

골 재형성 모사의 계산 효율성 향상을 위한 관심 영역의 생리학적 하중 조건의 정량적 의존도 분석

김지선, 김정진
계명대학교 기계공학부
e-mail: eclipse0403@gmail.com

Quantitative Dependency Analysis of Physiological Loads in Region of Interest for Computational Efficiency Improvement of Bone Remodeling Simulation

Jisun Kim, Jung Jin Kim
Dept. of Mechanical Engineering, Keimyung University

요 약

외부 하중에 대한 최적 구조물을 생성하는 골 재형성 모사를 성공적으로 수행하기 위해서는 올바른 외부 하중 부어가 매우 중요하다. 다만 인체에 작용하는 하중의 종류가 매우 다양하여 이를 모사에 반영하기 위해서는 과도한 계산량이 요구되는 문제점이 있다. 만약 다양한 외부 하중 중에서 지배적으로 골 재형성 과정에 영향을 미치는 하중을 알 수 있다면, 이러한 계산량 문제를 해결할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 골 재형성 모사의 계산 효율성 향상을 가능하게 하는 지배적 하중을 결정하기 위해, 골격계의 국부 영역에 대한 생리학적 하중 조건의 정량적 의존도 분석법을 제안했다. 먼저 관심 영역에 대한 하중 조건의 의존도 분석을 위해, 근위 대퇴골을 유한요소 모델로 구현했다. 그리고 골 미세구조의 주요 패턴에 따라 관심 영역을 선정하고 다양한 일상 하중 조건에 대한 의존도를 변형률 에너지 분포 기반으로 정량적으로 분석했다. 연구 결과, 인공 근위 대퇴골의 특정 위치에서는 특정 하중에 지배적으로 영향을 받으며, 변형률 에너지의 분포가 균일하도록 미세구조가 생성되었음을 정량적으로 확인할 수 있었다. 이는 제안한 방법을 통해 국부 영역에서의 하중 조건을 감소하여 계산 효율성 향상이 가능한 것을 의미한다..

1. 서론

골 재형성(Bone remodeling)은 조골세포와 파골세포의 상호작용으로 골 흡수와 골 형성이 반복적으로 발생하는 인체의 골 대사과정이다. 특히 이 과정은 골의 항상성(Bone homeostasis)을 유지하기 위해 외부 하중에 대해 최소의 질량으로 최대의 기계적 효율성을 얻기 위해 골 미세구조를 변화시킨다고 알려져 있다[1]. 그리고 최근 선진국들의 사회 고령화와 함께 골 질환 환자 수가 급격히 증가하고 있어 골 변화를 예측하는 골 재형성 모사(Bone remodeling simulation)가 많은 관심을 받고 있다.

골 재형성 모사에서 가장 중요한 요소는 골 생성의 자극요소인 외부 하중 조건이다. 특히 환자 맞춤형 하중은 환자의 골 미세구조 변화 예측의 정확도를 높일 수 있어 매우 중요하다. 다만, 인체에 작용하는 하중의 종류가 매우 다양하여 정확한 하중 조건 반영을 위해서는 과도한 계산량이 요구되며, 대상 모델의 차원이 늘어날수록 더욱 많은 하중 조건을 고려해야 하는 문제점이 있다. 이 문제점으로 인해 골 재형성 모사는 높은 필요성에도

불구하고 입상으로 적용하기 위해서는 많은 어려움을 겪고 있다.

골 재형성 모사의 과도한 계산량은 다양한 하중 조건 중 지배적으로 골 재형성에 영향을 미치는 하중만을 적용하여 해결할 수 있다. 이에 많은 연구자들이 골격계의 하중 의존도를 분석[2, 3]하여 지배적 하중을 도출하기 위해 노력해왔다. 다만, 이전 연구들은 전체 골에 대한 하중 의존도를 분석하였기에 다양한 하중 조건을 하나의 지배 하중만으로 표현하는 데는 어려움이 있었다. 반면, 골격계에서 국부 영역들은 주요한 형태를 보이며[4] 이는 특정 하중 조건에 의존하는 경향이 있다고 볼 수 있다. 하지만 아직 전체 골이 아닌 국부 영역에 대한 하중 의존도 분석을 통해 지배적 하중을 도출한 연구는 거의 진행된 바 없다.

따라서 본 연구에서는 골 재형성 모사의 계산 효율성 향상을 가능케 하는 지배적 하중을 결정하기 위해, 골격계의 국부 영역(즉, 관심 영역)에 대한 생리학적 하중 조건의 정량적 의존도를 분석하는 새로운 방법을 제안하고자 한다.

