

# 혈관 벽의 운동이 협착유동에 미치는 영향에 대한 수치해석

전병진<sup>1</sup> · Sang Truong<sup>2</sup> · 최형권<sup>3\*</sup> · 장영걸<sup>4</sup> · 장혁재<sup>5</sup>

## A Numerical Study on the Effect of Blood-vessel motion on Stenotic Flow

Byoungjin Jeon<sup>1</sup>, Sang Truong<sup>2</sup>, Hyounggwon Choi<sup>3\*</sup>, Yeonggul Jang<sup>4</sup>, Hyukjae Chang<sup>5</sup>

**Abstract** : Recently, we have developed a monolithic fluid-structure interaction (FSI) code for simulating the interaction of blood flow with a vessel of non-linear material. Three-dimensional unsteady FSI simulations of two coronary arteries were conducted by using the FSI code based on finite element method. The images of coronary arteries were extracted from in-vivo 3D CT data of patients, one of whom was subject to plaque rupture. Various parameters such as wall-shear stress, oscillatory shear index, axial plaque stress and Von-Misses stress were examined by post-processing the FSI simulations.

### 1. 서 론

관상동맥경화증은 혈액검사와 심전도 검사, 영상(CT, MRI)을 이용하여 진단을 할 수 있으나, 살아있는 인체의 혈관에 대한 질환의 진행 정도나 수술 후의 결과를 예측하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서, 많은 연구자들은 환자의 완치율을 높이기 위해 전산유체역학을 이용하여 다양한 형상의 혈관에 대해 혈류유동 특성을 분석하는 연구를 수행하고 있다.

Varghese<sup>(1)</sup> 등은 직접수치해석 방법을 이용하여 협착이 고려된 단순한 혈관 형상에 대해서 선행연구의 실험 결과와 일치함을 확인하고 난류 유동장을 추가로 분석하였다. 최길우<sup>(2)</sup> 등은 Axial Plaque Stress(APS)를 정의하고, 단순한 혈관 형상에 대한 수치해석을 통해 APS가 벽진단응력보다 협착 부분에 미치는 영향을 더 크다고 보고하였다.

실제 혈류유동을 모사하기 위해서는 혈관의 움직임

을 포함한 유체-구조 상호작용 해석이 수행되어야 한다. Dong<sup>(3)</sup> 등은 3차원 CT로 얻은 좌관상동맥(LCA) 혈관 형상을 단순화하여, 분지관의 다양한 각도에 대한 유체-구조 상호작용 해석을 수행하였다. 하지만, 아직까지도 다양한 모델들에 대한 정량적인 비교나 복잡한 실제 환자의 혈관에 대해서 비선형 모델 등을 포함한 유체-구조 상호작용 해석에 대한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 CT 관상동맥 조영술로 얻은 실제 환자의 좌관상동맥 혈관에 대해서 강제 또는 선형, 비선형 모델을 고려한 유체-구조 상호작용 해석 결과를 비교하고자 한다. 또한, 유체-구조 상호작용 해석 결과와 임상 진단 결과와의 연관성을 검토하고자 한다.

### 2. 연구 내용

#### 2.1. 수치해석 방법

단일 접근법으로 유체-고체 상호작용 해석을 수행하기 위해서 유체 영역에 ALE 형식의 비압축성 Navier-Stokes 방정식을, 구조물영역에는 Lagrangian 형식의 선형 또는 비선형 탄성 방정식을 사용하였다. 지배방정식에 대한 공간 이산화는 P2P1 유한요소 기반으로 수행하였으며, 시간 이산화는 2차 정확도를 가

1 연세대학교, 심장융합영상연구센터  
2 서울과학기술대학교 일반대학원 기계공학과  
3\* 서울과학기술대학교 기계자동차공학과  
4 연세대학교, 의과대학, 의과학과  
5 연세대학교, 의과대학, 내과학교실 심장내과

