

# 척추 해면골에 대한 미세 유한요소모델의 탄성 및 소성특성에 관한 연구

우대곤(연세대 보건과학대학 의공학과), 김한성(연세대 보건과학대학 의공학과)  
원예연(아주대 정형외과), 백명현\*(아주대 정형외과), 탁계래(건국대 의공학학과)

## The elastic and plastic behaviour of the micro-FE models for vertebral trabecular bones

D. G. Woo (Department of Biomedical Engineering, College of Health Science, Yonsei University)  
H. S. Kim (Department of Biomedical Engineering, College of Health Science, Yonsei University)  
Y. Y. Won (Department of Orthopaedic Surgery, Collage of Medicine, Ajou University)  
M. H. Baek\* (Department of Orthopaedic Surgery, Collage of Medicine, Ajou University)  
G. R. Tack (Department of Biomedical Engineering, Collage of Medicine, KonKuk University)

### ABSTRACT

In this study, the micro-FE analyses were carried out for the plastic behaviour of vertebral trabecular bones. Many researchers have investigated the elastic behaviour of trabecular bones by using the micro-finite element models based on the micro-CT images. However, there was no micro-FE model to account for the plastic behaviour of trabecular bones. Ulrich et al. reported that best results at coarser model were obtained when using 'compensated hexahedron models' with the same relative density. This study indicates that, for the elastic and plastic analysis, 'the compensated hexahedron FE model' is likely to be limited to about 63 $\mu$ m image resolution in the vertebra trabecular bones.

**Key words :** Vertebral trabecular bone (척추 해면골), Micro-FE model (미세 유한요소모델), The elastic and plastic behaviour (탄성 및 소성특성), Voxel (복셀)

### 1. 서론

최근 많은 연구자들이 해면골의 특성을 분석하기 위하여 미세 전산화 단층촬영(Micro-CT) 이미지를 기반으로 하는 미세 유한요소기법을 사용하고 있다. 이 기법은 Micro-CT 로 촬영한 영상을 복셀 형태의 육면체 유한요소로 변환하여 3 차원 미세 구조모델을 생성하고, 선형과 비선형의 유한요소해석을 수행할 수 있다. Micro-CT 기반의 미세 유한요소기법은 인체 해면골의 기계적 거동 분석에도 사용되고 있다. 그러나 대다수 연구들은 인체 해면골의 기계적 특성 중 주로 탄성특성을 조사하였으며, 소성 특성에 대한 연구는 부족한 실정이다. Ulrich 등(1998)과 변철진 등(2001)은 한 변의 길이가 4mm 인 정육면체 미세 유한요소모델을 사용하여 인체 해면골의 3 차원 미세 유한요소해석을 수행하고 탄성특성을 분석하였다.

본 논문에서는 Micro-CT 이미지를 기반으로 복셀 크기를 조절하여 미세 유한요소모델을 구성한 다음, 척추 해면골의 미세 유한요소모델에 대한 탄성 특성뿐 아니라 소성특성도 분석하였다. 본 논문의 목적은 Micro-CT 이미지의 해상도를 조절하여 척추 해면골에 대한 미세 유한요소모델을 구현한 후, 복셀 크기(해상도)에 따른 미세 유한요소모델의 탄성 및 소성 특성의 정확성을 비교 분석하는 것이다. 본 연구는 Ulrich 등(1998)이 한 변의 길이가 4mm 인 정육면체 시편에 대하여 분석한 탄성특성 결과와 상대 비교하기 위하여 그들이 사용한 시편과 동일한 크기를 사용하였다.

### 2. 재료 및 방법

#### 2.1 척추시편 제작

인체 척추해면골을 Fig 1(a)과 같이 전상부에서

후하부로 관통하도록 한 다음, 직경 11mm 의 원통형 해면골 시편을 Fig. 1(b)과 같이 제작하였다.

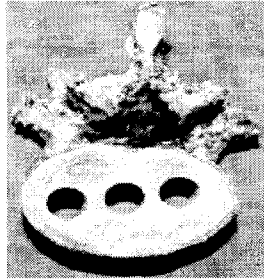


Fig. 1(a) Vertebral bone

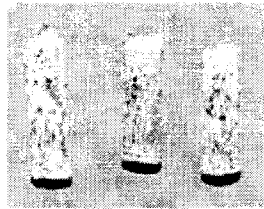


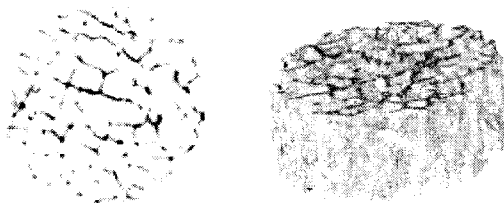
Fig. 1(b) Bone cylinders from vertebral bone

## 2.2 시편의 3 차원 모델링

척추 해면골 시편을  $\mu\text{m}$  단위로 2 차원 단면 촬영을 가능하게 하는 미세 전산화 단층촬영기법 (Micro-CT)을 사용하여 장축에 직각이 되는 2 차원 횡단면 영상(픽셀크기 :  $21.3\mu\text{m} \times 21.3\mu\text{m}$ )을 Fig. 2(a)와 같이 촬영하였다.

