

FSI기법을 사용한 혈관해석에서 협착 구성성분이 미치는 영향에 관한 연구 A Study on the Plaque components of Blood Vessel in the FSI Analysis of Blood Vessel

*남지우¹, #조성욱¹

*J. Nam¹, #S. W. Cho(scho@cau.ac.kr)¹

¹중앙대학교 기계공학부

Key words : FSI, Fluid-structure interaction, Blood vessel stress, Properties

1. 서론

혈관질환의 발병원인은 식습관, 유전적인 요인, 노화에 따른 자연적인 현상 등이 매우 복잡하게 작용하여 발생하며 이는 곧 혈관질환의 발병원인에 대한 구체적인 메커니즘을 설명하는 것을 매우 어렵게 만드는 이유이기도 하다. 이에 많은 연구에서 혈관질환의 현상에 대한 분석을 수행하고 있다. 기존의 연구에서 다양한 상태의 환자들의 의학정보를 토대로 혈관질환의 상태를 관찰하고 그 위험도 진단할 수 있는 기준을 만드는 것이 그 중요성 중 하나이다. 많은 공학자들이 환자들의 정보를 기반으로 모의실험을 수행함으로써 혈관질환의 현상에 대한 분석을 하고 있다. 특히 컴퓨터의 발전으로 FSI(Fluid-structure interaction) 기법을 이용한 혈관에 관한 해석이 늘어나고 있다. 많은 선행 연구에서 대표적으로 혈관 질환이 발생하는 경동맥이나 대동맥, 관상동맥 같은 부위의 국부적인 혈관의 해석을 수행하고 있다. FSI해석은 유동 및 구조해석을 위한 혈관 형상뿐만 아니라 구조해석을 위해 혈관의 물성정보가 고려된다. 하지만 실제 혈관 질환을 가지고 있는 환자의 혈관 물성은 단일 물성이 아닌 여러 협착물질들로 구성되어 있다. 혈관 질환을 가지고 있는 혈관은 대표적으로 Necrotic core, calcified, fibrofatty, fibrous 구성성분을 가지고 있다. 따라서 보다 정교한 FSI해석을 위해서는 혈관 물성을 고려한 FSI 해석이 필요하다.

본 연구에서는 실제 환자의 혈관물성 정보와 혈관 형상을 가지고 FSI해석을 진행 하기위한 예비 연구로서, 혈관 물성을 고려한 해석이 실제 혈액 유동과 혈관 벽에 미치는 영향을 규명하였다.

2. 유한요소 모델

본 연구는 혈관의 구성성분이 혈관 해석에서 미치는 영향을 확인하기 위한 연구이다. 따라서 편심을 가지고 있는 단순 협착 혈관 모델을 구성하여 혈관 물성과 혈관 구성성분 중 가장 큰 물성 차이를 가지고 있는 calcified 구성성분을 고려하여 해석 모델을 구성하였다. 유한요소 해석에 사용된 모델은 혈관의 총 길이가 10 cm 이고 입구와 출구 직경이 1 cm, 협착부 직경은 0.5 cm, 경동맥의 혈관 벽 두께가 직경의 15%~20% 관찰됨으로 혈관 벽의 두께는 2 mm 로 가정하였다. 이에 혈관 구성성분인 calcified 모델은 직경이 2 mm, 4 mm로 가정하여 모델을 구성하였다.

3. 수치 모델링

혈액(fluid)의 경우 1050 kg/m^3 의 밀도(density)와 $0.0035 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ 의 점성계수(viscosity)를 가지는 비압축성 뉴턴이안 유체로 가정하였으며 접촉 조건 및 층류 유동이 적용되었다. 혈관 벽(solid)의 경우 대 변형을 고려한 탄성체로 가정하였으며 탄성계수(elastic modulus) 및 푸아송 비, 밀도는 각각 0.5 MPa, 0.45, 1150 kg/m^3 이 사용되었다.

