

나노인덴테이션을 이용한 인체 피질골 골층판의 물성연구

최환석*, 송정일, 주원경

Mechanical properties on nanoindentation measurements of osteonic lamellae in a human cortical bone

Hwan Seok Choi*, Jung Il Song, Won Kyung Joo

Abstract

In the proposed research plan, the effects of anisotropic and time-dependent mechanical properties on nanoindentation measurements of osteonic lamellae in a human cortical bone are investigated. The most popular method(Oliver-Pharr method) in nanoindentation data analysis is based on the assumption of elastic isotropy. Since cortical bone has exhibited anisotropy, it is necessary to consider the effects of anisotropy on nanoindentation measurement for cortical bone. By comparison with the contact area obtained from monitoring the contact profile in FEA simulations, the Oliver-Pharr method was found to underpredict or overpredict the contact area due to effects of anisotropy. The amount of error depended on the indentation orientation. The indentation modulus results and were also similar to moduli calculated from mathematical model. The Oliver-Pharr method has been shown to be useful for providing first order approximations in analysis of anisotropic mechanical properties of cortical bone, although the indentation modulus is influenced by anisotropy.

1. 서론

골(뼈)의 기계적인 물성은 서로 다른 구조레벨에서 변화가 심하며, 이러한 다양한 골조직의 초구조(unstructure)와 같이 서로 다른 골의 기계적물성은 임상 시 중요한 정보를 제공하기 때문에 골의 구조적특성에 관한 연구는 최근 많은 관심을 받고 있다. 그러나 이러한 특성은 특히 미세구조가 잘 알려지지 않은 상태여 서 본 연구에서는 나노 인덴테이션 측정하여 이들의 영향을 조사하고자 하는 것이다. 즉 본 연구의 목적은 인간의 피질골에서 골층판(osteonic lamellae)의 나노인덴테이션 측정을 통하여 비등방성과 시간에 의존한 기계적인 물성을 측정하고 이론적 결과 및 유한요소해석 결과와 상호 비교하여 그 타당성을 검증하고자 하였다.

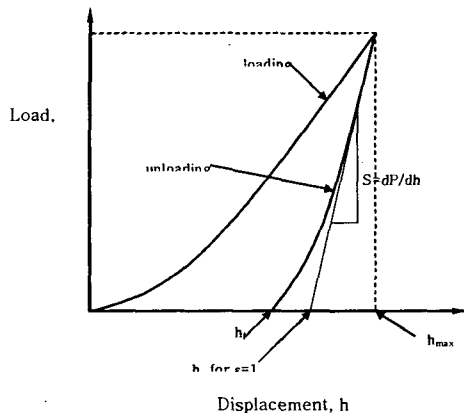
2. 연구의 이론적 배경

Doerner 와 Nix에 의해 개발된 아이디어를 발전시킨

Oliver-Pharr 방법은 나노인덴테이션 데이터를 해석하는데 가장 널리 사용된다. Fig. 1은 하중과 변위곡선을 나타내는 것으로 하중부과시 탄성과 소성변형은 접촉면이 깊어 증가에 따라 변화한다. 그러나 하중 제하곡선(unloading curve)은 대부분 탄성 데이터로 구성된다. 탄성회복이 제하 위치에서 발생되기 때문에 시험재료의 탄성물성을 측정하는 것이 가능하다. 연구방법은 점탄성과 시간에 따른 소성영향 고찰, 나노인덴테이션을 이용한 피질골의 비등방성 물성측정, 유한요소해석을 통하여 피질골의 비등방성 물성 연구 등으로 구분하여 각각의 방법을 기술하였다.

3. 연구결과 및 고찰

Table과 같이 인체 피질골은 서로 다른 압입율에 따라 단순하중과 제하하중 대 시간함수로 압입한 결과, 탄성계수는 압입율의 증가에 따라 증가하였고, Power law에 따라 탄성계수와 변형율은 다음과 같다.



$$E = 48.93(\epsilon) 0.1002 \text{ with } R^2 = 0.70$$

Fig 1. A schematic representation of load vs indenter displacement

여기서 E 는 탄성계수, ϵ 는 탄성율이다.

Table 1 The elastic Modulus and Strain rate results regarding to different indentation rate.

Indentation rate	Elastic Modulus (GPa)	Strain rate (s^{-1})
10uN/s	18.60(0.92)	330(90)
30uN/s	25.78(1.90)	460(50)
50uN/s	24.66(0.41)	710(100)
100uN/s	26.50(0.98)	1270(140)
300uN/s	26.92(2.24)	4310(320)
500uN/s	28.91(1.51)	6440(680)
1000uN/s	32.22(1.51)	13560(2360)

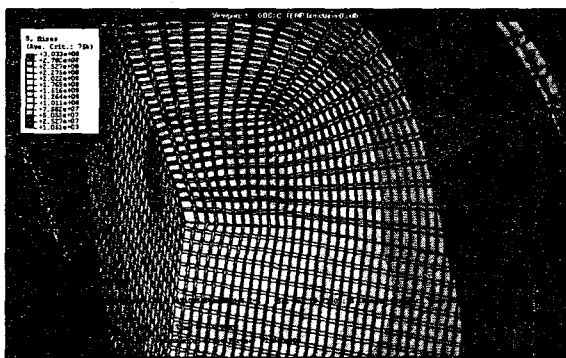


Fig. 2 Von Mises distribution of 3D model with working hardening rate input

5. 결론

본 연구에서 3차원 FEA모델은 나노인덴테이션과정의

몇 가지 제한사항에도 불구하고 피질골의 반응을 충분히 나타내었다. 따라서 FEA를 이용하면 유한요소의 실제 접촉경로를 관찰할 수 있으며, 여기에서 접촉면을 구할 수 있다는 장점을 가질 수 있다. 유한요소의 접촉면을 비교해볼 때 Oliver-Pharr 방법은 접촉면을 근소하게 과대 또는 과소평가 하였다. 그 차이는 인덴테이션의 방향에 좌우된다. 또한 비등방성이 접촉면에서 불균형한 응력분포를 발생시킨다. 나노인덴테이션 측정에서 Oliver-Pharr의 방법은 탄성강성행렬의 좌표변환으로부터 구한 Young's modulus와 비교한 수학적모델의 결과와 유사한 경향을 나타내었고, FEA 결과 역시 실험 데이터와 유사한 경향을 나타내었다. 따라서 Oliver-Pharr 방법은 접촉면의 추정에 대한 제한사항에도 불구하고 미세구조단위의 비등방성 배조직을 평가하는데 유용한 근사해를 제공한다고 제안할 수 있다.

후기

이 논문은 2003년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Rho JY, Kuhn-Spearing L, Zioupos P. Mechanical properties and the hierarchical structure of bone. Med Eng Phys 1997; 20 92-102.
2. Oliver WC, Pharr GM. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. J Mater Res 1992; 7:1564-1583.
3. Doerner MF, Nix WD. A method for interpreting the data from depth-sensing indentation instruments. J Mater Res 1986; 1 601-609.
4. Buckwalter JA, Einhorn TA, Simon SR. Orthopaedic basic science biology and biomechanics of the musculoskeletal system. 2nd Edition. AAOS. 2000.
5. Roesler H. Some historical remarks on the theory of cancellous bone structure (Wolff's law) In: Cowin, SC, editor. Mechanical properties of bone. American Society of Mechanical Engineers. New York; 1981. p 27-42.