### 2.2.1 3D image 구축

Fig. 2(b)는 척추 해면골 시편의 2 차원 이미지를 복셀 요소를 사용하여 구성한 3 차원 이미지 모델이다.



(a) 2D image (Micro-CT) (b) 3D image (voxel)

Fig. 2 Images of vertebral trabecular bone specimen

### 2.2.2 Side length : 4mm 시편 제작

Fig. 3 은 3D image 의 척추 해면골 시편의 중앙부분을 선택하여 한 변의 길이가 4mm 인 척추 시

편을 만든 것이며, 정육면체 요소들로 이루어져 있다.

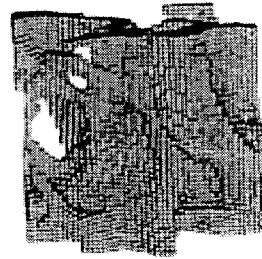


Fig. 3 3D Reconstruction model of the bone cube (side length : 4mm)

### 2.2.3 재료의 물성치

Ulrich 등(1998)이 정육면체 시편에 대하여 분석한 탄성특성 결과와 상대 비교하기 위하여 그들이 사용한 물성치와 동일한 물성치를 적용하였다. 모든 모델에 대하여 미세 유한요소해석에 적용된 물성은 등방성이며, Young's modulus, 포와송비, 항복응력 등은 Table 1 과 같다.

Table 1. Material property of vertebral trabecular bone

	탄성계수 (E ; GPa)	포와송비 ( $\nu = \Delta y / \Delta x$ )	항복응력 ( $\sigma$ ; MPa)
척추해면골	10	0.3	136

### 2.3 분석 방법

미세 전산화 단층촬영 이미지의 해상도 차이에 대한 시편의 탄성 및 소성특성 값의 차이를 알아보기 위하여 Table 2 와 같이 동일한 밀도를 가지는 5 개의 미세 유한요소모델 (42 $\mu\text{m}$ , 63 $\mu\text{m}$ , 84 $\mu\text{m}$ , 105 $\mu\text{m}$ , 126 $\mu\text{m}$  해상도 모델) 을 구성하였다. 본 연구에서는 동일한 밀도의 복셀 요소를 구성하기 위하여 '전체 이미지 추출(Global Thresholding)' 기법을 이용하였다.

Table 2. The relative bone volume of trabecular bone cube

해상도 한 변의길이	42 $\mu\text{m}$	63 $\mu\text{m}$	84 $\mu\text{m}$	105 $\mu\text{m}$	126 $\mu\text{m}$
4mm	11.3%	11.0%	11.2%	11.2%	11.2%

축방향 압축실험을 모사하기 위한 구속 및 하중 조건을 정육면체 시편에 추가하였다. 해면골의 미세 유한요소해석의 신뢰도를 위하여 상용 소프트웨어인 ANSYS5.7 (ANSYS, Inc)과 ABAQUS6.3 (HKS,

Inc) 두가지 소프트웨어를 사용하여 미세 유한요소 모델을 비교 분석하였다.

### 3. 결과

Micro-CT 를 이용하여 인체 척추해면골의 미세 구조를 분석하였다. Fig. 4(a), (b) 는 복셀 기반의 3D 모델들에 변위를 준 결과이며, 미세 유한요소해석을 통해 탄성 및 소성구간의 유효응력 분포를 도식하고 있다.



Fig. 4(a) Effective stress distribution of the elastic behavior

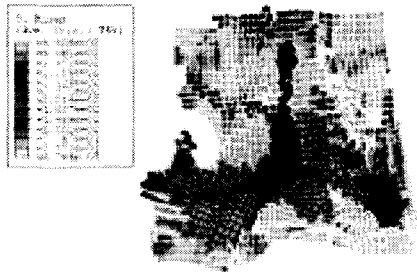


Fig. 4(b) Effective stress distribution of the plastic behavior

본 연구의 결과로부터 해면골의 압축응력에 의한 기계적 거동을 분석할 수 있었다. Table 3(a), (b) 은 모의 압축 실험에서 각 3D 모델들의 압축변위와 반력을 구한 것이다. Table 3(a)에서 보이는 바와 같이 선형 구간에서는 한 변의 길이가 4mm 인 정육면체 시편을 기준으로 0.02mm 의 변위를 준 결과, 0.5%의 변형율이 적용되었다. Table 3(b)의 비선형 구간에서는 각 해상도 모델들에 대해서 Fig. 5와 같이 반력이 가장 큰 지점들에서 변위를 구했다. 약 1.06E-01mm 정도의 변위를 가질 때 반력이 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 탄성과 소성구간 모두에서 해상도가 좋아짐에 따라 반력이 커짐을 볼 수 있다.

