

동맥경화성 죽상반의 발생후 혈관의 보상적 재형성

조민태* · 서상호** · 이병권*** · 권혁문****

1. 서 론

점진적으로 진행되는 동맥경화의 초기단계에서 동맥혈관내경의 협착에 대한 보상으로 혈관벽이 확장되어 협착으로 인한 혈액유동을 정상화하려는 보상기전(compensatory mechanism)이 발생한다고 발표되고 있다⁽¹⁻³⁾.

본 연구에서는 협착이 발생된 관상동맥에 보상적 재형성이 이루어졌을 때 혈류역학적 특성과 동맥경화증의 진행과의 관계를 컴퓨터 시뮬레이션을 사용하여 살펴보고자 한다.

2. 모델 선정

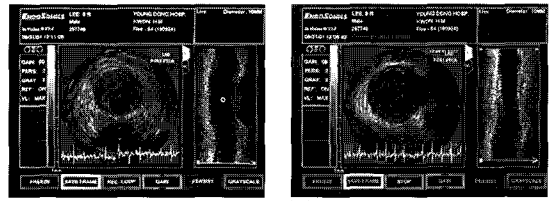
Fig. 1 은 관상동맥내 협착이 발생한 부위에 대하여 혈관내초음파(intravascular ultrasound)촬영을 한 사진이며, 혈류가 있는 내강만을 찾아내는 관상동맥 조형술에 비해 혈관벽의 상태도 함께 알 수 있다. Fig. 2는 Fig. 1의 형상을 이상화하여 구성한 혈관 재형성 모델이다. 본 연구에서는 두가지 모델에 대하여 혈류특성과 동맥경화증의 진행과의 관계를 살펴보고자 하였다. 이 모델은 실제 관상동맥의 크기와 같이 입구 혈관내경은 3.5 mm, 출구 혈관내경은 3 mm, 협착부의 혈관내경은 2.5 mm, 재형성으로 확장된 부위의 혈관내경은 4 mm 이다.

3. 컴퓨터 시뮬레이션

혈관이 재형성될 때 형상변화에 따른 전단응력과 유동속도의 변화를 살펴보기 위하여 연속방정식과 운동량방정식을 이용하였고, 유한체적법으로 이산화한 후 반복적인 방법으로 해를 구하였다.

* 숭실대학교 대학원 기계공학과
 ** 숭실대학교 기계공학과
 *** 인제대학교 의과대학 내과
 **** 연세대학교 의과대학 심장내과

입구경계조건은 도플러 초음파 장비로 관상동맥의 유량변화를 얻어 Fig. 3 과 같이 적용하였으며, 한 주기당 유량은 0.764 ml 이다.



(a) pre-stenotic model (b) post-stenotic model

Fig. 1 Plaque and remodeling photographs by the intravascular ultrasound catheter

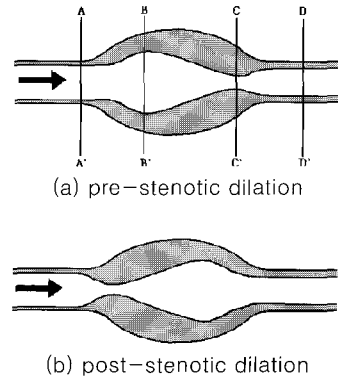


Fig. 2 Schematic of arterial remodeling models

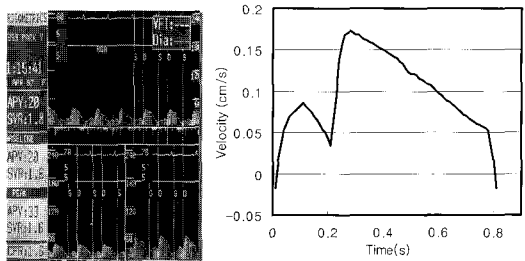


Fig. 3 Physiological waveform of pulsatile coronary blood flow

4. 결과 및 검토

Fig. 4~Fig. 7은 Fig. 2의 혈관벽 재형성 모델의 각 단면 A, B, C, D에서 한주기동안 전단응력의 변화를 나타낸 것이다.

