의 내경변화, 등가응력 그리고 위상차에 미치는 영향을 유한요소로 해석하였다. 혈관이 plaque로 변화하면서 생기는 혈관 점탄성 특성의 감소에 의해 혈관 벽 변위 및 압력과의 위상차가 감소하였다. 따라서 혈관 벽 변위의 동적 특성을 측정하여 혈관벽의 물리적 특성 변화 예측이 가능하리라 예상된다.

후 기

본 연구는 한구연구재단 (NRF-2014 R1A2A1A110 51357)의 지원으로 수행 되었습니다.

참고 문헌

(1) Akyldiz AC et al, 2011, “Effects of intima stiffness and plaque morphology on peak cap stress”, Biomed Eng online, 10; 25

(2) Warriner RK et al, 2008, “A viscoelastic model of arterial wall motion in pulsatile flow: implications Doppler ultrasound clutter assessment, Physiol Measure 29, 157-179

(3) Zareh M et al, “Are two dimensional images sufficient to assess the atherosclerotic plaque vulnerability: a viscoelastic and anisotropic finite element model,” Cardiovasc System, 3:3

Fig. 1 Geometry of idealized model

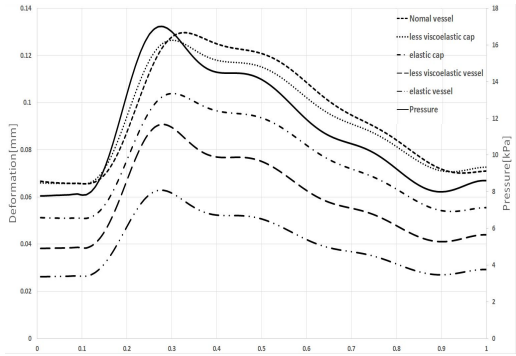

Fig. 2 Pressure and maximum displacement waveform for different viscoelastic properties

	NV	LVC	EC	LVV	EV
δ_{top}	0.130 mm	0.126 mm	0.104 mm	0.091 mm	0.063 mm
σ_{top}	12.24 kPa	14.04 kPa	17.08 kPa	20.43 kPa	22.47 kPa
Δt_{top}	0.05 s	0.02	0.02 s	0.004s	0 s
$\Delta \Phi_{top}$	18°	7.3°	7.3°	1.46°	0°

Table. 1 Maximum equivalent stress, displacement and phase lag for different viscoelastic properties