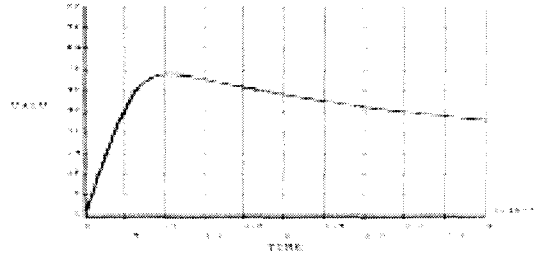


Fig. 5 Curve of reaction force

Table 3(a) Results of the elastic behavior

Image size	Reaction force (a unit : MPa)	Displacement (a unit : mm)
126 $\mu$ m	17.84	0.02
105 $\mu$ m	23.28	0.02
84 $\mu$ m	23.77	0.02
63 $\mu$ m	26.94	0.02
42 $\mu$ m	28.58	0.02

Table 3(b) Results of the plastic behavior

Image size	Reaction force (a unit : MPa)	Displacement (a unit : mm)
126 $\mu$ m	41.49	1.08E-01
105 $\mu$ m	57.70	1.06E-01
84 $\mu$ m	59.75	9.30E-02
63 $\mu$ m	69.58	1.11E-01
42 $\mu$ m	75.41	1.09E-01

Table 3(a), (b)의 데이터를 이용하여 탄성과 소성 특성에서 탄성계수와 파손응력을 구한 것을 Fig. 6 고 같이 그래프로 상대 비교 분석하여 나타내었다.

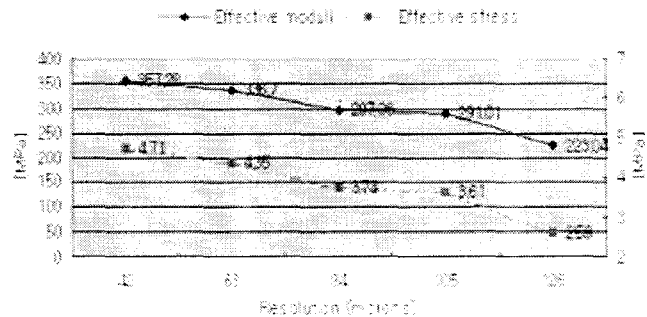


Fig. 6 The elastic behavior (effective moduli versus voxel size) and plastic behavior (effective yield stress versus voxel size) of trabecular bone specimens

동일한 밀도에서 126  $\mu\text{m}$  해상도 시편은 42  $\mu\text{m}$  해상도 시편보다 탄성계수는 37.57% 낮았으며 파손응력은 45.01% 낮았다. 반면 63  $\mu\text{m}$  해상도 시편의 경우, 탄성과 소성특성에서 5.76%, 7.64%정도 낮은 값을 보이고 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 척추 해면골에 대한 미세 유한요소모델의 탄성 및 소성특성을 분석하였다. Micro-CT 이미지의 해상도를 조절하여 복셀 크기에 따른 5 개의 미세 유한요소모델을 구현한 후 탄성 및 소성 특성의 정확성을 조사하였다.

Ulrich 등(1998)은 탄성특성에서 동일한 밀도로 보상한 정육면체 모델에서는 168  $\mu\text{m}$  해상도까지 좋은 결과를 보였다고 보고하였다. 그러나, 본 연구 결과는 126  $\mu\text{m}$  해상도 모델을 42  $\mu\text{m}$  해상도를 기준으로 하는 모델과 비교해 볼 때 탄성계수와 파손응력이 상당한 차이가 있었음을 볼 수 있었다. 결론적으로 척추 해면골에서는 소성특성뿐만 아니라 탄성 특성도 대략 63  $\mu\text{m}$  의 해상도 모델로 제한해서 사용하는 것이 적당하다고 사료된다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2002-000-00349-0)지원으로 수행되었음.

#### 참고문헌

1. D. Ulrich, B. van Rietbergen, H. Weinans, P. Ruegsegger, "Finite element analysis of trabecular bone structure : a comparison of image-based meshing techniques", J. Biomechanics, Vol. 31, pp. 1187-1192, 1998
2. P. Ruegsegger, B. Munch, M. Felder, "Early detection of osteoarthritis by 3D computed tomography". Technology and Health Care, Vol. 1, pp. 53-66, 1993
3. 변철진 외, "Micro-CT 를 이용한 대퇴골두 부혈성 괴사부 해면골의 기계적 특성에 관한 연구", 대한의용생체공학회 춘계학술대회 논문집, Vol. 24, pp. 22-23, 2001
4. 변철진 외, "Micro-CT 를 이용한 대퇴골두 해면골의 미세 유한요소 해석", 대한의용생체공학회 춘계학술대회 논문집, Vol. 24, pp.284-285, 2001
5. 손기욱 외, "Micro-CT 를 이용한 대퇴골두 및 장골의 해면골의 미세구조 분석", 대한의용생체공학회 춘계학술대회 논문집, Vol 24, pp.290-291, 2001