

넙다리뼈 목부분 해면뼈의 이방성과 체적비가 기계적 물성에 미치는 영향

*박정수¹, 한재녕¹, 채수원², 곽대순³, 한승호³, 최광남⁴

¹고려대학교 대학원 기계공학과, ²고려대학교 기계공학과, ³카톨릭대 응용해부연구소, ⁴한국과학기술정보연구원

The effects of anisotropy and volume fraction on mechanical properties of trabecular bone in femoral neck

J.S.Park¹, J.N. Han¹, S.W. Chae², D.S. Kwak³, S.H. Han³, K.N. Choi⁴

¹ Dept. of Mech. Eng., Korea Univ., ² Dept. of Mech. Eng., Korea Univ., ³ Catholic Institute for Applied Anatomy, ⁴ KISTI

Key words : Tetrahedral element, Finite Element Analysis, Femur, Trabecular bone, Anisotropy

1. 서론

최근 미세 전산화 단층촬영(Micro-CT) 이미지를 기반으로 하는 미세 유한 요소법이 발달하면서 해면뼈(trabecular bone)의 탄성계수를 이용한 기계적 거동의 연구가 활발히 진행되고 있다.[1,2]

해면뼈의 탄성계수는 골다공증과 같은 뼈와 관련된 질환의 진단에 있어 객관적인 지표로 이용되고 있는데 이와 같은 해면뼈의 탄성계수를 평가하는 기준으로 크게 골밀도(BMD:bone mineral density)와 미세구조로 분류된다. 골밀도는 생체 조건 밖에서(in vitro) 해면뼈의 상태 여부를 판단하는 좋은 기준이지만 기계적 거동에서는 골밀도 만으로는 설명하기 어려운 변수들이 여전히 존재한다. 따라서 해면뼈 조직의 미세구조에 대한 연구를 통해 해면뼈의 면밀한 분석이 필요하다. 특히 넙다리 목은 골다공증이나 골괴사증으로 인한 손상이 많이 발생하는 부분으로 국내에서는 전산화 단층촬영을 기반으로 한 대퇴부 목 부분 해면뼈의 유한요소해석 연구가 없다. 따라서 본 연구에서는 대퇴부 목의 탄성계수가 이방성과 관련하여 미치는 영향에 대해 분석하였다.

본 연구를 위해, 한국인 성인 남성 시신과 여성 시신 각각 1구에서 대퇴부 목뼈를 원기둥 시편으로 제작한 후, Micro-CT 데이터를 이용하여 사면체 요소(10node)의 유한 요소 모델을 생성 한 후 압축 해석을 하였다. 또한 미세구조가 해면뼈의 방향성과 체적이 해면뼈의 탄성계수에 미치는 영향에 대해 비교 분석 하였다.

2. 본론

2.1 재료 및 시편

시편의 추출 및 CT 자료 구축은 카톨릭 대학교 응용해부학 연구소에서 시행하였다. 시편은 골다공증과 무관한 사인(뇌부종)으로 사망한 사체 1구(30대 남성)와 여성 사체 1구(50대 여성)의 넙다리 목 부분에서 획득하였다. 시편의 골밀도는 각각 1.159, 0.714[g/cm²]이고, 시편의 크기는 횡방향(transverse)으로 지름 6mm의 원형 단면을 가지고 종방향(longitude)으로 높이 12mm인 시편을 추출하였다. 해면뼈 시편 미세 단층 촬영은 SkyScan-1076 (SKYSCAN, Belgium)를 이용하였다. CT 자료의

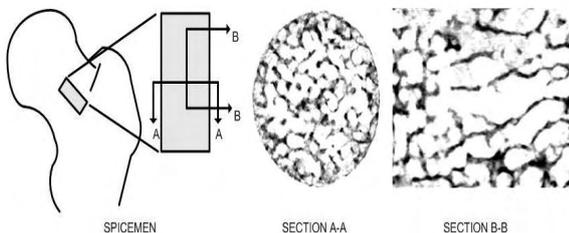


Fig. 1. Sections of typical trabecular bone specimens

해상도를 21 μm*21 μm로 촬영하여 2차원 미세 영상 데이터를 형성하였다(Fig.1).

2.2 3차원 모델링

2차원 CT 이미지를 3차원 모델로 만들기 위해서는 시편의 체적을 최대한 반영해야 한다. 따라서, 2차원 CT 데이터의 체적비(volume fraction) 반영한 3차원 표면 모델(3D surface model)을 만들었다(Fig.2.a).

3차원 표면 모델을 이용하여 사면체요소(10node)의 유한요소모델을 구성하였다 (Fig.2.b). 유한요소모델의 크기는 3mm 입방체이며, 모델 구성 시 발생한 오차에 대한 변수를 고려하여 총 9개의 모델을 형성하였다.