2. 본론

본 연구에서는 골격계 내 관심 영역에 대한 생리학적 하중 조건의 정량적 의존도를 분석하기 위해, 근위 대퇴골을 유한요소 모델로 구현하였다. 그 후 골 미세구조의 주요 패턴에 따라 관심 영역을 선정하고 이전 연구들에서 제안된 다양한 일상 하중 조건에 대한 의존도를 변형률 에너지 분포 기반으로 정량적으로 분석하였다.

2.1 근위대퇴골 유한요소모델

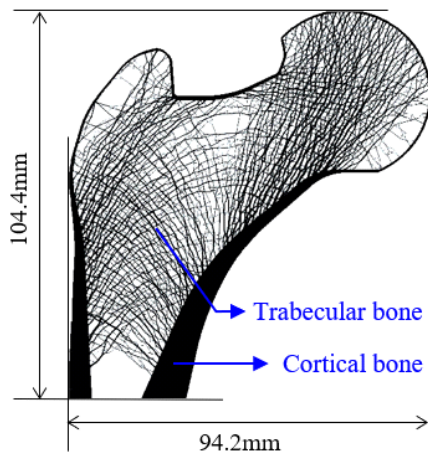
본 연구는 이전 연구[3]에서 제안된 다중 하중 조건 기반의 위상최적설계를 이용하여 근위 대퇴골을 유한요소 모델로 생성하였다. 이를 위해 상용 소프트웨어인 ANSYS 2021 R2의 APDL을 사용하였다. 모델의 크기는 길이 94.2 mm, 높이는 104.4 mm 이며, 3,979,394개의 질점과 2,149,488개의 2차원 요소 구성하였다. 유한요소는 50 μm × 50 μm 크기의 Plane42 요소를 사용했다. 이 요소는 각 질점에서 2개의 자유도를 갖는다. 근위 대퇴골은 그림 1과 같이 치밀골과 소주골로 구분되며 서로 다른 탄성 계수를 갖는다. 치밀골의 탄성계수는 22.5 GPa이며, 소주골의 탄성계수는 식(1)을 따른다[3].

$$E_i = \rho_i^3 E_0 \quad (1)$$

여기에서 E_0 는 소주골의 기본 탄성계수이며, 15 GPa이다. 인 모델에서 골은 등방성재료로 가정하여 치밀골과 소주골의 포아송비는 모두 0.3이다.

2.2 관심 영역 선정

특정 부위별 하중 조건의 영향도 분석을 위해 근위 대퇴골의 부위별 특성을 잘 대표하는 위치로 관심영역을 정의하였다. 일반적으로 근위 대퇴골은 위치별로 특정한



[그림 1] 인공근위대퇴골 유한요소모델

소주골 패턴을 보인다. 따라서 관심 영역은 Singh 등[5]이 제시한 5가지 서로 다른 소주골 그룹에 기반하여 근위 대퇴골의 주요 패턴을 가장 잘 표현하는 위치로 선정하였다. 대퇴골두의 상단, 중단, 하단, 대퇴경부, Ward's triangle부, 대전자부의 상단과 하단, 그리고 전자간 영역에서 좌측, 우측, 상단, 하단, 총 12가지 위치를 관심 영역으로 정의하였다.

2.3 하중 조건 의존도 분석 방법

관심 영역에 대한 부하 조건의 의존도를 정량적으로 분석하기 위해 각 관심 영역의 변형률 에너지 밀도 분포의 통계치를 이용하여 비교 분석했다. 그리고 소주골 구조와 특정 부하 사이의 의존도에 대한 하중 조건 영향도 평가 접수를 식 (2)와 같이 제안하였다.

$$S_{i,j,mean} = \frac{\mu_{i,j} - \mu_{i,mean}}{\mu_{i,mean}} \quad (2)$$

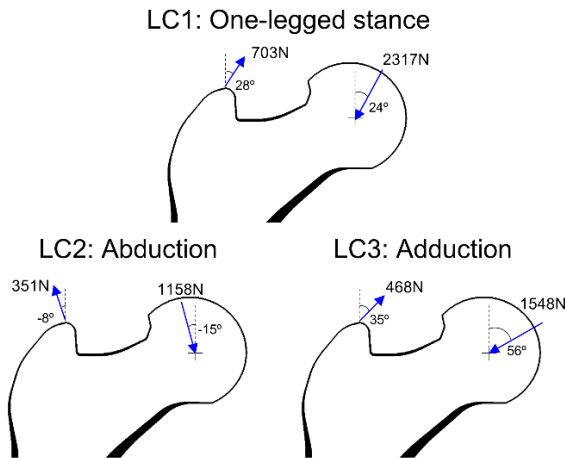
$$S_{i,j,std} = \frac{\mu_{i,std} - \sigma_{i,j}}{\mu_{i,std}}$$

