

# 관상동맥질환에서 동맥경화성 죽상반의 불안정성에 대한 벽전단응력과 전단 변형률의 영향 : CFD와 FSI를 활용한 생체유체역학 연구

김형호\*, 권혁문\*\*, 이병권\*\*, 서상호\*

## Effect of shear strain and wall shear stress of Plaque Vulnerability in coronary atherosclerotic disease using Biomechanical CFD and FSI analysis

Hyoung-Ho Kim\*, Hyuck Moon Kwon\*\*, Byoung Kwon Lee\*\*, Sang-Ho Suh\*

Abstract : Atherosclerosis is a disease in which plaque builds up inside of arterial system. Over time, plaque grows and narrows arterial lumen, especially at atherosclerosis-prone area. Biomechanical properties and histopathologic tissue characters of atherosclerotic plaque play an important role to induce rupture of plaque. Plaque consists of various components such as thrombosis, fibrin, collagen and lipid core. In this study, we differentiated plaques to three different type according as tissue elasticity for FSI simulation: cellular, hypocellular, and calcified plaque. And the cap thickness is varied according as the location of lipid core and growth velocity of plaque. So, we used cellular plaque model contained with lipid core (hypocellular plaque) with varying thicknesses of blood vessel and fibrous cap to investigate the mechanical information for plaque rupture. Conclusively, we found that the atherosclerotic plaque with lipid core represents higher Von Mises stress than that without lipid core, and blood vessel's thin thickness like thin cap results in larger Von Mises stress.

Key word: Atherosclerosis, Vulnerable plaque, Wall shear stress, plaque shear strain

### 1. 서 론

동맥경화는 혈관벽의 내피세포의 손상에 대한 혈관 내벽의 생화학적 염증반응에 의해 발생하는 질환이다. 동맥경화성 죽상반이 형성되어 진행될수록 동맥혈관의 협착과 폐쇄로 이어져 중요 장기의 혈류장애를 유발한다. 심장이나 뇌혈관의 동맥경화성 죽상반이 급성으로 파열하면 혈전 형성 등에 의해 급격히 혈관 내경이 막혀 급성심근경색이나 급성 뇌졸중, 등이 발생한다. 환자마다 죽상반의 조직학적 구성 비율은 다르고, 죽상반을 둘러싸고 있는 혈관 내피 혹은 죽상반 섬유질 캡의 두께(fibrous cap thickness of atherosclerotic

plaque), 지질 핵(lipid core) 존재 여부 및 위치와 모양도 다양하다<sup>(1)</sup>.

임상적으로 죽상반의 조직학적 영상정보는 여러 가지 방법을 이용하여 얻을 수 있다. 하지만 불안정한 플라크 파열에 의한 고위험군 환자의 설정과, 이에 따른 적극적인 치료의 방향 모색을 위한 죽상반의 생체역학적 특성 정보는 얻을 수 없었다. 벽전단응력에 의해 상처 입은 혈관에서 죽상반이 생성된다는 보고가 있었지만<sup>(2)</sup>, 생성된 죽상반이 어떤 생체역학적 조건에서 파열 가능성이 높은지 명확하지 않다. 본 연구에서는 실제 환자의 IVUS 및 VH 영상을 이용하여(Fig. 1) 죽상반을 덮고 있는 캡의 두께(plaque cap thickness)와 지질 핵(lipid core) 유무 등에 따른 가상 모델의 기초를 삼았다.

\* 숭실대학교 기계공학과

\*\* 연세대학교 강남세브란스병원 심장내과

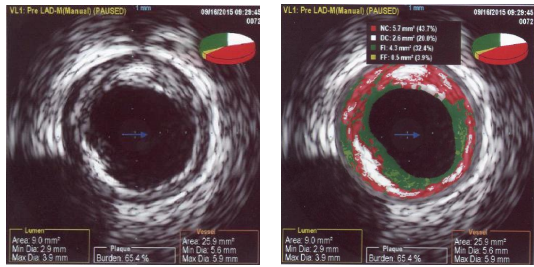


Fig. 1. 죽상반의 혈관내초음파 영상 및 가상조각영상 혈관

FSI 해석을 통해 죽상반 파열 및 안정성에 대한 생체 역학적 정보를 얻고자 벽-혈류역학적 정보(WSS, plaque shear strain) 를 분석하여, 죽상반의 안정성에 관한 위험도를 파악하고자 하였다

## 2. 본 론

IVUS 및 VH 영상을 기초로 실제 관상동맥 모델과 죽상반의 형태를 가깝게 하여 지질핵이 있는 동맥경화 관상동맥 모델을 제작하였다.(그림 2) 본 모델에서 관상동맥 벽 및 캡의 두께를 각각 0.5, 0.25, 0.05 mm로 모델링하였고, 지질 핵이 있는 모델은 두께가 0.5 mm 인 모델에 대해서만 모델링하였다.

