

유한요소해석에 의한 해면뼈의 파손 예측 Prediction of Trabecular Bone Failure by Finite Element Analysis

*박정수¹, #채수원², 광대순³, 한승호³

*J. S. Park¹, #S. W. Chae (swchae@korea.ac.kr)², D. S. Kwak³, S. H. Han³

¹ 고려대학교 대학원 기계공학과, ² 고려대학교 기계공학과, ³ 가톨릭대 응용해부연구소

Key words : Finite Element Analysis, Hip fracture, Trabecular bone, failure

1. 서론

척추 뼈와 넓다리 목 부분 뼈는 골다공증이나 골괴사증과 같은 질병 및 나이로 인한 뼈의 쇠퇴(atrophy)로 인해 뼈의 골절(fracture)이 쉽게 발생한다. 이러한 골절은 주로 해면뼈의 파손(failure)에 의한 내부구조의 소실로 인해 발생되는 것이다. 특히 척추 골절은 증상을 야기시키지 않기 때문에 발견되는 경우가 드물지만, Fig 1과 같은 골반 골절(hip fracture)은 확연하게 나타난다. 골반 골절의 회복률은 50% 이하이고 이러한 질병으로 환자 중 20%가 사망한다. [1]

골절의 치료를 위해 우선적으로 뼈의 강도를 파악해야 한다. 이를 위해 탄성 계수의 평가가 필요하고 추가적으로 해면뼈의 항복에 대한 예측이 필요하다. 따라서 van Rietbergen 등은 CT image를 이용한 유한요소모델을 구현하는 방법을 개발하고 해면뼈의 조직의 탄성계수를 평가하였다[2]. 또한 Niebur 등이 피질 골의 조직(tissue)을 이용하여 경골 해면뼈의 비선형 유한요소모델을 입증하였다[3]. 특히 해면뼈의 파손 연구는 뼈의 형상과 비선형 물성을 고려해야 하므로 다양한 해석 수행이 필요하다.

또한 이전 연구는 초기 물성을 피질 골의 조직을 이용하였는데 이는 뼈의 이질성으로 인해 논란의 여지가 따르며, 해면뼈의 구조적 불규칙성으로 인해 같은 밀도에서도 탄성계수의 차이가 심하므로 골반 골절과 관계된 대퇴부 목 부분만을 위한 비선형 유한요소모델의 평가가 필요하다.

본 연구는 골반 골절과 관련, 해면뼈의 파손 예측을 위한 효율적인 유한요소모델개발에 대해 연구하였다. 우선 넓다리 목 부분의 해면뼈에서 미세구조의 형상을 최대한 반영한 유한요소모델 구현 후, 이에 대한 탄성 및 항복 물성에 관해 실험과 검증은 수행하였다. 또한 해면뼈를 세 부분으로 분류하여 yield strain을 측정하고 파손에 대한 평가를 수행하였다.

2. 연구 방법

시편의 실험 및 CT 자료 구축은 가톨릭 대학교 응용해부연구소에서 시행하였다. 실험 대상은 골다공증과 무관한 뇌부종으로 사망한 사체 1구(30대 남성)의 넓다리 목 부분에서 다이아몬드 코어 드릴을 이용하여 지름 6mm, 높이 12mm인 시편을 획득하고 압축 실험을 수행하였다.

해면뼈 시편의 미세 단층 촬영은 SkyScan-1076(SKYSCAN, Belgium)를 이용하였다. 해상도를 21 μ

m*21 μm로 촬영하여 2차원 미세 영상 데이터를 형성하였다. CT image는 골수와 해면 뼈를 0과 1로 구성하고 있다. 이러한 이진화 된 영상에서 한계치 작업을 수행하여 체적을 최대한 반영한 surface rendering을 수행하였다. 구현된 surface model은 hyper mesh를 사용하여 구현하였다. Fig 2와 같이 관심 체적을 최소화 시키기 위해 시편 내부에서 3mm 이상의 입방체 형상으로 총 6개의 모델을 구현하였다.

압축 해석은 ABAQUS 6.4™를 이용하여 수행하였다. 이전 연구에서는 피질 골의 조직(tissue)을 이용하여 해면뼈의 연구를 수행하였다. 그러나 McNamara 등의 연구와 같이 조직을 이용한 경우, 피질 골 조직에 대해 상반하는 결과를 나타낼 수도 있다[4]. 따라서 본 연구에서는 디지털 코리안의 실험값 데이터 중에서, 외관 피질 골(apparent-level cortical bone)을 고려하여 탄성계수는 5.8GPa로 적용하였으며, Poisson ratio는 0.3로 설정하였다[5]. 항복 응력은 피질 골에 관한 쌍 일차 방정식 형태의 물성(bilinear constitutive material)을 적용하였다.

