

3 차원 미세 유한요소모델을 이용한 골다공증 해면골과 호르몬 치료 모델의 기계적 특성 분석

우대곤* (연세대 의공학과), 김한성 (연세대 의공학과), 유용석 (칸티바이오)

The Mechanical Characteristics of Osteoporotic Vertebral Trabecular Bone Models and its Hormone Treatment Models using 3D Micro-FE Analysis

D. G. Woo (Biomedical Eng. Dept., YSU), H. S. Kim (Biomedical Eng. Dept., YSU), Y. S. You (CANTIBio Inc.)

ABSTRACT

Several workers reported the relationship between osteoporosis and age-related reductions in the BV/TV (bone volume fraction) of vertebral trabecular bones. However, there were few micro finite element (micro-FE) models to account for the treatments of the osteoporotic trabecular bone. In the present study, micro-FE models of osteoporotic and hormone-treated bone models were constructed to analyze the effect of specimen location and boundary condition on mechanical characteristics of hormone treatment model for osteoporotic trabecular bone. Top and bottom sections of specimens were also investigated individually to study the effect of specimen location. Hormone-treated models were allowed to have the same relative BV/TV (13.4%) as that used in models of previous researchers. The present study reported the elastic and plastic characteristics of the osteoporosis and hormone-treated bone models. In the present study, in-situ boundary condition was applied to the simulated compression tests for in-vivo condition of vertebral trabecular bone. The present study indicated that the hormone therapy was likely to improve the mechanical characteristics of osteoporotic bones and the mechanical characteristics of vertebral trabecular bone specimen were dependent on the captured location and boundary condition.

Key Words: Osteoporosis, BV/TV, Micro-FE models, Hormone-treatment

1. 서 론

최근 골다공증 치료를 목적으로 한 임플란트 및 척추 성형술이 해면골에서 이루어짐에 따라 해면골의 기계적 특성에 대한 이해가 중요시되고 있다. 많은 연구자들이 해면골의 기계적 특성에 대한 연구의 일환으로 미세전산 단층촬영시스템 (Micro-CT) 이미지를 기반으로 미세 유한요소법 (Finite Element Analysis: FEA)을 사용하고 있다. Ulrich 등(1998)은 한 변의 길이가 4mm 인 정육면체 FEA 모델을 사용하여 해면골의 탄성 영역의 기계적 특성을 분석했고, Keller 등(1989)은 요추체의 부위에서 골소주 강도와 시편 형상에서의 차이가 중요한 임상적 암시를 갖는다고 보고한 바 있다. 다른 연구자들 (Frost 등, 1997)에 의해 선행된 연구에서 인체 노화로 인한 골다공증이 척추 압박

골절을 야기시키며, 척추 해면골에서 골소주의 두께와 숫자를 감소시킨다는 증거가 발견되었다. Silva 등(1997)은 정상, 골다공증, 호르몬 치료를 한 모델 등 세 가지의 2 차원 미세 유한요소모델을 보르노이 도형을 이용하여 만들었다. 그 결과, 골소주 두께와 숫자를 비교하여 호르몬 치료를 통해 골소주 두께를 증가시키고 뼈의 기계적 특성도 강화시킬 수 있다고 발표하였다.

본 논문에서는, Micro-CT 이미지와 FEA 를 사용하여 골다공증 척추 시편 모델과 호르몬 치료 모델의 기계적인 특성 변화를 비교 연구하였다. 호르몬 치료의 역학적 효과는 골다공증의 3 차원 유한요소 모델의 골소주 두께를 증가시킴으로써 분석되었다. 또한 본 연구의 선행 연구 (우대곤 외, 2004) 에서 시편을 추출하는 부위에 따라 척추 해면골의 기계적인 특성이 달라진다는 점에

착안하여 골다공증 모델과 호르몬 치료 모델의 시편 획득부위에 따라서 기계적인 특성 변화를 분석하였다. 또한 Rietbergen 등(1995)의 연구에서와 같이 3 차원 유한요소 모델의 구속 조건을 기존의 단순 압축 실험보다 실제 구속 조건과 유사하도록 결정하여 그에 따른 기계적인 특성 분석도 수행하였다.