입구에서의 유량이 Fig. 3과 같이 1/4 주기동안 유속이 조금 증가 및 감소하고 나머지 3/4 주기동안 크게 증가하였다가 서서히 감소하는 경향이 혈관 재형성 모델의 단면 A, B, D에서의 전단응력과 유사한 변화를 보이고 있다. 단면 C에서의 전단응력은 다른 단면과 경향이 다르게 나타나고 있는데, 이는 단면 C가 혈관벽이 확장하여 혈관벽 가까이에서 재순환영역이 형성되기 때문이다. 단면 A, B, D에서는 한주기동안 전반적으로 양의 전단응력을 나타내고 있으나, 단면 C에서는 초기 1/4 주기동안 유속이 증가할 때만 양의 전단응력을 나타내고 나머지 대부분의 기간에는 음의 전단응력을 나타내고 있어 대부분의 기간동안 재순환영역이 발생하고 있음을 알 수 있다. Table 1은 각 단면 A, B, C, D에서의 벽면전단응력과 전단율을 나타낸 것이다. Pre-stenotic model에서는 협착이 발생된 단면 C에서 최대전단응력과 전단율이 나타나며, Post-stenotic model에서는 협착이 발생된 단면 B에서 나타난다. 전단응력과 전단율은 두가지 모델 모두에서 혈관확장부에서만 음의 전단율 즉, 재순환영역이 나타남을 알 수 있다. 한 주기동안 전단응력의 변화는 Post-stenotic 모델이 Pre-stenotic 모델보다 비교적 높게 나타난다. Pre-stenotic 모델은 Post-stenotic 모델보다 많은 기간동안 음의 전단응력이 발생하고 있음을 알 수 있다.

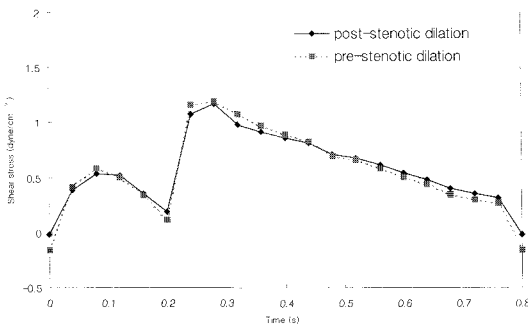


Fig. 4 Wall shear stress changes at the cross section A

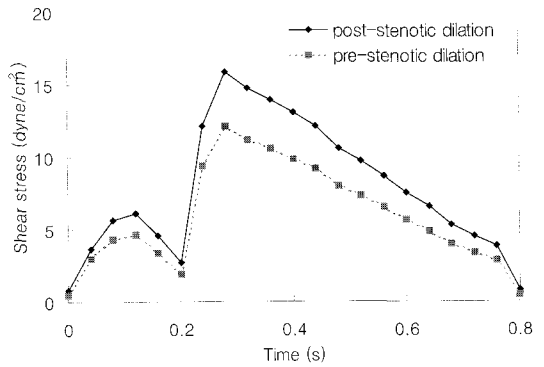


Fig. 5 Wall shear stress changes at the cross section B

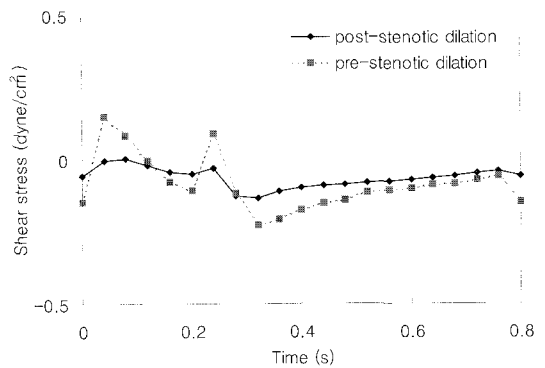


Fig. 6 Wall shear stress changes at the cross section C

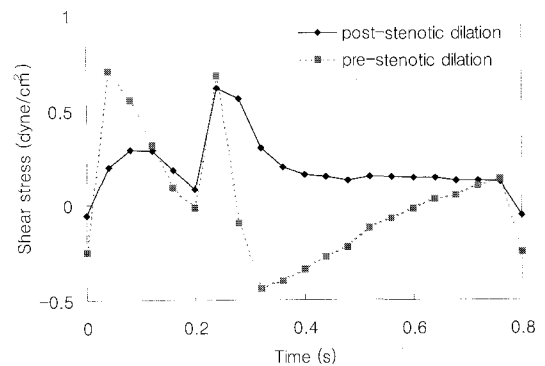


Fig. 7 Wall shear stress changes at the cross section D

Table 1 Wall shear stresses and shear rates at different cross sections

unit: (W.S.S.)dyne/cm², (W.S.R.)s⁻¹

Model		Section			
		A	B	C	D
pre-stenotic model	W.S.S.	1.38	-1.06	12.2	1.93
	W.S.R.	40	-30.7	353.6	55.9
post-stenotic model	W.S.S.	0.63	15.9	-0.135	1.21
	W.S.R.	18.3	460.9	-3.9	35.1