Bayraktar 등의 연구와 같이 압축해석임에도 불구하고, 해면 뼈의 파손은 내부 구조 자체의 인장에 의해 발생된다[6]. 따라서 이러한 점을 고려하여 해석 방법은 Case 1(static)와 Case 2(quasi-static)으로 분류하여 수행하였다. 경계 조건은 하단부를 압축방향으로 구속시켰으며 구현된 해면뼈 모델을 각각 1.3% strain으로 압축 해석을 수행하였다.

탄성계수를 구하는 방법은 B. van Rietbergen 등(1995)이 한 방법과 동일하게 $Ku=f$ 을 적용하여 구하였다. 따라서 해면뼈의 Young's modulus (apparent modulus or bulk modulus)는 반력을 상부(upper surface)의 단면적으로 나누어 stress를 구하고, 변위를 높이로 나누어 strain을 구하였으며, 항복응력은 0.2% offset하여 구하였다. 유추한 탄성 계수와 항복응력을 실험 결과와 비교하였다.

또한 해석 결과를 이용하여 파손이 발생하는 부분에 대한 평가를 수행하였다. 해면골 시편을 크게 Part A, B, C로 나누어 항복 물성에 대해 비교하고 failure가 일어나는지에 대한 여부를 판단 하였다.

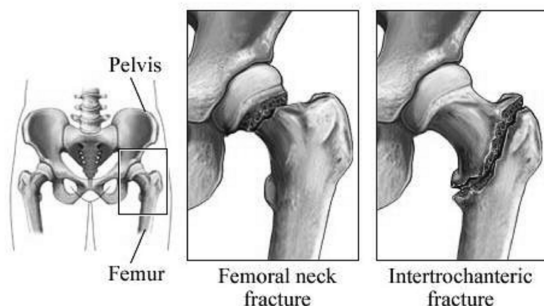


Fig.1 Schematic of Hip fracture

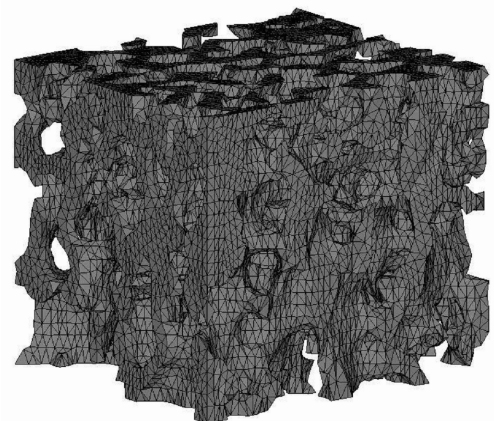


Fig.2 Construction of Finite Element Model in femoral trabecular bone

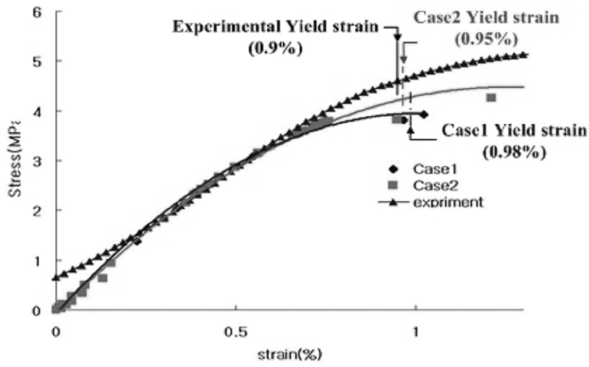


Fig.3 Comparison with experiment and FEA(Case1 & Case 2)

3. 결과

탄성계수(apparent modulus) 비교 결과 Case 1,2 은 각각 501MPa, 502MPa 로 실험결과(499MPa)와 근사한 결과를 보였다. 해면뼈는 미세구조의 이질성으로 부위별로 심지어는 유사한 부위에서도 차이가 심하기 때문에 유한요소모델의 입증에 어려움이 있다. 그러나 본 연구에서 미세구조의 정밀한 구현을 통해 해당 부위의 실험결과와 유사한 탄성계수를 얻을 수 있었다.

또한, Fig 4 와 같이 yield strain 을 실험과 비교하였을 때 Case 1 와 Case2 각각 8 %, 5 %의 오차가 발생하였다. Niebur 의 연구에서 yield strain 이 8% 오차가 발생된 것을 고려해 볼 때, 두 경우다 대략적으로 비선형 모델임을 입증하였다고 판단된다.

해면뼈 내부 미세구조의 변형을 파악하기 위해, Bayraktar 등의 연구를 참고하여 별집 형상의 구조에 압축 하중 시 변형 관계 식을 인용 하였다[6]. 섬유 주(trabecula) 끝부분 조직(tissue)의 strain 은 식 (1), (2)와 같다

$$\epsilon_{tissue}^{max} = -\frac{P}{E_{tissue}} \left(\frac{\cos \theta}{A} - \frac{Lt \sin \theta}{4I} \right), \quad (1)$$

$$\epsilon_{tissue}^{min} = -\frac{P}{E_{tissue}} \left(\frac{\cos \theta}{A} + \frac{Lt \sin \theta}{4I} \right), \quad (2)$$

E_{tissue} = tissue elastic modulus, t = thickness
 I = moment of inertia

식 (1)에서 $Lt \sin \theta / 4I > \cos \theta / A$ 인 경우 압축하중을 받음에도 불구하고 인장이 발생되며 이는 우선적으로 파손을 발생시키는 요인이다. 유한요소 모델에서 미세구조의 연결성이 정밀하게 구현되었으므로 섬유 주 조직에 기계적 거동을 명확하게 구사하였다고 판단된다.

