

Self-Expanding Vascular Stent 의 형상에 따른 팽창 및 전단특성

*김철웅¹, 강봉수²

¹ 유엔아이(주) 고려대연구소/고려대 기계공학과, ² 유엔아이(주) 고려대연구소

Expansion and Shear Characteristic of Self-Expanding Vascular Stent due to the Different from Three Types

* Cheol-Woong Kim¹ and Bong-Su Kang²

¹ U&I Research Center/Mechanical Eng., Korea Univ., ² U&I Research Center

Key words : Vascular Stent, Drug Eluting Stent (DES), Balloon Catheter, Ni-Ti alloy, von-Mises Stress, Restenosis

1. 서론

혈관질환의 치료방법에는 과거 외과적 수술방법이 주로 적용되었으나 최근에는 풍선 카테터(balloon catheter)와 혈관용 스텐트(vascular stent)를 이용하여 시술하고 있다. 풍선 카테터와 스텐트를 이용한 시술방법은 좁아지거나 막힌 혈관부위에 금속망 형태의 임플란트를 삽입하여 혈액의 흐름을 정상화 시키므로 기존의 흉부외과적 수술보다는 안전하고 수술성공률이 높다. 그러나 혈관용 스텐트는 삽입 후에 혈전, 병리적인 재생 등의 문제점을 가지고 있어 장기적으로 원활한 혈류유동을 유지하기 어려우며 재협착(restenosis)이라는 치명적인 문제점이 발생한다.⁽¹⁾ 이러한 문제점을 해결하기 위해 혈전을 분해시키는 약물 방출형 스텐트(Drug Eluting Stent, 이하 DES)가 개발되어 시판되고 있다. 2002년 경의 초기 DES는 높은 탄성계수와 내부식성을 갖는 스테인리스 강(stainless steel)이 주로 사용되었으나, 2004년 이후부터는 형상기억합금 중의 하나인 니티놀(Ni-Ti alloy) 및 생체친화성이 높은 코발트-크롬 합금(Co-Cr alloy)을 이용한 스텐트를 사용하고 있다. 미래형 DES는 재협착의 위험시기까지 약물방출이 완료된 후 스텐트 구조자체는 인체조직에 흡수되는 마그네슘 합금(Mg alloy)을 기초로한 스텐트가 개발될 것으로 예상된다. 이러한 스텐트의 재료는 1) 기본적으로 초탄성을 보유하고 압축시 재료의 변형이나 파괴에 대한 인성이 강해야한다. 2) 삽입관 통과 시 마찰저항이 작아야 한다. 3) 체내에서 부식이 되지 않아야 하며 인체에 삽입 후 단기적으로는 혈전의 유발가능성이 적고 장기적으로는 주변의 세포와 조직의 면역반응을 과도하게 유발하지 않아야한다. 유연성 결여, 불균형 팽창, 그로 인한 스텐트 구조 파괴는 혈관의 손상을 야기하고, 팽창 후 탄성회복 및 직경방향의 강도 부족으로 인한 구조 파손을 유발한다. 결국, 반경축소는 재협착으로 이어지기 때문에 구조설계와 재료특성은 매우 중요하다.⁽²⁾ 따라서 본 연구에서는 자가팽창형 DES의 개발을 위하여 스텐트의 재료인 스테인레스 강, 니티놀, 코발트-크롬 합금, 마그네슘 합금의 기계적 물성과 스텐트의 형상에 따른 von-Mises stress를 거동을 해석하였고, 응력집중이 발생하는 부분을 FE Model를 이용하여 평가하였다. 본 연구는 DES의 재료와 구조가 팽창성과 응력분포에 미치는 영향의 기초자료로 활용될 예정이다.