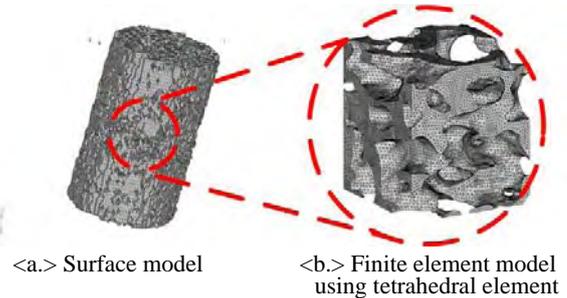


Fig. 2. The trabecular bone in the femoral neck

2.3 분석 방법 및 재료의 물성

유한 요소 해석은 ABAQUS6.4TM (ABAQUS.Inc) 소프트웨어를 이용했으며 초기 탄성계수는 디지털 코리안 의 실험값[3]과 Bayraktar[1]을 고려하여 적용하였으며, Poisson ratio는 0.3으로 설정하였다. 해석 방법은 상단부(upper bound)에서 압축 방향(z축)으로 0.03mm 변위를 적용하고 하단부(lower bound)는 구속(constraint)하여 힘과 변위를 구하였다. 또한, 횡 방향(z축)과 종 방향(x, y축)에서의 탄성계수를 비교하기 위해 x,y,z축(Fig3.) 방향으로 각각의 압축해석을 하였다.

Mitta 등[2]과 같이 체적과 이방성이 탄성계수에 미치는 영향을 조사하기 위해, 해석 결과 데이터들은 Micro soft Excel 2003 (Microsoft Corp., Redmond, WA)을 이용하여 체적에 따른 탄성계수의 변화와 압축 방향에 따른 탄성계수의 변화를 통계 분석하여 정리하였다.

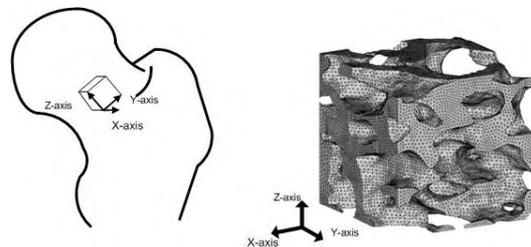


Fig. 3. The orientation of FE model in vivo

2.4 해석 결과 및 분석

디지털 코리안 의 압축 방향을 고려하여, 종 방향 (z 축) 방향으로 유한요소해석 결과와 실험 결과를 비교해 보면 FE 결과가 다소 낮게 나오는 것을 볼 수 있다. 이는 한계치 설정 범위에 따라 변수가 발생할 수 있다고 판단되고, 더 많은 CT 데이터가 있을수록 실험값과 근사한 유한요소해석 결과를 얻을 수 있다.

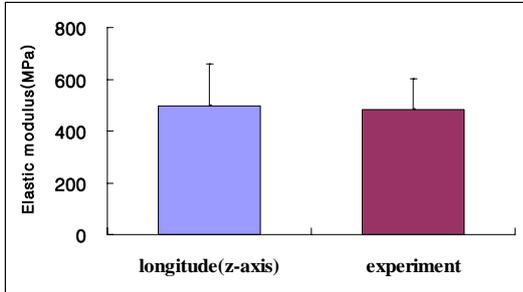
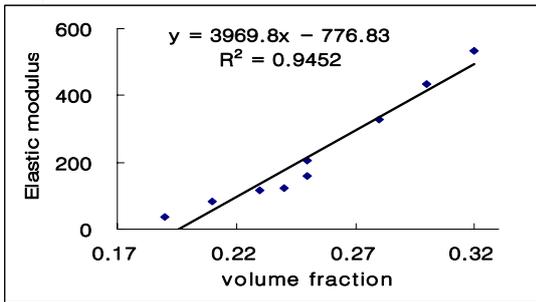


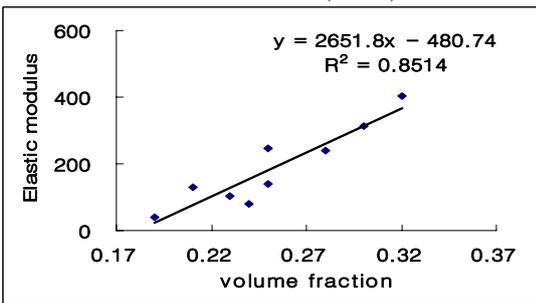
Fig4. Comparison with FE model and experiment

상관관계지수(R²)를 고려해 볼 때, 탄성계수는 횡 방향 (x, y 축)에서 체적과 상관계수가 종 방향(z 축)에서의 체적 상관계수보다 높았다. (0.95>0.86>0.69: x>y>z)