$$S_{i,j} = 100[w_i S_{i,j,mean} + (1 - w_i) S_{i,j,std}]$$

본 연구에서는 여러 가지 하중에 따른 근위 대퇴골의 의존도를 분석하기 위해 그림 2와 같이 일상 활동을 나타내기 위한 세 가지 하중 조건인 외발서기(One-legged stance), 외전(Abduction), 내전(Adduction) 하중 조건[6]을 조합하여 표 1과 같이 7가지 하중 조건을 만들었다. Case 1-3은 각각 외발서기, 외전, 내전 단일 하중 조건만을 대퇴골두에 적용했다. Case 4-7은 앞선 3가지 하중 조건을 동시에 적용하는 다중 하중 조건을 적용하였다.

[표 1] 근위 대퇴골 구조적 거동 분석을 위한 하중 조건

Load Case	Location	$ F (N)$	$\theta(^{\circ})$	Remark
Case 1	HCF	2317	24	One-legged stance
	MF	702	28	
Case 2	HCF	1158	-15	Abduction
	MF	351	-8	
Case 3	HCF	1548	56	Adduction
	MF	468	35	
Case 4	50% of One-legged stance 50% of Abduction			
Case 5	50% of Abduction 50% of Adduction			
Case 6	50% of One-legged stance 50% of Adduction			
Case 7	60% of One-legged stance 20% of Abduction 20% of Adduction			



[그림 2] 일상 활동을 나타내기 위한 세 가지 하중 조건

3. 결론

하중 조건 의존도 분석 결과, 전체 모델(Global model)에서는 세 가지 하중이 동시에 적용된 다중 하중 조건인 하중 조건 7의 하중 조건 영향도 평가 점수가 가장 높았다. 관심 영역 중 대퇴골두에서는 모든 하중 조건을 함께 고려한 하중 조건 7의 평가 점수가 가장 높았다. 그러나, 대전자부에서는 두 가지 하중 조건의 조합인 하중 조건 4에서 가장 높은 평가 점수를 보였다. 이는 전체 모델은 세 가지 하중이 동시에 적용된 다중 하중에 의존적으로 골 재형성이 수행되었으나, 특정 관심 영역에서는 다른 특정한 하중에 지배적으로 영향을 받아서 미세 소주골이 형성됨을 의미한다. 그리고 본 연구 결과, 관심 영역에서는 지배적 하중만을 적용하여 골 재형성 모사가 가능하며, 이를 통해 계산 효율성 향상이 가능함을 의미한다.

본 연구에서는 골 재형성 모사의 계산 효율성 향상을 가능하게 하는 근위 대퇴골의 관심 영역에 대한 생리학적 하중 조건의 정량적 의존도 분석법을 제시하고 그 결과를 분석했다. 그 결과 관심 영역의 특정 위치에서는 특정 하중 조건에 지배적으로 영향을 받으며 구조적으로 변형률 에너지의 분포가 균일하도록 미세구조가 생성되었음을 정량적으로 확인했다. 본 연구 결과는 향후 골 재형성 모사의 계산적 효율성 향상에 크게 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] J. Wolff, "Das Gesetz der Transformation der Knochen," DMW - Dtsch. Medizinische Wochenschrift, vol. 19, no. 47, pp. 1222 - 1224, Nov. 1893.

[2] R. Huiskes, H. Weinans, H. J. Grootenboer, M. Dalstra, B. Fudala, and T. J. Slooff, "Adaptive bone-remodeling theory applied to prosthetic-design analysis," J. Biomech., vol. 20, no. 11 - 12, pp. 1135 - 1150, Jan. 1987.

[3] I. G. Jang and I. Y. Kim, "Computational study of Wolff's law with trabecular architecture in the human proximal femur using topology optimization," J. Biomech., vol. 41, no. 11, pp. 2353 - 2361, 2008.

[4] T. ADACHI, Y. TOMITA, H. SAKAUE, and M. TANAKA, "Simulation of Trabecular Surface Remodeling based on Local Stress Nonuniformity.," JSME Int. J. Ser. C, vol. 40, no. 4, pp. 782 - 792, 1997.

[5] M. SINGH, A. R. NAGRATH, and P. S. MAINI, "Changes in Trabecular Pattern of the Upper End of the Femur as an Index of Osteoporosis," J. Bone Jt. Surg., vol. 52, no. 3, pp. 457 - 467, Apr. 1970.

[6] G. S. Beaupré, T. E. Orr, and D. R. Carter, "An approach for time-dependent bone modeling and remodeling-theoretical development," J. Orthop. Res., vol. 8, no. 5, pp. 651 - 661, Sep. 1990.