2. 스텐트 형상에 따른 모델링 및 유한요소 해석

본 연구에서 적용된 DES는 금속 원통형에 사각모양의 패턴으로 가공되었다. 이러한 DES는 Fig. 1과 같이 팽창하였을 경우 다이아몬드의 형태를 갖는 유한요소모델로 제작하였고 요소망은 삼각형 사면체 요소망을 사용하여 3가지 모델의 DES에 적용하였다. 3차원 유한요소로 제작된 DES는 원통형의 축만 고정하였고, 팽창에 따른 직경과 길이의 축소가 일어나도록 구속하였다. 하중은 풍선 카테터의 팽창을 적용하기 위해 0.5MPa의 후프압력으로 팽창하도록 설정하였다.⁽³⁾ 유한요소 해석을 수행하기 위하여 Table 1에 제

Table 1 Mechanical properties of vascular stent

Vascular stent material	Young's modulus, (E) GPa	Poisson's Ratio, (ν)	Yielding stress, (σ _y) MPa
Stainless steel	193	0.31	207
Ni-Ti alloy	28	0.30	100
Co-Cr alloy	200	0.29	690
Mg alloy	45	0.35	193

시된 결과를 적용하였다. 유한요소 해석은 스테인레스 강, 니티놀, 코발트-크롬 합금, 마그네슘 합금을 각각 3가지 DES 세션(hair line) 형상에 적용하여 재료와 스텐트 구조에 따른 응력분포와 응력집중 현상을 평가하였다.

3. DES 형상과 재료에 따른 응력변화

혈관용 DES는 일반적으로 수축되어 있는 상태로 관상동맥의 병변부까지 삽입되었다가 풍선 카테터의 확장에 의해 팽창하게 된다. 본 연구에서는 혈관용 DES가 병변부에서 확장될 때 DES의 형상과 재료에 따라 최대 von-Mises stress와 응력분포가 어떻게 변화하는가 살펴 보았다. 그 결과, Fig. 1에 제시된 바와 같이 DES의 구조는 세션 굴곡부의 응력분포에 지대한 영향을 미침을 알 수 있었다. Fig. 1은 니티놀 합금(Ni-Ti alloy) 재료의 세션을 이용하여 3가지 형상의 DES를 모델링하여 응력분포를 평가한 결과이다. Fig. 1(a)에 제시된 Model-A를 팽창시킬 경우 최대 von-Mises stress는 화살표로 제시한 것과 같이 S자 세션과 직선세션 부가 만나는 연결부마다 반복적으로 나타남을 관찰할 수 있었다. Model-B는 양끝단 코너부에서 최대 von-Mises stress가 반복적으로 나타난다. Model-C는 중앙 연결부에서 최대 von-Mises stress가 나타난다. Model-A의 최대 von-Mises stress는 74.6MPa이고 Model-B와 Model-C는 각각 18.5MPa, 148.8MPa를 나타내고 있다. Fig. 1(a), (c)에 제시한 Model-A, Model-C는 공통적으로 양끝단이 벌어지는 현상이 발생함을 관찰할 수 있다. 그러나, Fig. 1(b)의 Model-B는 Model-A, Model-C와 달리 DES의 중앙부터 양끝단까지 벌어짐 없이 거의 평행함을 알 수 있다. Model-A, Model-B와 같이 양끝단의 벌어짐은 관상동맥 내에서 혈관벽을 손상시켜 세포증식을 활성화시키고 결국 재협착의 원인이 된다. Fig. 2는 스텐트 형상과 재료에 따른 최대 von-Mises stress를 나타내는 그래프이다. Model-A와 Model-C는 스테인레스 강, 마그네슘 합금, 니티놀, 코발트-크롬 합금의 순서로 높은 von-Mises stress를 나타내고 있다. 세가지 모델 모두 스테인레스 강이 가장 높은 von-Mises stress를 나타냈고, 팽창에 따른 높은 응력집중이 발생된다. 따라서 스테인레스 강 스텐트는 높은 응력집중과 연결구조의 파손을 쉽게 유발하고 반경축소를 유도하여 혈관내벽에 손상을 야기한다. 이러한 혈관내벽에 손상은 재협착에 원인으로 발생하게 된다. Fig. 2와 같이 Model-B는 Model-A, Model-C보다는 낮은 응력 값을 나타내며 재료의 특성에서 비교할 때 코발트-크롬을 제외하