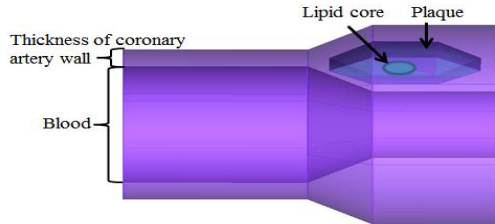


Fig. 2. 3D coronary artery model with plaque having lipid core

죽상반의 구성성분에 따라 표현하는 탄성 모델은 다양하다. 죽상반은 Cellular plaque, Hypocellular plaque, Calcified plaque로 크게 3가지 형태로 구분할 수 있다<sup>(3)</sup>. 일반적으로 중상반중 Cellular plaque가 차지하는 비중이 가장 크기 때문에 본 연구에서는 죽상반을 Cellular plaque로 가정된 탄성 모델을 이용하였다. FSI 해석을 위해 ANSYS와 CFX 16.2를 사용하였고 실제 관상동맥의 혈류 파형을 입구경계조건으로 연구를 진행하였다.

지질 핵 유무에 따른 결과를 Table 1과 Table 2에 각각 파열의 위험성을 가늠할 수 있는 힘의 위험인자로 Von Mises stress를, 혈관의 변형량을 파악하기 위한

인자로 Mesh displacement를 통해 나타내었다.

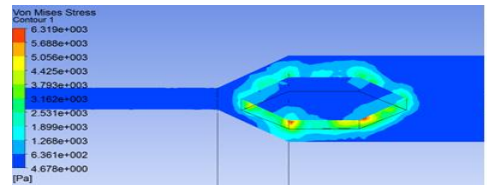
Table 1. Distribution of Von Mises stress according to w/, or w/o core

	Time(s)	w/o core	w/ core
Von Mises stress [Pa]	0.28	6214	7172
	0.16	6319	7135
	0.52	6265	7149

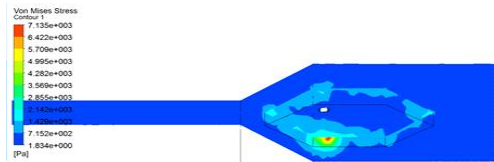
Table 2. Distribution of mesh displacement according to w/, or w/o core

	Time(s)	w/o core	w/ core
Mesh displacement[ $\mu m$ ]	0.28	5.20	5.20
	0.16	3.74	2.57
	0.52	3.17	2.27

분석 결과 지질 핵이 있는 경우가 지질 핵이 없는 경우보다 Von Mises stress가 높게 나왔다. 혈관의 변형량은 지질 핵이 없는 경우가 더 높았다. Fig. 3는 혈관의 중심 단면에서 Von Mises stress 분포를 나타낸다. 가장 큰 응력은 플라크와 혈관이 맞닿는 부분에서 발생하였다. 지질 핵이 있는 경우에는 플라크의 전면 하단 부분만 응력이 높게 분포하였고, 지질 핵이 없는 경우에는 전면 전단과 하단 부분에서 높은 전단응력이 발생하였다.



(a) w/ core



(b) w/o core

Fig. 3 Distribution of Von Mises stress in central plane according to w/ and w/o core

캡의 두께에 따른 영향을 역시 분석하였다. 죽상반을 덮고 있는 캡의 두께가 0.25 mm와 0.05 mm 일 때의 중심 단면에서 Von Mises stress 분포를 분석하였다.

캡이 0.25 mm로 얇아졌을 때 죽상반 주위의 응력은 줄어들었고, 캡이 더 얇아져서 0.05mm가 되면 혈관 벽과 플라크 사이에서 0.5 mm 일 때 보다 큰 응력이 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 혈관 벽 두께가 0.065 mm 아래일 경우 thin cap fibroatheroma로 지칭하는데, 따라서 죽상반을 덮고 있는 캡이 얇을수록 파열의 가능성이 더 클 것으로 판단된다.

### 3. 결론

본 연구에서는 죽상반의 파열에 대한 정보를 얻기 위해 죽상반을 덮고 있는 캡의 두께 (plaque cap thickness) 정도와 지질 핵 (lipid core) 유무에 따른 혈관벽-혈류역학적 정보 (WSS vs plaque shear strain) 를 FSI 해석을 통해 얻었다. 관상동맥 혈관 벽, 캡의 두께와 죽상반 구성 성분에 따라 파열의 가능성은 연관관계가 있고, 캡이 아주 얇거나 지질 핵이 있는 경우 벽을 향한 힘의 크기가 커지며 이러한 힘의 크기가 클수록, 또한 정상혈관과 죽상반 조직의 심장 박동에 따른 변형성의 차이가 높아질수록 파열이 일어날 가능성이 더 크다고 볼 수 있다.

### 참고 문헌

- (1) Keshavarz-Motamed, Zahra, et al., 2014, "Coronary artery atherectomy reduces plaque shear strains: An endovascular elastography imaging study." *Atherosclerosis*, pp. 140-149.
- (2) Tang, Dalin, et al., 2008, "A negative correlation between human carotid atherosclerotic plaque progression and plaque wall stress: in vivo MRI-based 2D/3D FSI models." *Journal of biomechanics*, pp. 727-736.
- (3) Pericevic, Ian, et al., 2009, "The influence of plaque composition on underlying arterial wall stress during stent expansion: the case for lesion-specific stents." *Medical engineering & physics*, pp. 428-433.

---

\* 송실대학교 기계공학과

\*\* 연세대학교 강남세브란스병원 심장내과