또한 이전 연구에서는 조직에 대한 실험결과를 토대로 해석을 수행한 반면, 본 연구는 피질 골의 겉보기 물성(apparent material)을 가지고 이와 같은 연구를 수행하여 실험결과와 유사한 결과를 얻었다. 조직에 대한 실험이 어렵다는 점을 고려할 때, 본 연구는 피질 골(apparent level)을 이용 훨씬 더 효율적인 해면뼈의 파손을 예측 가능한 모델 개발하였다고 판단된다.

따라서 이러한 비선형 모델을 이용, 해면뼈를 Fig. 4 와 같이 크게 3 부분으로 나누어 파손 여부를 평가하였다. 결과는 Fig. 5 와 같이 Part B 와 C(넙다리 머리와 인접 부분)의 yield strain 이 낮았다. 그러므로 골반 골절은 넙다리 머리와 목의 경계 부근에서 우선적으로 파손으로 인하여 발생됨을 예측 할 수 있다.

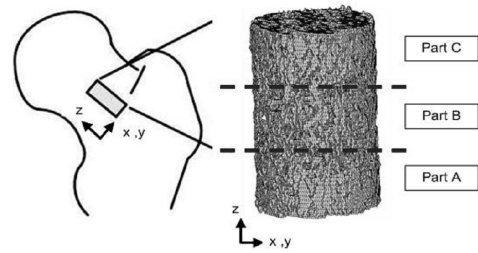


Fig.4 Partition of femoral trabecular bone

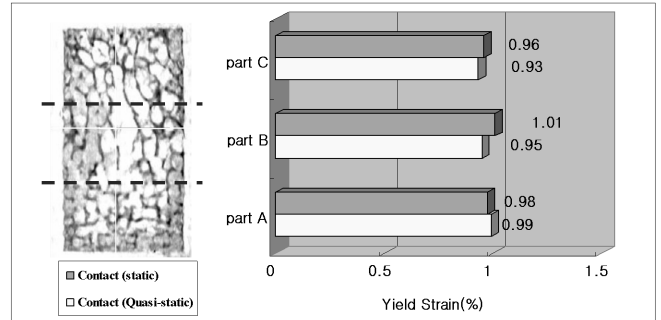


Fig. 5 Analysis of yield strain in femoral neck

4. 결론

본 연구는 CT image 를 이용하여 유한 요소 모델 구현하여 실험을 통해 검증하였고, 이를 통해 넙다리 목 부분의 해면뼈의 파손에 대해 연구하였다. 결과는 다음과 같다.

1. 피질골의 겉보기 물성을 이용한 유한요소모델을 통해 이전 연구들 보다 실험결과와 유사한 탄성 및 항복과 관련된 물성을 구할 수 있다.
2. 입증된 유한요소모델들을 통한 넙다리 목 부분 해면뼈의 평가를 통해, 넙다리 머리와 목 경계에서 골반골절의 발생을 예측 가능하다.

참고문헌

1. Parkkari, J., Kannus, P., Palvanen, M., Natri, A., Vainio, J., Aho, I., Vuori, I. and Järvinen, M., "Majority of hip fractures occur as a result of a fall and impact on the greater trochanter of the femur: a prospective controlled hip fracture study with 206 consecutive patients.", *Calcified Tissue International*, **65**, 183-187, 1999
2. van Rietbergen, B., Weinans, H., Huiskes, R. and Odgaard, H. "A new method to determine trabecular bone elastic properties and loading using micromechanical finite element models.", *Journal of Biomechanics*, **28**,69-81,1995
3. Niebur, G.L., Feldstein, M.J., Yuen, J.C., Chen, T.J. and Keaveny, "High-resolution finite element models with tissue strength asymmetry accurately predict failure of trabecular bone.", *Journal of Biomechanics*,**33**, 1575-1583, 2000
4. McNamara, L.M., van der Linden, J.C., Weinans, H. and Prendergast P.J. "Stress-concentrating effect of resorption lacunae in trabecular bone", *Journal of Biomechanics*, **39**,734-741, 2006
5. Digital Korean, KISTI, <http://digitalman.kisti.re.kr/>
6. Bayraktar, H.H. and Keaveny, T.M. "Mechanisms of uniformity of yield strains for trabecular bone." *Journal of Biomechanics*, **37**, 1671-1678,2004