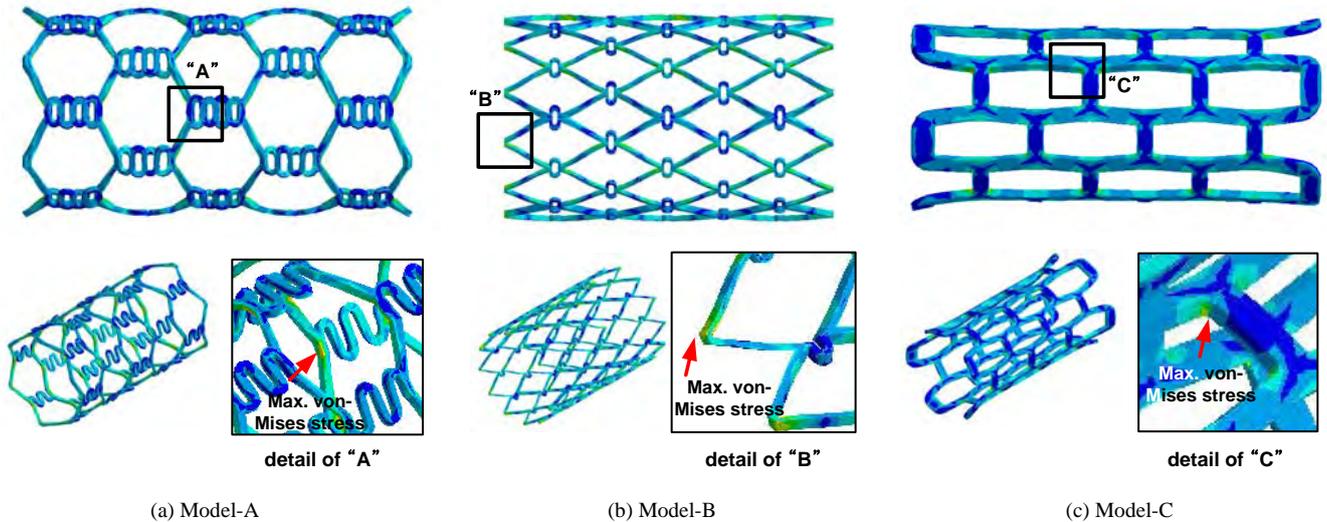


Fig. 1 FE model and stress distribution of Model-A, Model-B and Model-C in the case of Ni-Ti alloy DES

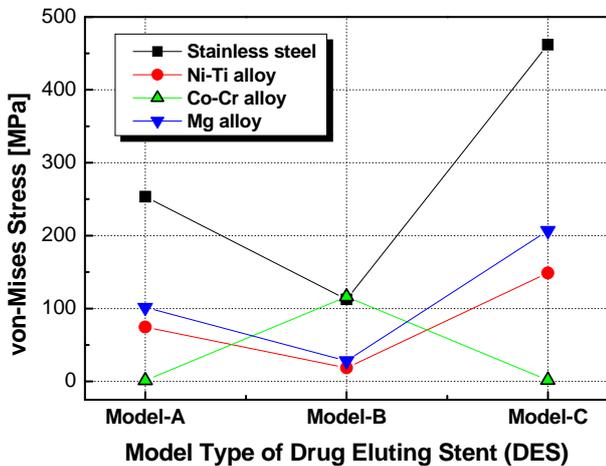


Fig. 2 Relationship between von-Mises stress and materials of Model-A, Model-B and Model-C in the drug eluting stent

