

형태학적 및 기계적 특성을 고려한 인체 척추 해면골 분석

Morphological and Mechanical Characteristics of Human Vertebral Trabecular Bone

이태우^{1,2}, 고창용^{1,2}, 우대곤^{1,2}, 조용민¹, 김광수¹, 임도형^{1,2}, *#김한성^{1,2}, 광대순³, 한승호³

T. W. Lee^{1,2}, C. Y. Ko^{1,2}, D. G. Woo^{1,2}, Y. M. Cho¹, K. S. Kim¹,
D. H. Lim^{1,2}, *#H. S. Kim(hanskim@yonsei.ac.kr)^{1,2}, D. S. Kwak³, S. H. Han³
¹연세대학교 의공학과, ²연세의료공학연구원, ³가톨릭의대 해부학교실

Key words : Vertebral Trabecular Bone, Finite Element Method, Morphological and Mechanical Characteristics

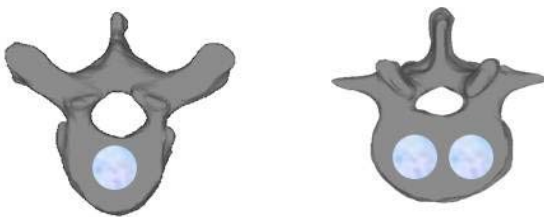
1. 서론

최근 고령화 사회로 인해 다양한 노인성 질환에 관한 관리가 중요시되고 있다[1-3]. 이로 인하여 대표적인 노인성 골격계 질환 중 하나인 골다공증의 관심이 증대되고 있고, 이러한 질환들의 치료를 위해 생체역학적 관점에서 다양한 접근이 시도되고 있다[3]. 사람의 뼈는 다공성 복합물질(Porous Composite Material)로써 이것의 기계적 거동을 충분히 이해하기 위해서는 기계적 특성뿐만 아니라 형태학적 특성도 고려되어야 한다. 이에 최근의 뼈 관련 연구에서는 유한요소법(Finite Element Method)과 미세 전산화단층촬영시스템(Micro-Computed Tomography)을 이용하여 그 특성을 파악하고자 활발한 연구가 수행되고 있다[4-7]. 과거 해면골에 관한 다양한 연구에서는 동일부위의 뼈를 여러 사체에서 획득하여 한정된 영역에서의 기계적 특성을 주로 연구하였다[7-8]. 또한 형태학적 특성 및 골밀도 등을 관찰하고 그 결과로 뼈의 특성을 단정 짓는 한계점이 발견되기도 하였다.

본 연구에서는 미세 전산화단층촬영시스템과 미세 유한요소법을 이용하여 사체 한구에서 획득한 모든 등뼈와 허리뼈의 형태학적 특성 및 기계적 특성을 비교 관찰하여 척추의 거동 및 연속 척추체의 구조상 특징 등을 알아보고자 하였다.

2. 실험방법

본 연구를 위해 70세 남성 사체에서 척추뼈 17개(등뼈: 12개, 허리뼈: 5개)를 획득하였다. 뼈는 Fig. 1과 같이 일정 크기의 관심영역(척추체의 중앙)을 선정한 뒤 미세 전산화단층촬영시스템(μ -CT; Skyscan-1076, Skyscan, Belgium)을 이용하여 18 μ m의 해상도로 촬영하였다(한국과학기술정보연구원 제공).



(a) Thoracic vertebra (b) Lumbar vertebra
Fig. 1 Region of interest in vertebra

획득한 영상을 기반으로 뼈의 형태학적 특성을 결정하는 구조적 파라미터를 측정하였다. 여러 구조적 파라미터(Structural parameters) 중 골 체적비(BV/TV; Volume fraction), 골소주 두께(Tb.Th; Trabecular thickness), 골소주간 거리(Tb.Sp; Trabecular separation), 골소주 개수(Tb.N; Trabecular number), 구조적 모델 지수(SMI; Structure model index), 이방성 정도(DA; Degree of anisotropy) 등을 선정하였다.

뼈의 기계적 특성을 예측할 수 있는 구조적 탄성계수(E^{\dagger})를 유한요소법을 이용하여 관찰하였다. 미세 전산화단층촬영시스템으로 획득한 영상을 기반으로 유한요소모델을 만들기 위해 Bionix 3.3(Cantibio Co., Korea)을 사용하였다. 유한요소모델에서의 복셀 해상도 효과를 분석한 우대곤 등[9]의 연구결과에서 84 μ m 모델 해상도까지는 비교적 일관된 탄성계수를 측정할 수 있다고 하였다. 선행 연구결과에 근거하여 본 연구에서의 유한요소모델은 복셀 해상도가 70 μ m인 4mm \times 4mm \times 4mm크기로 제작하였다. Hypermesh 7.0(Altair Co., USA)에서 제작된 유한요소 모델에 압축하중조건을 부가하였고 Rietbergen 등[10]의 결과를 바탕으로 구조적 파라미터 체적비와 유한요소 모델의 체적비를 같게 하였다. 유한요소모델에 Ulrich 등[4]이 사용한 물성치(Table 1)를 적용하였고 모든 모델은 등방성이라고 가정하였다. 전산모의실험에서 시편의 축방향으로 가해지는 수직 압축 실험을 수행하기 위해 ABAQUS 6.4(HKS, Inc., USA)를 사용하였다. 모델의 탄성 특성을 분석하기 위해 3차원 유한요소 모델의 상단부에 0.02mm(변위의 0.5%)의 변위까지 압축을 허용하도록 압축하중 조건을 부가하였다.

