

변형성 동맥협착증 주변의 혈류역학적 특성

최우락* · 이상준*

Hemodynamic characteristics of blood flows around a deformable stenosis

Woorak Choi*, Sang Joon Lee*

Abstract : A portion of vulnerable stenosis are deformed periodically in pulsatile blood flow condition. Diagnosis of the deformable stenosis is important because the deformation of stenosis can increase possibility of rupture which cause sudden cardiac death or stroke. Diagnostic index has been developed for nondeformable stenosis by using flow characteristics and resultant pressure drop across the stenosis. However, the effects of the stenosis deformation on the flow characteristics remain unclear. In this study, the stenotic flow around a deformable and two different rigid models were investigated in pulsatile flow condition. Particle image velocimetry was applied to compare flow structures of the three models. The deformable stenosis model was deformed to have higher geometrical slope and height as flow rate increase. The shape deformation enhanced jet deflection toward a wall on the opposite side of the stenosis. The jet deflection induced higher increasing rate of jet velocity and turbulent kinetic energy (TKE) production rate in the deformable model comparing to the rigid models. The effects of the deformation on pulsating pressure drop wave were investigated by utilizing the results of TKE production rate. Phase delay for the maximum value in the pressure drop wave was found in the deformable model comparing to the rigid models. The results shows the potential of pressure drop waveform as a diagnostic index for the deformable stenosis.

1. 서 론

진 세계적으로 죽상경화반 (atherosclerotic plaque)의 파열로 인한 사망이 지속됨에 따라, 파열 가능성이 높은 취약형 죽상경화반 (vulnerable plaque)을 진단할 수 있는 기법에 대한 연구들이 진행되어 왔다⁽¹⁾. 진단 기법으로는 CT, OCT, IVUS 등의 영상 기법과 취약형 죽상경화반의 형태학적 특징을 기반으로 하는 기법들이 주로 활용되어 왔다⁽²⁾. 생물지표 (biomarker) 를 이용하여 취약형 죽상경화반의 존재를 찾는 기법 또한 연구되었다. 하지만 영상 자료의 공간 분해능 (spatial resolution) 과 생물지표의 조기 진단 성공률에 있어서의 한계점들이 발표되면서 새로운 진단 기법 또는 인

자 개발의 필요성이 대두되고 있다.

죽상경화반 파열의 원인을 밝히기 위하여 경화반 주변의 유동 특성에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 유전적, 생리학적 인자들과 함께 유동학적 힘이 파열의 주요 원인으로 주목 받고 있다. 또한, 경화반 주변의 유동은 경화반의 구조에 의해 그 특성이 달라지는 것으로 알려져 왔다. 하지만 맥동성 혈류에 의해 주기적으로 그 형태가 변형되는 변형성 협착부 주변 유동에 대한 연구는 부족한 상태이다. 최근 임상 연구 결과들을 통해 변형성 협착부의 존재가 발표되었으며⁽³⁾, 경동맥에 존재하는 변형성 협착부와 뇌졸중 (stroke) 높은 발병률의 밀접한 관계를 밝히는 연구 결과들이 발표된 바 있다. 본 연구에서는 변형성 동맥협착증의 형태 변형과 이에 따른 유동 특성 변화에 대한 연구를 진행함으로써 취약형 죽상경화반 주변의 유동 구조와 이에 기반한 새로운 진단인자를 개발하고자 한

* 포항공과대학교 기계공학과

다.

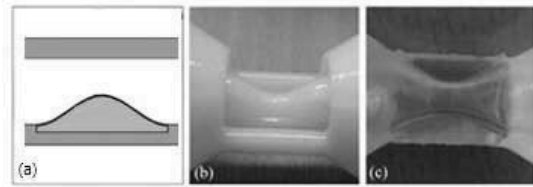


Fig. 1 (a) Side view of a phantom model, (b) 3D printed model, (c) Silicone-casted model

2. 실험 방법

Polydimensiloxane (PDMS)를 이용하여 내경을 기준으로 45%의 severity 를 갖고있는 변형성 협착부 모델을 제작하였다. 경화제의 비율을 조절함으로써 알려진 경화반 구성요소들의 탄성계수 (Young's modulus)를 모사하여 제작하였다. 지질부의 형태는 발표된 임상 결과들을 토대로 Fig. 1(a)와 같이 결정하였으며, 모델 제작을 위해 3D printing 을 이용하여 모델의 틀을 제작하였다 (Fig. 1(b)). 이 틀에 서로 다른 탄성계수를 갖는 두가지 종류의 PDMS를 부어 경화시킴으로써 변형성 협착부의 형태 변형을 모사할 수 있는 모델을 제작하였다 (Fig. 1(c)).

3. 실험 결과

형태 변형이 일어나는 변형성 협착부 모델과 Control 모델에서의 유동 구조를 PIV 기법을 이용하여 측정하였다. 경동맥에서의 맥동성 유동 조건에서 실험을 진행한 결과 변형성 협착부 모델의 경우 협착부 앞쪽의 기울기가 증가하는 형태로 변형이 일어나고, 이에 따라 협착부에 의해 형성되는 제트류의 유속이 Control 모델에 비해 더 빠르게 증가하는 것을 확인하였다. 또한 후류에서의 난류운동에너지 생성이 Control 모델에 비해 빠르게 증가 및 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 변형성 협착부 모델에서의 큰 난류 운동에너지 생성률 변화는 협착부 전 후의 정압 변화 곡선에서 최대값 위치를 뒤쪽으로 지연시키는 결과를 초래함을 확인하였다.

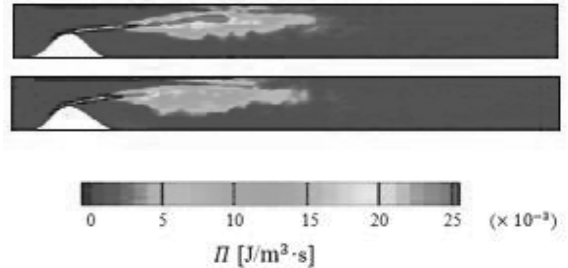


Fig. 2 Turbulence kinetic energy production rate distribution near deformable (lower image) and control stenosis model (upper), at a diastolic phase.

4. 결론

협착부의 형태 변형은 유동 구조 및 후류에서의 난류운동에너지 생성률에 변화를 초래함을 확인하였다. 또한 이러한 변화는 FFR 진단시 측정하는 협착부 전 후에서의 압력차 변화 곡선에서의 최대값 위치를 지연시키는 것을 확인하였다. 이는 FFR 진단시 평균 압력만을 이용하는 기존 진단법과 달리 압력차 변화 곡선 형태를 활용하면, 과열가능성이 높은 변형성 죽상경화반을 진단 할 수 있다는 가능성을 확인한 결과라 할 수 있다.

참고 문헌

- (1)Pasterkamp, C., et. al., 2000, "Atherosclerotic plaque rupture: an overview", Journal of Clinical and Basic Cardiology, pp. 81 ~ 86.
- (2) Suh, W. M., et. al., 2011, "Intravascular detection of the vulnerable plaque, Circulation Cardiovascular Imaging" Circulation Cardiovascular Imaging, pp. 169 ~ 178.
- (3) Shinji, K, et. al., 2010, "Vulnerable carotid arterial plaque causing repeated ischemic stroke can be detected with B-mode ultrasonography as a mobile component: Jellyfish sign", Neurosurgical review, pp. 419 ~ 430.