2. 재료 및 방법

부검을 통해 사체 (여성, 85)로부터 획득한 요추 절편 (L2)에서 해면골 중심부의 전상부에서 후하부를 관통하도록 직경 11mm 의 원통형 시편을 가공하고, 시편 형상에 따른 해면골 구조의 기계적 특성을 조사한 Frank 등(1992)의 결과를 토대로 한 번의 길이가 6.5mm 인 정육면체 해면골 시편을 구성하였다. Micro-CT system (Skyscan-1076, Skyscan, Belgium)을 이용하여 시편 장축에 직각이 되도록 2 차원 단면 촬영을 하고, BIONIX 3.0 (CANTiBio Co.) software 를 사용하여 3 차원 구조로 변환시켰다. 미세 유한요소모델을 이용한 척추 해면골 골다공증 시편에서 골밀도를 증가시켜 호르몬 치료한 3 차원 유한요소 모델을 만들었다. 호르몬 치료 모델은 Silva 등(1997)의 연구와 직접적인 비교를 위하여 그들이 호르몬 모델에 적용한 것과 동일한 골밀도(13.4%)를 사용하였다. 해상도에 따른 척추 해면골의 탄성과 소성 특성을 연구하기 위해 각 시편의 상충부와 하충부에 대해 42 μm , 63 μm , 84 μm , 105 μm , 126 μm 의 해상도에 기반한 3 차원 복셀 구조를 제작하였고, Hyper-mesh 6.0 (Altair Engineering)을 사용하여 모의 압축실험을 위한 모델로 재건하였다. 본 연구는 Ulrich 등(1998)이 사용한 물성치를 적용하였고, 모든 모델이 등방성을 갖는다고 가정하였다 (Table 1).

Table 1. Material properties of vertebral trabecular bone (Ulrich et al., 1998, Gibson et al., 1997)

Property	Young' s modulus (E : GPa)	Poisson' s ratio (ν)	Compressive strength (σ : MPa)
	10	0.3	136

모의실험에서 시편의 장축 방향으로 가해지는 수직 압축실험을 하기 위해 ABAQUS 6.3(HKS, Inc.) 소프트웨어를 사용하였다. 골다공증과 호르몬치료 모델의 3 차원 유한요소 모델에 대한 구속 조건을

결정하고, 탄성과 소성에 해당하는 압축 하중 조건을 부가하였다. 3 차원 유한 요소 모델의 상단부에 0.5%의 압축 변위까지 허용하도록 압축 하중 조건을 부가하여 탄성 특성을 분석하였고, 소성 특성을 분석하기 위해 파손 응력이 나타나는 최대 압축 하중을 측정하였다.

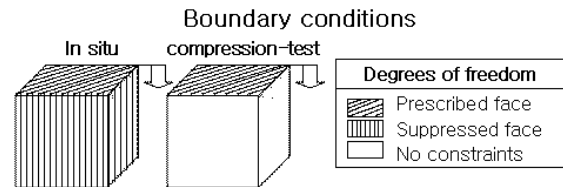


Fig. 1 Two types of boundary conditions (Rietbergen 등, 1995).

기존의 연구에서는 3 차원 모델의 아랫면을 구속하고 시편의 장축 방향으로 수직 하중을 인가하여 기계적인 특성을 분석하였는데, 해면골 시편 모델이 생체 조건내의 상태에서는 측면이 모두 유기적으로 구속되어 있다는 점에 착안하여 아랫면과 측면을 구속하고 시편의 장축 방향으로 수직 압축 실험을 수행하였다. 두 종류의 구속조건에 대한 개괄은 Fig. 1 에 나타나 있다.

3. 결 과

3.1 골다공증과 호르몬 치료 모델의 시편 부위에 따른 기계적인 특성

시편 부위에 따른 기계적인 특성을 분석하기 위해 직경 11mm 인 원통형 시편에서 상충부와 하충부 등 두 부분으로 나누어서 한 번의 길이가 6.5mm 인 정육면체 시편을 제작하였다. 각각의 시편에 대해 압축 하중을 인가하여 탄성과 소성 영역에서의 기계적인 특성을 비교 분석하였다. Fig. 2 는 골다공증과 호르몬 치료 모델에서 시편 부위 (상충부, 하충부)에 따른 기계적인 특성을 해상도에 따라 분석한 것이다. 골다공증 모델보다 호르몬 치료 모델에서 영률이 더 크게 나타났고, 상충부의 시편이 하충부 시편보다 더 큰 영률을 나타냈다. 골다공증 모델과 호르몬 치료 모델의 시편 부위의 해상도에 따른 소성특성은 Table 2 와 같이 나타난다. 상충부 시편의 경우 골다공증이 있는 모델과 비교하여 호르몬 치료 모델의 파손 응력이 약 51% 정도 증가하였는데, 이것은 2 차원 (two dimensional, 2D) 보르노이 모형으로 골다공증 해면골의 호르몬 치료 효과를 모의 실험한 Silva 등(1997)의 연구 결

과(60% 증가)보다 다소 작게 나타났다.