본 연구를 통해 획득한 결과를 분석하기 위해 SPSS 12(SPSS Inc, USA)를 사용한 분산분석(ANOVA)을 시행하여 뼈의 구조적 특성과 기계적 특성간의 상관관계를 분석하였다.

3. 결과

미세 전산화단층촬영시스템을 통해 획득한 구조적 파라미터와 전산 모의실험에서 획득한 구조적 탄성계수의 기술통계량이 Table 2에 정리되어 있다. 구조적 파라미터와 구조적 탄성계수

Table 1 Material properties of vertebral trabecular bone

	Young's Modulus	Poisson's ratio
Property	10GPa	0.3

Table 2 Descriptive statistics of the structural parameters and the structural modulus

	BV/TV(%)	Tb.Th(mm)	Tb.Sp(mm)	Tb.N(mm ⁻¹)	SMI	DA	E^{\dagger} (GPa)
Thoracic vertebra	13.219 ± 4.298	0.154 ± 0.023	0.810 ± 0.081	0.845 ± 0.166	1.181 ± 0.480	2.667 ± 1.182	351.804 ± 173.221
Lumber vertebra	16.645 ± 11.931	0.167 ± 0.065	0.790 ± 0.151	0.899 ± 0.321	0.340 ± 0.269	4.535 ± 2.285	469.916 ± 388.101

Table 3 Correlation between morphological and mechanical characteristics

	BV/TV	Tb.Th	Tb.Sp	Tb.N	SMI	DA
E^{\dagger} Pearson Correlation	0.871**	0.890**	-0.632**	0.778**	-0.244	-0.565*

** : Correlation is significant at the 0.01 level.

* : Correlation is significant at the 0.05 level.

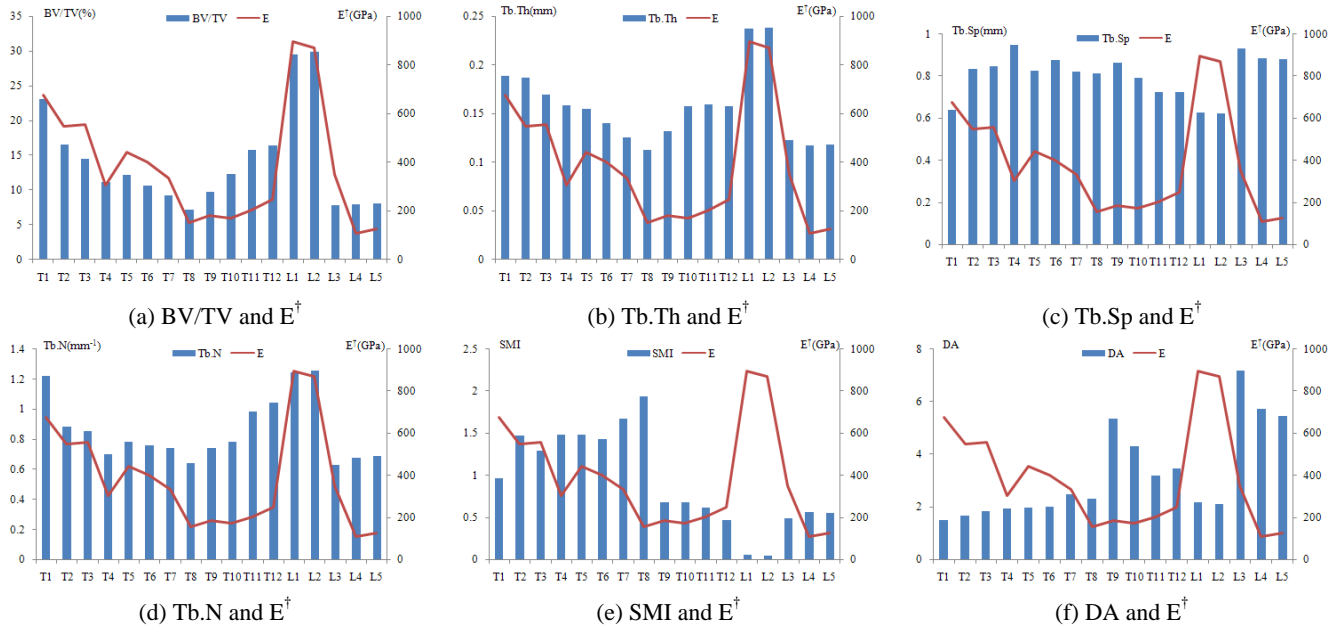


Fig. 2 Comparison between the morphological and the mechanical characteristics (T: Thoracic vertebra, L: Lumbar vertebra)