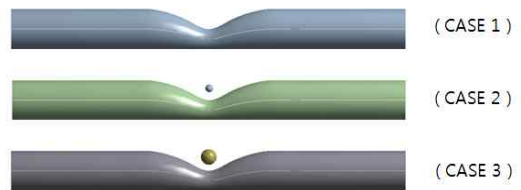


Fig. 1 The geometry of the blood vessel

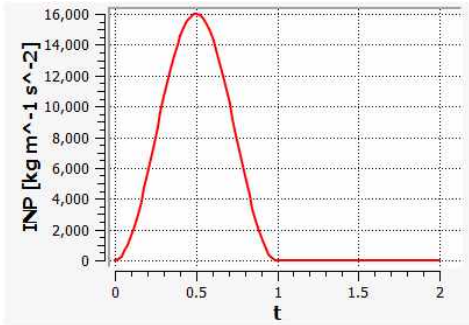


Fig. 2 Inlet pressure profile

수치 모델의 경계조건으로 세 가지 경우의 경계 조건을 동일하게 적용하였다. 입구와 출구의 혈관 벽의 자유도를 구속하였으며 그림. 2 의 혈관 압력 프로파일을 적용하여 해석을 수행하였다.

4. 결과 및 분석

Calcified가 혈관 벽에 미치는 영향을 이해하기 위해서 혈관 벽의 von-Mises stress 분포를 살펴보았다. 보다 정확한 비교를 위하여 calcified가 없는 경우와 calcified의 크기를 늘려가며 혈관 물성의 일부인 calcified가 혈관 벽에 어떠한 영향을 미치는지 비교하였다. 그림. 3는 혈관 중심 단면의 von-Mises stress의 분포이다.

그림 3을 살펴보면 세 가지 경우에서 혈관 벽의 von-Mises stress의 분포는 매우 비슷한 양상을 나타낸다. Von-Mises stress의 최댓값은 혈관 중심 전단면에서 혈관 협착 부분 끝단에서 나타났다. 이는 협착 내부에 calcified의 강성이 혈관 벽의 강성보다 높기 때문에 calcified가 없는 경우에는 상대적으로 협착부의 이동이 자유롭고 calcified가 있는 협착부의 이동이 제한되기 때문에 von-Mises stress가 높게 나타났다.

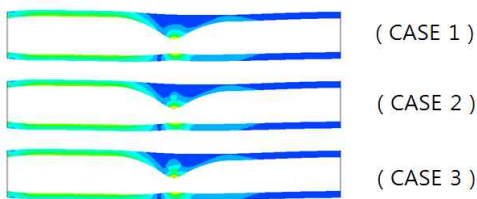


Fig. 3 Contour plots of the von-Mises stress At Peak pressure (t=0.5s)

Table 1 Von-Mises stress of each case

	CASE 1	CASE 2	CASE 3
von-Mises stress	88.58 kPa	90.83kPa	93.60 kPa

5. 결론

본 논문에서는 FSI 기법을 사용하여 혈관의 구성 성분이 혈관 벽 거동에 미치는 영향 연구를 수행하였다. 혈관 협착 부분에 calcified의 크기를 달리하여 혈관 벽의 von-Mises stress의 분포를 살펴본 결과 전체체적인 von-Mises stress의 분포는 비슷하게 나타났다. 그러나 calcified가 제일 큰 모델과 calcified가 없는 모델의 최대 von-Mises stress 차이는 약 5.6%로 크게 나타났다. 이와 같이 협착성분을 포함한 혈관벽의 강성은 혈관 벽 뿐만 아니라 혈액 흐름에도 영향을 미칠수 있다. 따라서 차후 연구를 통하여 합리적인 혈관 물성을 고려하고 보다 현상학적인 FSI(Fluid-structure interaction) 모델을 생성하는 것이 필요하며 또한 이를 해석 반영이 연구 수행이 요구된다.

후기

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2012-0001517).

참고문헌

1. S. Tada, J. M. Tarbell., "A Computational Study of Flow in a Compliant Carotid". Annals of biomedical engineering, Vol. 33, No. 9, pp. 1202~1212, 2005
2. Kock, S. A., Nygaard, J. V., Eldrup, N., Frund, E.T., Klaerke, A., Paaske, W. P., Falk, E., Yong Kim, W., "Mechanical stresses in carotid plaques using MRI-based fluid-structure interaction models," Journal of biomechanics, Vol. 41, No. 8, pp. 1651~1658, 2008