

협착부 응력과 유동에 미치는 섬유성막 두께의 효과

최우락* · 박준홍* · 이상준*

Effects of fibrous cap thickness on mechanical stress and flow characteristics

Woorak Choi*, Jun Hong Park Sang Joon Lee*

Abstract : Several stenoses can be deformed periodically under a pulsatile blood flow condition when they have thin fibrous cap covering lipid pool. Analysis of the deformation is important because the resultant stress increase the likelihood of rupture, which causes sudden cardiac death or stroke. Previous studies tried to measure the mechanical stress acting on the fibrous caps to anticipate the rupture. However, the existing methods have limitation in invasiveness and process time for calculating stress. In this study, determinants for the deformation of fibrous cap and resultant stress were investigated through experimental study with deformable stenosis models. The quantity of deformation and mean stress on the fibrous caps are revealed to be determined by square of flow rate divided by fibrous cap thickness. The deformed shape results in variation of angle for jet flow at the stenosis throat. The jet angle variation is also revealed to be correlated with square of flow rate divided by fibrous cap thickness. The present results indicates stress and cap thickness can be anticipated by measuring flow rate and jet angles.

1. 서 론

죽상경화반 (atherosclerotic plaque) 의 파열로 인한 사망은 전세계적으로 지속되고 있으며, 파열 가능성이 높은 취약형 죽상경화반 (vulnerable plaque)을 진단할 수 있는 기법에 대한 연구들이 활발히 진행되어 왔다⁽¹⁾. 진단 기법으로는 CT, MRI, IVUS 등의 영상 기법과 취약형 죽상경화반의 형태학적 특징을 기반으로 하는 기법들이 주로 활용되어 왔으며⁽²⁾, 생물지표 (biomarker) 를 이용하여 취약형 죽상경화반의 존재를 찾는 기법 또한 연구되어 왔다. 하지만 영상 결과의 공간 분해능 (spatial resolution) 과 생물지표의 조기 진단 성공률에 있어서의 한계점들이 지적되면서 새로운 진단 기법 또는 인자 개발의 필요성이 대두되고 있다.

죽상경화반 파열의 원인을 밝히기 위하여 경화반 주변의 유동 특성에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔으

며, 유동학적 힘인 정압과 벽전단응력이 파열의 주요 원인으로 주목 받고 있다. 또한, 경화반 주변의 유동은 경화반의 구조와 섬유성막 (fibrous cap) 특성에 의해 그 특성이 달라지는 것으로 알려져 왔다. 하지만 맥동성 혈류에 의해 형상이 변형되는 변형성 협착부 주변 유동에 대한 연구는 부족한 상태이다. 최근 임상에서 확인된 변형성 협착부에 대한 연구결과들이 발표되고 있으며⁽³⁾, 경동맥에 존재하는 변형성 협착부와 뇌졸중 (stroke) 의 밀접한 관계에 대한 연구 결과가 발표된 바 있다. 본 연구에서는 섬유성막 두께에 의한 협착부 내 응력 변화에 대해 밝히고자 하였다. 또한, 변형성 협착부의 형상 변형으로 인한 주변 유동 변화, 특히 협착부 목 (stenosis throat) 주변에서 형성되는 빠른 유속의 제트 (jet) 유동의 변화에 주목하여 그 효과를 분석하고자 하였다.

* 포항공과대학교 기계공학과

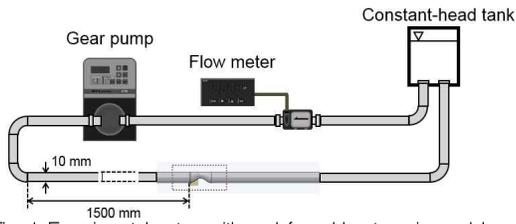


Fig. 1 Experimental setup with a deformable stenosis model

2. 실험 방법

Polydimensiloxane (PDMS)를 이용하여 내경을 기준으로 45%의 증증도를 갖는 협착부 모델을 제작하였다. 경화제의 비율을 조절함으로써 알려진 경화반 구성요소들의 탄성계수 (Young's modulus)를 모사하였으며, 섬유막 (fibrous cap) 부분의 두께를 조절하여 3가지 다른 변형성 협착부 모델을 제작하였다. 또한 형상이 다른 비변형성 협착부 모델을 제작하여 변형성 협착부 모델과 주변 유동을 비교하고자 하였다. 모델 제작을 위해 3D printing 을 이용하여 모델의 틀을 제작하였으며, 이 틀에 서로 다른 탄성계수를 갖는 두가지 종류의 PDMS를 경화시킴으로써 변형성 협착부의 형태 변형을 모사할 수 있는 모델을 제작하였다 맥동성 유동을 모사할 수 있는 기어펌프를 활용하여 혈액모사 유체를 이용한 실험을 진행하였다..

3. 실험 결과

섬유성막에 작용하는 평균응력은 유속의 거듭제곱 값에 섬유성막 두께를 나눈 값에 비례하여 증가함을 확인 할 수 있었다. 또한, 형상변형에 기인한 제트 유동의 기울기 변화량 또한 유속의 거듭제곱값에 섬유성막 두께를 나눈 값에 비례하여 증가함을 확인할 수 있었다. 제트 유동의 기울기는 변형성 협착부 모델의 경우가 비변형성 협착부 모델의 경우보다 작게 나타났으며 낮은 제트 유동 기울기는 짧은 재순환 영역과 낮은 제트 유속을 기인함을 확인할 수 있었다.

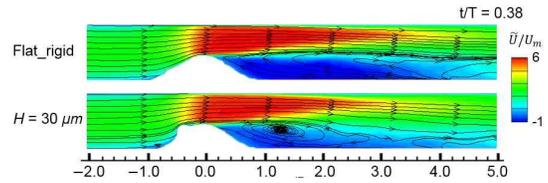


Fig. 2 Effects of shape deformation on distal flow characteristics

4. 결론

섬유성막의 두께와 유속에 기인하여 섬유성막 내 응력의 크기가 결정됨을 확인할 수 있었으며, 섬유성막의 변화량이 협착부 목에서 나타나는 제트 유동의 기울기 변화에 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. 이는 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.