사이의 상관성을 나타낸 상관계수는 Table 3에 정리되어 있다. 두 특성 간의 상관성은 Tb.Th, BV/TV, Tb.N, Tb.Sp, DA, SMI 순으로 높았다. 구조적 탄성계수가 등뼈보다 허리뼈에서 더 크며 형태학적 특성 중 BV/TV, Tb.Th, Tb.N 역시 허리뼈에서 보다 등뼈에서 더 높게 측정되었다. Fig. 2는 등뼈와 허리뼈를 X축에 나열한 뒤 구조적 파라미터와 구조적 탄성계수를 비교해 보았다. 구조적 탄성계수는 목뼈와 맞닿아있는 첫 번째 등뼈, 그리고 등뼈와 맞닿아있는 첫 번째 허리뼈에서 비교적 높게 계산되었다. 이들 부위에서는 BV/TV, Tb.Th, Tb.N의 값들도 다른 부위에 비해 비교적 높은 값이 측정되었다.

4. 결론

본 연구에서는 미세 전산화단층촬영시스템과 미세 유한요소법을 이용하여 동일 사체에서 획득한 모든 등뼈와 허리뼈의 형태학적 특성 및 기계적 특성을 비교 관찰하여 척추의 거동을 알아보고자 하였다.

척추는 부위에 따라 앞쪽 또는 뒤쪽으로 휘어져 있는데 휘어짐이 시작되는 지점을 기준으로 목뼈, 등뼈, 허리뼈 등으로 구분된다[11]. 이러한 척추만곡(Curvature of vertebral column)은 충격을 흡수하고 탄력을 지닌 버팀목 역할을 한다[11]. 첫 번째 등뼈는 후만(Kopphosis)이 형성되는 부위이고 첫 번째 허리뼈는 전만(Lordosis)이 형성되는 부위이다. 이 부위들을 생체역학적 관점에서 관찰해 보면 상대적으로 집중하중을 받기 때문에 구조적 및 기계적으로 강한 특성을 나타내는 것으로 생각된다. 위쪽의 등뼈 보다는 위쪽의 허리뼈가 보다 더 많은 하중을 견뎌야 하기 때문에 관찰한 뼈들 중에서 가장 강한 구조적 및 기계적 특성을 가짐을 알 수 있었다. 본 논문에서처럼 뼈의 중양을 관찰하면 등뼈 및 허리뼈의 번호가 높아질수록, 즉 아래쪽에 있는 뼈일수록 그 특성은 약화된다는 것도 그래프를 통해 관찰할 수 있었다.

본 연구에서는 척추는 굽이부위에서 상대적으로 강한 구조적 및 기계적 특성을 갖는다는 것을 알 수 있었다. 본 연구는 전산모의 해석을 통한 예측 결과이며 실제 결과는 예상과 다를 수 있기에 시편의 실제 압축실험을 수행하는 것이 앞으로의 과제이다.

후기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

참고문헌

1. Klift, M., Laet, C. and Pols, H., "Assessment of fracture risk: Who should be treated for osteoporosis?," Best Practice & Research Clinical Rheumatology, 19, 937-950, 2005.
2. Cooper, C., "Osteoporosis: an increasing public health problem," Medicographia, 24, 227-284, 2002.
3. Pierre, D., "Treatment of postmenopausal osteoporosis," Lancet, 359, 201-226, 2002.
4. Ulich, D., van Rietbergen, B., Weinans, H. and Ruegsegger, P., "Finite element analysis of trabecular bone structure : a comparison of image-based meshing technique," Journal of Biomechanics, 31, 1187-1192, 1998.
5. Frank, L., Ivan, H. and Frank, M., "The effect of specimen geometry on the mechanical behaviors of trabecular bone specimens," Journal of Biomechanics, 25, 359-368, 1992.
6. Ulich, D., van Rietbergen, B., Laib, A. and Ruegsegger, P., "The ability of three-dimensional structural indices to reflect mechanical aspects of trabecular bone," Bone Journal, 25, 55-60, 1999.
7. Lee, T. W., Ko, C. Y., Woo, D. G. and Kim, H. S., "Relationship of morphological and mechanical characteristics in vertebral trabecular bone," Key Engineering Materials, 342, 41-44, 2007.
8. Goel, K., Ramirez, A., Weizeng, K. and Gilbertson, G., "Cancellous bone young's modulus variation within the vertebral body of a ligamentous lumbar spin-application of bone adaptive remodeling concepts," Journal of Biomechanics, 117, 117-267, 1995.
9. 우대근, 김한성, 원예연, 백명현, 탁계래, "척추 해면골의 시편 형상에 따른 소성특성 연구", 대한의용생체공학회 추계학술대회 논문집, Vol. 23, pp. 136, 2003.
10. van Rietbergen, B., Weinans, H., Huikes, R. and Odgaard, A., "Computational strategies for iterative solutions of large FEM applications employing voxel data," International Journal for Numerical Methods in Engineering, 28, 2743-2767, 1996.
11. White, A. and Panjabi, M., "Clinical Biomechanics of the Spine," J.B. Lippincott Company, 1990.