

골밀도를 고려한 척추의 생체역학적 평가

김동율*(고려대 대학원 기계공학과), 채수원(고려대 기계공학과), 최귀원(한국과학기술연구원)
이태수(서강대 기계공학과), 박정율, 서중근(고려대 의료원)

Biomedical evaluation of the vertebra based on bone density

D. R. Kim(Mech. Eng. Dept, KU.), S. W. Chae(Mech. Eng. Dept, KU)
K. W. Choi(Biomedical Research Center, KIST), T. S. Lee(Mech Eng. Dept, SKU)
J. Y. Park, J. G. Suh(Depart of Neurosurgery, KU Hospital)

ABSTRACT

In this paper, three-dimensional finite element analysis have been performed to investigate the biomechanics of vertebroplasty in patient. In order to apply various properties of the spine, the functional relation between the well-known apparent density and HU(Hounsfield unit) from CT image were employed and thus real material property can be assigned to each element of FE model. The FE analysis showed similar results with the experiments. With this approach accurate analysis of the spine and the clinical application can be expected.

Key Words : Vertebroplasty(척추성형술), Osteoporosis(골다공증), Biomechanical study(생체역학적 연구), Finite element analysis(유한요소해석), PMMA(Polymethylmethacrylate), Compression fracture(압박골절), Material properties(재료물성치)

1. 서론

골다공증으로 인하여 발생하는 척추 압박골절(compression fracture)은 구조적으로 척추체(vertebral body)가 압박됨으로 인하여 골조직의 부피 감소와 변형을 일으키며 이로 인하여 척추체의 기능을 상실하게 되고 생체역학적인 변화로 인하여 연부 및 신경조직에 대한 이차적인 압박을 유발하여 신경계의 장애나 나아가서는 심한 통증을 일으키게 된다. 골다공증에 의한 척추 압박골절은 골조직의 부피와 내용이 감소하면서 뼈가 가벼운 충격에도 쉽게 발생하는 것으로 뼈의 골질 중 가장 흔하게 발생하는 질환이다.[1, 7] 골다공증에 의한 척추 압박골절에 대한 수술법 중 척추성형술은 병적으로 압박된 장력 보완, 안정적 구조 유도 및 통증의 완화를 목적으로 압박된 척추체내로 인공 생체물질인 골 강화제를 주입하는 방법이다.[2, 3]

본 연구에서는 골다공증 환자의 압박골절을 치료하기 위해 사용되고 있는 척추 성형술을 유한요소법을 이용하여 정량적으로 평가하고자 하였다. 이를

위해 뼈에 대한 유한요소모델 생성시 골피질, 해면골, 인공삽입물 등을 구분 생성하여 각 부위별 물성치를 적용할 수 있도록 하였다. 특히 요소별로 물성치를 적용하게 되므로 해면골 등을 보다 정확하게 모델링할 수 있게 되어 보다 정확한 흉추의 해석이 가능하게 된다.

2. 유한요소 모델링

본 연구의 유한요소 모델은 골다공증환자의 CT를 바탕으로 하였다. 이 CT는 1mm 간격으로 촬영된 흉추(thoracic) T10에서 요추(lumbar) L2 사이의 단면 영상정보이며, 실제 골다공증 환자들에게서 골절이 가장 많이 발생하는 부위인 T12 흉추의 데이터를 추출하여 3차원 척추모델을 생성하였다.[5, 6]

2.1 흉추의 모델링

CT의 영상 데이터로부터 얻어진 점들을 바탕으로 피질골(cortical bone)과 망상골(trabecular bone)을 구별하여 Fig. 1 (b)에서 보는 바와 같이 모델링하였

다. Fig. 2 는 모델링한 흉추 T12의 크기를 나타내고 있다. 흉추 상부와 앞부분의 변화상태를 알아보기 위함이므로 후방요소인 횡돌기(transverse process)나 상관절돌기(superior articular process), 극돌기(spinous process)등은 모델링에서 제외하였다.