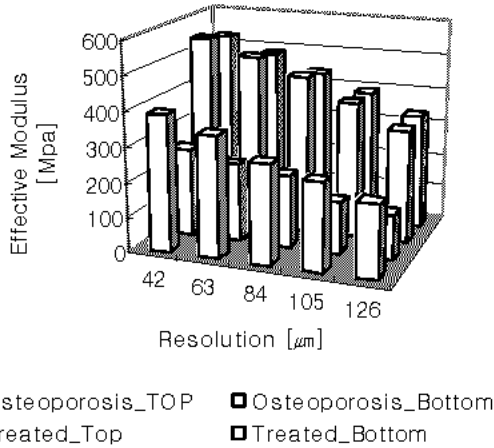


Fig. 2 Effective modulus of osteoporosis and hormone therapy models

Table 2. Maximum stress of osteoporosis and hormone therapy models (Plastic Characteristics)

시편	해상도 (μm)	골다공증		호르몬 치료	
		최대 응력 (MPa)			
		상층부	하층부	상층부	하층부
6.5mm Cube	126	1.737	1.117	3.032	2.901
	105	2.009	1.228	3.527	3.454
	84	2.392	1.640	4.206	3.951
	63	3.022	1.738	4.904	4.522
	42	3.464	1.960	5.218	-

3.2 구속조건에 따른 기계적 특성 분석

본 논문에서는 기존의 구속조건과 달리 아랫면과 옆면을 구속시켜 모의압축 실험의 구속 조건이 해면골 시편의 기계적인 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 탄성 특성은 해상도에 따라 각각의 3 차원 모델로 제작된 시편의 아랫면과 옆면을 구속하고 0.5%의 변형을 허용하는 압축 하중을 인가하여 분석되었다. Fig. 3 은 탄성 영역에서 아랫면만을 구속한 기존의 구속 조건에서와 생체 내 조건과 유사하도록 아랫면과 옆면을 구속한 상태 (in-situ)에서의 모의 압축실험을 수행한 결과를 비교 분석한 것이다. 시편 부위에 따른 기계적인 특성을 분석한 이전의 실험에서와 같이 하층부 시편에서 보다 상층부 시편에서 더 큰 영률이 나타났고, 생체 내 조건과 유사한 구속 조건에서 더 큰 영률이 나타났다.

구속조건에 따른 척추 해면골의 소성 특성은 Table 3 과 같다. 아랫면만을 구속한 경우보다 아랫면과 옆면을 모두 구속한 경우의 파손 응력이 더 크게 나타남을 확인할 수 있으며 상층부 시편이 하층부 시편보다 더 큰 강도가 나타났다.

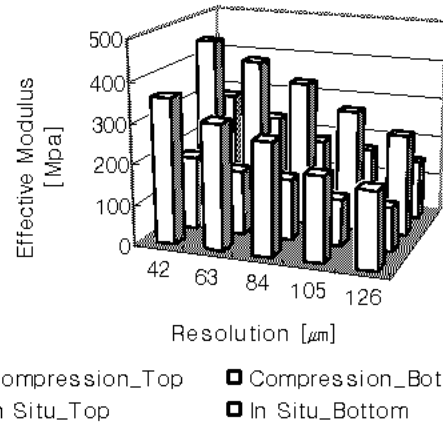


Fig. 3 Effective Modulus on two types of boundary conditions (Compression test, In-situ)

Table 3. Maximum stress on two types of boundary conditions (Compression test, In-situ)

시편	해상도 (μm)	단순 압축 (아랫면 구속)		In situ (아랫면, 옆면 구속)	
		최대 응력 (MPa)			
		상층부	하층부	상층부	하층부
6.5mm cube	126	1.737	1.117	2.096	1.398
	105	2.009	1.228	2.626	1.624
	84	2.392	1.640	3.113	2.572
	63	3.022	1.738	3.844	2.621
	42	3.464	1.960	4.414	2.843

4. 결 론

본 논문에서는 골다공증 모델과 호르몬 치료 모델의 생체 역학적 특성을 분석하였다. 시편 부위에 대해 탄성 특성을 비교 분석한 결과 골다공증 모델보다 호르몬 치료 모델에서 더 큰 영률을 나타냈다. 호르몬 치료 모델이 골다공증 모델보다 큰 반력과 영률을 갖는 것은 Mosekilde 등(1989)의 연구 결과에서 호르몬 치료에 의해 골소주 두께가 증가한다는 것에 기인하며 증가한 골소주 두께가 압축에 대한 지지력을 높이기 때문이라고 설명할 수 있다. 소성 특성에서도 골다공증 모델보다 호르몬 치료

모델의 파손 응력이 더 크게 나타났는데, 이는 탄성 특성에서 언급한 내용과 같은 이유에 기인한다. 호르몬 치료가 골소주 두께를 증가시켜 압축 하중을 더 잘 지탱하도록 한다는 사실은 노화와 관련된 뼈 강도의 저하에서 골다공증 치료와 관련된 임상적 정당성을 갖는다. 본 논문에서는 골다공증 시편에 대한 호르몬 치료는 척추 해면골의 기계적 특성을 향상시킨다는 것을 보여주며, 시편의 부위에 따라서 상충부가 하충부보다 더 큰 탄성 및 소성 특성을 나타낸다는 것을 확인할 수 있는데, 이것은 시편의 골소주 구조가 부위에 따라 밀도 차이를 보이기 때문으로 추정된다.

