

# 유동에 기인한 동맥협착증의 변형

최우락\* · 이상준\*

## Flow-induced deformation of stenosis

Woorak Choi\*, Sang Joon Lee\*

**Abstract** : Atherosclerotic stenosis are often built up at blood vessels. A portion of the stenosis are vulnerable and can be 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 rigid stenosis by using flow characteristics and resultant pressure drop across the stenosis. However, the effects of the stenosis deformation on the diagnostic index remain unclear. In this study, the stenotic flow around several deformable stenosis which have different thickness of a fibrous cap was investigated. Particle image velocimetry was applied to compare flow structures around the models. The deformable stenosis models were deformed to have higher geometrical slope and height as flow rate increase. Decrease of the cap thickness induced larger deformation. 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. The results shows the potential of shape deformation and resultant flow characteristics around stenosis as a diagnostic index for the vulnerable stenosis.

### 1. 서 론

전 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<sup>(1)</sup>. 진단 기법으로는 CT, OCT, IVUS 등의 영상 기법과 취약형 죽상경화반의 형태학적 특징을 기반으로 하는 기법들이 주로 활용되어 왔다<sup>(2)</sup>. 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 인자 개발의 필요성이 대두되고 있다.

죽상경화반 파열의 원인을 밝히기 위하여 경화반 주변의 유동 특성에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 유전적, 생리학적 인자들과 함께 유동학적 힘이 파

열의 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<sup>(3)</sup>, 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 한다.

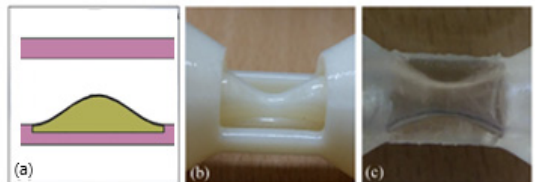


Fig. 1 (a) Side view of a phantom model, (b) 3D printed model, (c) Silicone-casted model

\* 포항공과대학교 기계공학과

## 2. 실험 방법

Polydimethylsiloxane (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 모사하였으며, 섬유막 (fibrous cap) 부분의 두께를 조절하여 3가지 변형성 협착부 모델을 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 틀에서 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 모델들에서의 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. 섬유막의 두께가 작을수록 형상 변형량이 증가함을 확인하였고, 이에 기인하여 제트류 유속과 난류운동에너지 생성이 함께 증가함을 확인하였다.

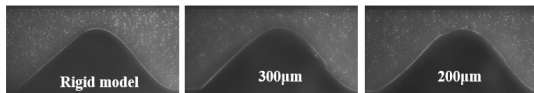


Fig. 2 Shape deformation of deformable stenosis models with different fibrous cap thickness

## 4. 결론

협착부의 형태 변형은 유동 구조 및 후류에서의 난류운동에너지 생성률에 변화를 초래함을 확인하였다. 또한 섬유막의 두께가 작을수록 형상 변형 및 난류운동에너지 생성률 변화가 커지는 것을 확인하였다. 이

는 취약형 죽상경화반 진단시 형상 변형 및 주변 유동 구조 측정을 통해 섬유막 두께를 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.