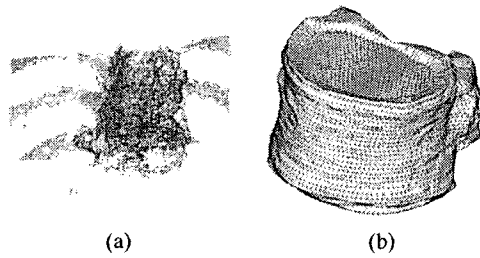


Fig. 1 Modeling of CT image

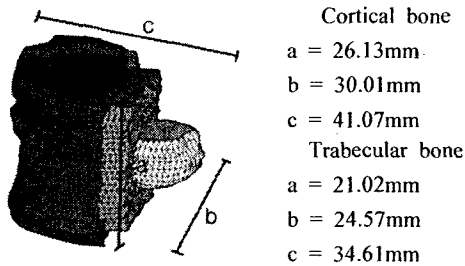


Fig. 2 Cortical bone and trabecular bone of T12

2.2 척추체 삽입물(PMMA)의 모델링

골다공증 환자의 골절 척추체에 주입하는 PMMA(polymethylmethacrylate)는 Fig. 3 (a) 에서 보는 바와 같이 CT 영상을 바탕으로 Fig. 3 (b) 와 같은 형상으로 모델링 하였다.

척추성형술 시술시 부위당 4~8cc 정도의 골 시멘트를 주입하는데, 실험적으로는 추체 용적의 약 30% 정도가 적당하다는 보고가 있으며, 본 연구의 유한요소 모델에서의 PMMA는 약 6.93cc이며, 이는 추체 용적 30%보다 조금 적은 양이다. 이와 같이 구성항 정상 흉추와 PMMA를 주입 한 흉추 모델의 피질골, 망상골, PMMA에는 모두 사면체 선형요소(C3D4)를 사용하였다.

2.3 하중조건

해석에 사용된 하중조건은 체중이 70kg인 사람이 양손에 20kg의 물체를 들고 서 있을 때 척추 T12 상부에 미치는 측정값을 사용하였다. 이 값은 기존의 임상 실험을 통하여 얻은 값이며, 이때 흉추 상부에 미치는 총 힘은 1500N이다.

또 실제 추체의 움직임을 고려하여 흉추 밑부분의 일부 절점 단을 고정하였으며 뒷부분의 절점은 Z

방향으로 움직일 수 있도록 하였다. 하중의 적용은 추체 상부 표면의 각 요소에 수직으로 가해지도록 구성하여 상부 추간관에서의 힘 전달과 유사하도록 하였다.

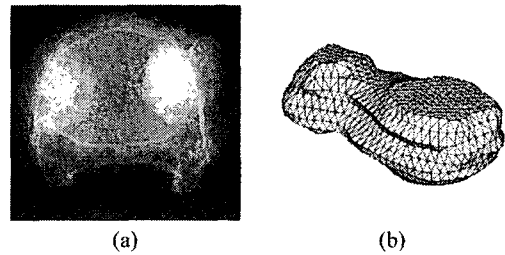


Fig. 3 PMMA model

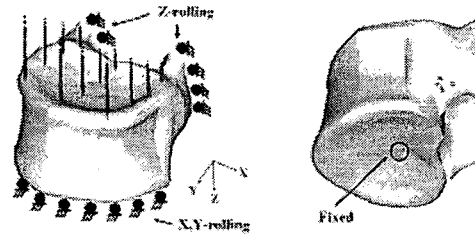


Fig. 4 Loading conditions

2.4 물성치 적용

망상골에 단일 물성치를 적용치를 적용한다는 것은 실제 모델과 다른 해석 결과를 야기할 수 있다.

본 연구에서는 기존의 알려진 겉보기 밀도 (apparent density, ρ)와 CT 영상의 HU(hounsfield unit or CT number)의 함수관계 식 (1) 을 이용하여 해석에 필요한 물성치를 얻었으며, 이를 척추체 모델의 각 요소별 매핑을 수행하여 물성치를 적용함으로써 실제 흉추와 가까운 값을 대입하였다.[4]

$$\rho(\text{g/cm}^3) = 0.00130 * (\text{CT-number}) + 0.103 \quad (1)$$

$$E = 785.93 \rho^{1.7215} \text{ [MPa]}$$

본 연구에 적용된 망상골 부분 물성치 범위는 Fig. 5 에서 보는 바와 같이 알려진 환자의 물성치 보다 큰 범위를 가짐을 알 수 있다. PMMA의 물성은 PMMA가 흉추내에 삽입되어 망상골과 섞여 있을 때의 물성치를 적용하였다. 이때 PMMA 는 고분자 분말(polymer powder)과 MMA (methylmethacrylate)의 비율이 1.5g/ml 인 상태로 주입되었으며 적용 물성치는 실험치의 평균값을 적용하였다.