본 논문에서는 Rietbergen 등(1995)이 제시한 바와 같이 생체조건과 유사한 구속조건에 대한 실험을 비교함으로써 구속조건에 따라 같은 부위의 시편에서도 다른 기계적인 특성을 나타냄을 확인하였다. 아랫면과 옆면을 구속시키고 시편의 장축 방향으로 수직 압축 실험을 행한 결과 탄성 특성에서 기존의 구속조건에 압축 실험에 비해 더 큰 영향을 나타냈으며, 소성 특성에서도 아랫면과 옆면을 구속시킨 압축 실험에서 더 큰 파손 응력을 나타내었다. 3 차원 미세 유한요소법을 이용한 호르몬 치료에 대한 본 논문의 결과는 2 차원 보르노이 모형으로 해면골의 노화에 대한 영향을 모의 실험한 Silva 등(1997)의 연구 결과보다 덜 효과적인 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 산업자원부(한국산업기술평가원)에서 지원한 지역특화기술개발사업의 일환입니다.

참고문헌

1. Frost, H.M., Defining Osteopenias and Osteoporosis: Another View (With Insights From a New Paradigm), *Bone*, Vol. 20, pp. 385-391, 1997
2. D. Ulrich, B. van Rietbergen, H. Weinans, P. Ruegsegger, "Finite element analysis of trabecular bone structure : a comparison of image-based meshing technique", *J.Biomechanics*, Vol. 31, pp. 1187-1192, 1998
3. Frank Linde, Ivan Hvid and Frank Madsen, "The effect of specimen geometry on the mechanical behaviors of trabucular bone specimens", *J. Biomechanics*, Vol. 25, pp. 359-368, 1992
4. M. J. Silva, L. J. Gibson, "Modeling the Mechanical Behavior of Vertebral Trabecular Bone: Effects of Age-Related Changes in Micro- structure", *Bone*, Vol. 21, No. 2, pp. 191-199, August 1997
5. B. van Rietbergen, H. Weinans, R. Huiskes, A. Odgaard, "A new method to determine trabecular bone elastic properties and loading using micromechanical finite-element models", *J. Biomechanics*, Vol. 28, No. 1, pp. 69-81, 1995
6. Tony S. Keller, PhD, Tommy H. Hansson, MD, PhD, Adam C. Anram, MD, Dan M. Spengler, MD, and Manohar M. Panjabi, PhD, DTech, "Regional variations in the compressive properties of lumbar vertebral trabeculae : effects of disc degeneration", *Spine*, Vol. 14, pp. 1012-1019, 1989
7. Mosekilde. L., "Sex differences in age-related loss of vertebral trabecular bone mass and structure-biomechanical consequences", *Bone*, Vol. 10, pp. 425-432. 1989
8. H.S. Kim, Y.Y. Won, D.G. Woo, M.H. Baek, G.R. Tac, "The plastic behaviour of the micro-FE models for vertebral trabecular bones", 4th World Congress of Biomechanics, Sydney, Australia, Aug. 24-29, 2003
9. Daegon Woo, Hansung Kim, Gyerae Tack, "A study on the mechanical characteristics of vertebral trabecular bones using the micro-FE models", *AP Biomech 2004*, Vol 1, pp. 37-38, 2004
10. Daegon Woo, Hansung Kim, "The Effect of Hormone Treatment on the Plastic Characteristic of Osteoporotic Vertebral Trabecular Bone", 26th Annual International Conference of the IEEE EMBS, San francisco, USA, pp. 5084-5087, Sep. 1-5, 2004
11. 우대곤 외, "척추 해면골의 시편 형상에 따른 소성특성 연구", 대한의용생체공학회 춘계학술대회 논문집, Vol. 29, 2003
12. 우대곤 외, "미세단층촬영기와 미세유한요소법을 이용한 척추 해면골 시편의 형상과 부위별에 따른 기계적 특성 해석", 한국정밀공학회 생체공학부문 학술대회 논문집, Vol. 1, pp. 139-142, 2004
13. 우대곤 외, "골다공증 척추 해면골에 대한 호르몬 치료와 척추 성형술 모델", 대한의용생체공학회 춘계학술대회 논문집, Vol. 30, 2004