고는 다른 모델보다 낮은 von-Mises stress를 나타내고 있어 스텐트 형상으로 매우 적합하다. 또한 팽창에 따른 양끝단의 벌어짐 없이 평행하게 팽창하여 혈관내벽을 손상시키지 않는 구조이므로 재협착과 만성염증으로부터 가장 안전한 스텐트 구조임을 유한요소해석 결과로 알 수 있다. 한편, 최대 von-Mises stress는 Model-C > Model-A > Model-B의 순서임을 Fig. 2를 통해 알 수 있다. 그러나, 코발트-크롬을 살펴보면 다른 세가지 재료와 다른 거동을 나타냄을 알 수 있다. 즉, 스텐트 형상과 재료의 관계는 일정한 규칙성보다는 세선구조의 설계에 따라 매우 민감하게 반응한다는 것을 알 수 있다. 전체적으로 살펴보면, Model-B와 같이 von-Mises stress가 낮고 스텐트가 팽창할 때 균형적으로 팽창하는 구조적 설계가 가장 우수하다고 판단된다. 추가적으로, 스텐트 팽창에 따라 응력집중이 일어나는 부분에서의 효과적인 응력집중감소 설계만 이루어진다면 스텐트의 파손과 재협착을 획기적으로 방지할 수 있는 스텐트의 구조 및 재료선택을 할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는 혈관용 스텐트의 재료와 형상에 따른 모델링을 하였으며, 유한요소해석을 이용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) Model-A를 팽창시킬 경우 최대 von-Mises stress는 중앙부의 S자 세선과 직선세선부가 만나는 연결부마다 반복적으로 나타남을 관찰할 수 있었다. Model-B는 양끝단부에서 최대 von-Mises stress가 반복적으로 나타난다. Model-C는 중앙의 구조물 연결부에서 최대 von-Mises stress가 나타냄을 알 수 있다.
- (2) Model-A와 Model-C는 양끝단이 중앙부보다 더 벌어지는 현상이 발생함을 확인할 수 있었고, Model-B는 중앙부터 양끝단까지 벌어짐 없이 거의 평행함을 알 수 있다. 따라서 Model-A와 Model-B는 양끝단의 팽창이 혈관내벽을 손상시켜 세포증식을 활성화시키고 만성 염증을 발생시켜 재협착으로 이어진다.
- (3) 3가지 모델에서는 스테인레스 강, 마그네슘 합금, 니티놀, 코발트-크롬 합금의 순서로 높은 응력 분포를 나타내고 있으며, 3가지 모델의 형상에서 가장 낮은 응력을 나타내고 있는 Model-B가 우수한 모델이라는 것을 알 수 있다.
- (4) 스테인레스 강의 재질을 사용한 스텐트는 다른 재질을 사용한 스텐트보다 매우 높은 von-Mises stress를 나타내고 있다. 코발트-크롬 합금은 Model-B를 제외하고는 낮은 응력을 나타내고 있어 코발트-크롬 합금을 이용하여 Model-A, Model-C를 설계할 경우 낮은 von-Mises stress를 얻을 수 있다.

후 기

본 연구는 보건복지부 제품화 사업(No. A06-00043711)으로 수행 되었습니다. 이에 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참고문헌

1. Y. H. Choe, J. H. Park, J. K. Han, M. C. Han, C. W. Kim, "An Experimental Study on the Influence of the Intravascular Gianturco type Stents on the Vascular Structures," Journal of Korea Radiological Society, Vol. 27, No. 4, pp.431~439, 1991.
2. Paul Barraagan, Regis Rieu, Vincent Garitey, Pierre-Olivier Roquebert, Joel Sainsous, Marc Slivestri and Gilles Bayet, "Elastic Recoil of Coronary Stents: A Comparative Analysis," Catheterization and Cardiovascular Interventions, Vol. 50, pp. 112-119, 2005.
3. B. K. Oh and H. Y. Cho, "Finite Element Analysis of Stent Expansion Considering Stent-Balloon Interaction," Journal of KSME, A, Vol. 29, No. 1, pp. 156~162, 2005.