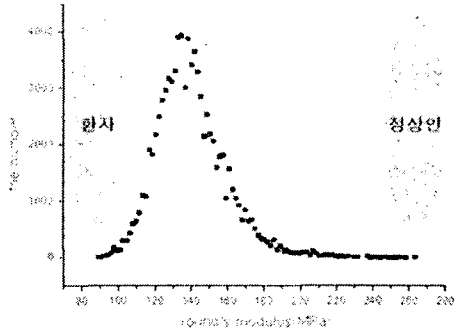


Fig. 5 Distribution curve of material properties

Table 2 Material properties

		Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio
Normal person	Cortical bone	17583	0.3
	Trabecular bone	264	0.2
Patient	Cortical bone	6495	0.3
	Trabecular bone	80 ~ 270	0.3
PMMA		540	0.3

유한요소해석은 여섯 가지 모델로 구분하였으며, 이렇게 구성한 모델은 모두 사면체 선형요소(C3D4)를 사용하였으며, 유한요소 해석은 상용프로그램인 ABAQUS™를 이용하였다. 구성된 모델을 바탕으로 흉추 상부의 변위와 골절이 가장 많이 발생하는 흉추 앞부분의 응력분포를 다음과 같이 분류하여 조사하였다.

- case 1 : 척추성형술 시술 전 환자로 단일 물성치 적용
- case 2 : 척추성형술 시술 전 환자로 불균일 물성치 적용
- case 3 : 척추성형술 시술 후 환자로 단일 물성치 적용
- case 4 : 척추성형술 시술 후 환자로 불균일 물성치 적용
- case 5 : 골밀도가 높은 정상인
- case 6 : 골밀도가 낮은 정상인

3. 해석결과

Fig. 6 (a)는 단일 물성치를 적용한 유한요소 모델의 해석결과로 골다공증 환자의 경우 흉추 윗판의 중앙 변위가 약 0.17mm 였으나 PMMA 주입 후 0.15mm로 변위가 감소함을 알 수 있으며, Fig. 6 (b)는 불균일 물성치를 적용한 해석 결과로 골다공증 환자의 경우 변위가 0.14mm에서 PMMA 주입 후 0.12mm로 변위가 감소함을 알 수 있었다. 이는 추체내에 주입된 PMMA가 골다공증으로 골밀도가 감소한 추체에 미치는 힘을 분산하여 과도한 변형이나 골절을 방지해 줄 수 있다.

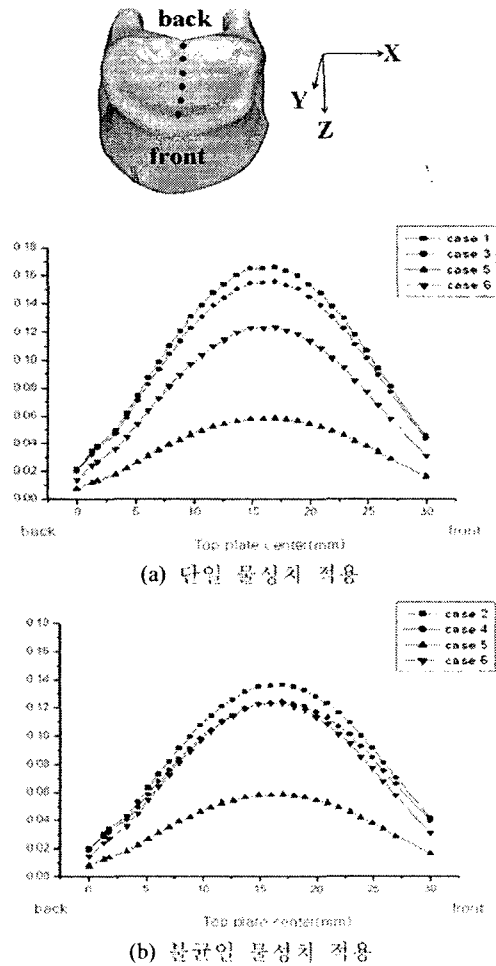


Fig. 6 Displacements of top plate

Fig. 6 (a)와 (b) 비교해 볼 때, 단일 물성치 적용 시보다 불균일 물성치를 적용하여 유한요소 해석을 할 때 골밀도가 낮은 정상인의 변위차에 근접함을 알 수 있다.

다음은 흉추에서 골절이 많이 일어나는 추체 전방부의 압축응력(minimum principal stress)을 알아보았다. 골다공증 환자의 경우와 PMMA 를 주입한 환자의 경우에 대하여 비교하여 보았으며, 물성치가 다른 정상인은 비교에서 제외하였다.