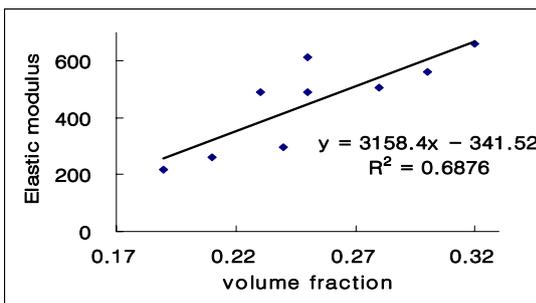
해면뼈의 탄성 계수와 체적의 상관관계는 비례하는 양상을 나타냈지만, 압축 방향(z 축)에서의 탄성 계수와 체적 상관관계는 Mitta 등[2](0.82) 보다 낮았다. 이는 해면뼈의 체적과 상관관계 이외도 해면뼈의 이방성에 대해서도 고려해야 정확한 결과를 얻을 수 있다는 사실을 알 수 있다.



<a> Transverse axis (x-axis)



 Transverse axis (y-axis)



<c> Longitude axis (z-axis)

Fig. 5. Correlation between volume fraction and Elastic modulus

대퇴부 목뼈의 종 방향 에서 결과값은 횡 방향 에서의 탄성계수보다 훨씬 높다(Fig6). Catherine 등[4]과 같이, 해면뼈 압축 실험에서와 같은 양상으로 넙다리 목뼈의 해면뼈에서 주 응력 축(MIL: Mean In Length)으로 받는 방향에 대한 평가를 할 수 있다.

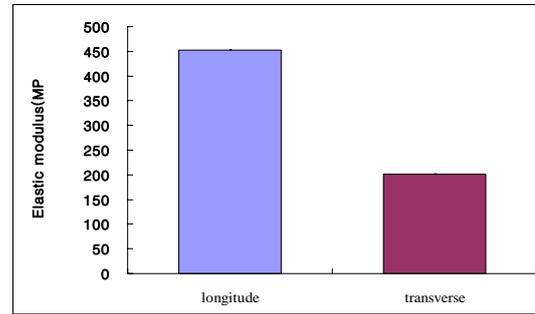


Fig.6. Comparison of the elastic modulus by the axis of the compression

3. 결론

본 연구에서는 유한요소법을 사용하여 해석함으로써 생체 내(in vivo)에서의 해면뼈의 주 응력 축과 미세구조에 따른 기계적 거동에 대한 평가를 하였고 이를 압축 실험을 통해 검증하였다. 특히 기존 복셀 요소(voxel mesh)를 이용한 연구들과 달리 사면체 요소(10node)를 사용하여 형상학적으로 더 정확히 구현한 유한요소모델로 해석을 하였다.

기존의 연구들에서와 같이 해면뼈에서 체적과 탄성계수의 상관관계는 선형관계로 나타났고 탄성계수는 다른 방향에 비해 종 방향에서 현저하게 높게 나타났다.

그러나, 같은 체적 비를 가진 해면뼈임에도 불구하고, 주 응력 축에서 체적과 상관관계는 다른 연구들보다 낮았다. 기존 연구에서는, 주 응력축에 관한 상관관계만 연구한 반면, 이번 연구에서는 종 방향과 더불어 횡 방향에 대해서도 비교 분석한 결과 횡 방향에서의 상관도가 더 높았다. 이는 사면체 요소를 사용하여 형상적으로 미세하게 구현을 하였기 때문에 더 정확한 양상을 얻은 결과이고, 추가적으로 해면뼈의 이질성(heterology)으로 인해 부위에 따라서도 다른 양상을 보이고 있음을 알 수 있다.

따라서, 해면뼈의 단일(uniform)화된 모델을 위해서 이질성에 따른 체적상관계수의 함수를 유추하여야 한다고 판단된다.

참고문헌

1. Bayraktar, H., Morgan, H., Niebur, G., Morris, G. and Wong, E. and Keaveny, T. "Comparison of the elastic and yield properties of human femoral trabecular and cortical bone tissue". Journal of Biomechanics vol. 37, pp.27-35, 2004
2. Mitta, E., Rubin, C. and Qin, Y. "Interrelationship of trabecular mechanical and microstructural properties in sheep trabecular bone". Journal of Biomechanics vol. 38, pp.1229-1237, 2005
3. 광대순, 최광남, 김상국, 이상호, 김태중, 한승호, 오택열. "넙다리뼈 머리/ 목 부분 해면뼈의 기계적 물성". 정밀공학회 추계 학술 대회, pp.518-521, 2005
4. Catherine F. and Keaveny, T. "The dependence of shear failure properties of trabecular bone on apparent density and trabecular orientation", Journal of Biomechanics vol. 29, pp.1309-1317, 1996