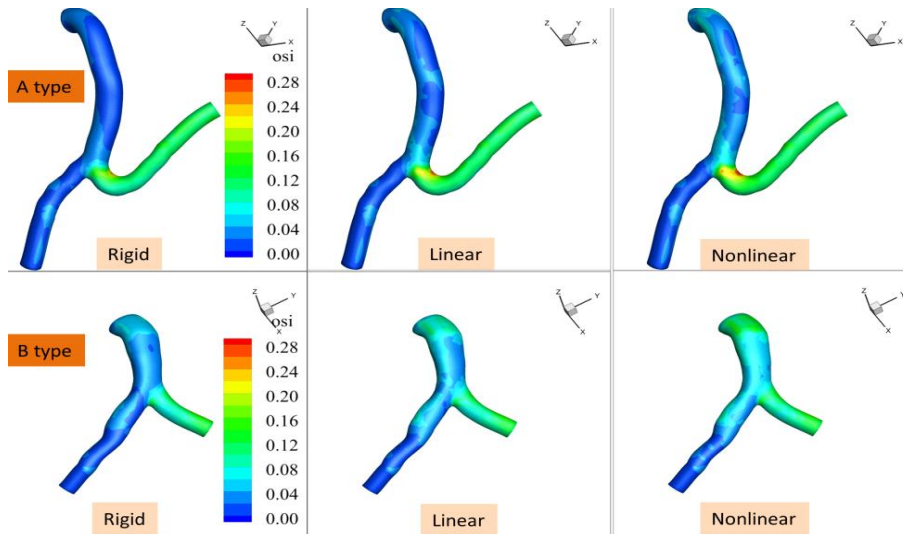


Fig. 1 Distribution of oscillatory shear index(OSI) over the internal surface of the vessels

지며 감쇠효과를 주는 generalized- $\alpha$  기법을 사용하였다<sup>(4)</sup>. 본 연구에서 사용한 선형 탄성 구성방정식은 식 (1)과 같다.

$$\sigma = c : \epsilon, \quad \epsilon = \frac{1}{2} [(\nabla u^s) + (\nabla u^s)^T] \quad (1)$$

여기서,  $c$ 는 선형 탄성 강도를 나타내는 fourth-order tensor이고,  $\epsilon$ 은 strain-tensor이다. 식 (2)는 비선형 탄성 구성방정식을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \sigma &= F \cdot S \cdot F^T, \quad S = C^* : E, \\ E &= \frac{1}{2} [(\nabla_0 u^s)^T + (\nabla_0 u^s) + (\nabla_0 u^s)^T \cdot (\nabla_0 u^s)] \quad (2) \\ C &= F^T \cdot F, \quad F = I + (\nabla_0 u^s), \quad J = \det \end{aligned}$$

여기서,  $S, C, E, F, I$  는 Piola-kirchhoff stress, right Cauchy deformation, Green strain, deformation gradient, second-order identity tensor를 나타낸다. 또한,  $C^*$ 는 material stiffness의 fourth-order tensor이다. 재료 물성치에 대한 모델은 Mooney-Rivlin 모델<sup>(5)</sup>을 사용하였다.

## 2.2. 수치해석 결과

본 연구에서는 CT 관상동맥 조영술로 얻은 2명의 실제 환자의 좌관상동맥에 대해서 수치해석을 수행하였다. Fig. 1은 강체와 선형 또는 비선형 유체-고체 상호작용 해석을 수행하여 얻은 Oscillatory Shear Index 분포를 보여준다. 비선형 해석, 선형 해석, 강체 해석 순으로 OSI 값이 높게 측정되는 것을 볼 수 있다. 또한 A 환자가 B환자보다 최대 OSI 값이 높게 나타났다.

## 후 기

본 연구는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원(No. R0101-15-0171, 다중의료영상을 활용한 3차원 초정밀 시뮬레이션 기반 심·혈관 질환 진단·치료지원 통합 소프트웨어 시스템 개발)으로 수행된 연구임.

## 참고 문헌

- (1) Varghese, S.S., et. al., 2007, "Direct Numerical Simulation of Stenotic Flows. Part 1. Steady flow," J. Fluid Mech, pp. 253-280.
- (2) Choi, G.W., et. al., 2015, "Coronary Artery Axial Plaque Stress and its Relationship with Lesion Geometry," JACC. Cardiovascular imaging, pp. 1156-1166.
- (3) Dong, J., et. al., 2015, "Fluid-Structure Interaction Analysis of the Left Coronary Artery with Variable Angulation," Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, pp. 1500-1508.
- (4) Kang, S., et. al., "Investigation of Fluid-structure Interactions using a Velocity-linked P2/P1 finite element method and the generalized- $\alpha$  method," Numerical Methods in Engineering, pp. 1529-1548.
- (5) Torii, R., et. al., "Fluid-Structure Interaction Analysis of a Patient-Specific Right Coronary Artery with Physiological Velocity and Pressure Waveforms," Numerical Method in Biomedical Engineering, pp. 565-580.