Fig. 7 에서와 같이 추체의 전방부 피질골 안쪽 부분의 압축응력 비교에서 보는 바와 같이 골다공증 환자의 경우 추체 전방부위(5mm~10mm)에 상대적으로 많은 압축 응력이 발생함을 알 수 있으며, 척추성형술 시술 후 추체내 주입된 PMMA가 전방부 피질골의 압력을 분산하여 골다공성 척추의 보원역할을 해내고 있음을 알 수 있다. 추체 상부의 변위차에서와 마찬가지로 추체 전방의 압축 응력 또한 단일 물성치 적용 시와 불균일 물성치 해석 시 결과 값이 다름을 알 수 있다.

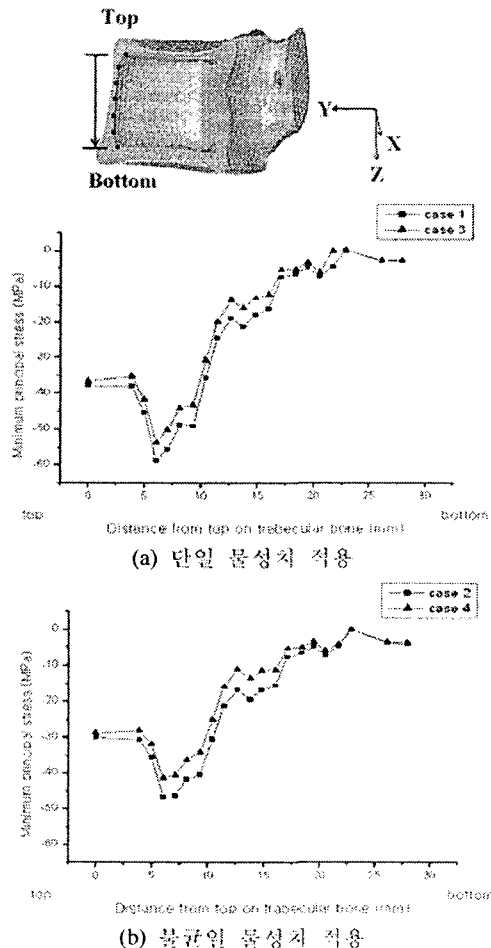


Fig. 7 Minimum principal stress of vertebral body on front

4. 결론

본 연구에서는 척추성형술 시술시 PMMA 주입에 따른 흉추의 생체 역학적 특성 변화를 연구 하였다. 연구방법에 있어 대부분의 생체에 대한 자동 요소망 생성 기법들이 골피질, 해면골, 인공삽입물 등을 구분하지 않고 하나의 영역으로 요소망을 생성하였으나, 그러나 본 연구에서는 생체의 물성에 따라 체적을 구성하고 각 체적에 대해 요소망을 독립적으로 생성하기 때문에 골피질, 해면골, 인공 삽입물 등을 구분하여 물성치를 적용할 수 있었으며, 이는 기존의 단일 물성치 적용 연구법보다 한 단계 발전된 연구 방법이며, 이는 실제 임상 결과에 보다 근접한 결과를 보인다.

후기

본 연구는 과학재단에서 지원하는 특정기초연구 (과제번호 : R01-2001-000-00374-0, 과제명 : 척추 성형술의 생체 역학적 연구)를 통하여 수행되었습니다.

참고문헌

1. Jensen M. E., Evans A. J, Mathis J. M., et al., "Percutaneous polymethylmethacrylate vertebroplasty in the treatment of osteoporotic vertebral body compression fractures", Technical aspects, AJNR Am J Neuroradiol 18, pp. 1897-1904, 1997
2. Cotten A., Boutry N., Cortet B., et al., "Percutaneous vertebroplasty : state of the art", RadioGraphics 18, pp. 311-320, 1998.
3. Michael A.K. Liebschner, William S. Rosenberg and Tony M. Keaveny, "Effect of bone cement volume and distribution on vertebral stiffness after vertebroplasty", SPINE Volume 26, Number 14, pp. 1547-1554, 2001.
4. 문희욱, "척추성형술에서 MMA 주입에 의한 망상골의 압축강도 변화 연구?" 의공학회지, Vol. 24, No. 4, 2003.8.
5. G.H. Kwon, S.W. Chae, K.J. Lee, "Automatic Generation of Tetrahedral Meshes from Medical Images", J. Computers & Structures, Vol.81, issues 8-11, pp.765-775, 2003. 5.
6. 이준형, "척추성형술에서 PMMA주입에 대한 생체 역학적 평가", 의공학회지, Vol. 25, No. 1, pp.27-32, 2004.
7. 이연 외 13인, "척추성 통증의 최소침습적 치료", 대한정위기능신경외과학회, 2004.