

## 미세 골조직의 공극탄성계수 측정을 위한 예비 연구

박영환(고려대 산업기술연구소), 홍정화(고려대 제어계측공학과)

### A Pilot study of poroelastic modulus measurement in micro-bone tissue

Y. H. Park(Institute of Industrial Technology, Korea Univ.), J. H. Hong(Dept. of Control & Instrumentation Eng., Korea Univ.)

#### ABSTRACT

In this study, developed a micro-level experimental setup to measure pore pressure and poroelastic modulus in various strain and strain rate about a stress in micro-structure of bone tissue. It is essential device in the development of the model to analysis the interstitial bone fluid flow of the lacuno-canalicular system to be known that would effect on the bone remodeling. The constitution of the experimental setup is as follows, microscopic image processing system; actuator control unit; load measurement system. A pilot study was used an artificial chemical wood to have similar poroelastic property of bone matrix and conducted to validate the suitability of the measurement system.

**Key Words** : English Key Word: PZT-Actuator (피에조 액츄에이터), Poroelasticity(공극탄성), Poroelastic modulus measurement(공극탄성계수 측정)

#### 1. 서론

모든 뼈들은 강하고 밀도가 높은 뼈의 바깥 층(Cortical bone)과 해면조직과 같은 망상조직으로 된 속 층(Trabecular bone)으로 되어있고, 이러한 뼈들은 부가성장(Appositional growth)이라고 불리는 절차를 통하여 옛기질(Old matrix)에 새기질(New matrix)을 더하는 방식으로 성장하는데, 신진대사의 조건과 기계적인 힘에 반응하여 이미 형성되어있는 뼈를 재흡수 함으로써 그 구조를 재형성하는 것으로 알려져 있다.

골격 재형성의 생체역학적 메커니즘을 규명하기 위하여 미세골조직, 골세포 수준의 수많은 연구가 수행되었고 그 결과 재형성 거동은 골조직 내부에서 골세포(Osteocyte)가 있는 골열공(Lacunar)과 골세포가 다른 골세포와 교신하기 위하여 있는 돌기가 위치하는 관인 골세포관 내부에 있는 골수(Bone marrow)의 기계적 흐름에 의하여 지배되며 골세포

간의 교신은 외력에 의하여 골조직이 변형할 때 골수의 유동에 의하여 자극된 골세포가 골조직 재형성에 대한 신호를 형성하여 골조직내의 골세포에게 정보를 전달함으로써 이루어지는 것으로 보고되었다[1-10].

이러한 생체역학적 골조직의 재형성 관련 연구는 인체에 대한 인공 관절의 이식, 골절의 치료, 골다공증, 골관절염 등, 뼈와 관련된 모든 치료에 있어서 매우 중요한 의학적 문제로 대두되고 있음에도 불구하고 현재 국내에서는 골세포와 미세 골조직 단위에 대한 연구가 수행된 바 없으며, 특히 골조직의 재형성에 직접적인 영향을 주는 것으로 알려진 골열공-세관(Lacuno-canalicular) 시스템의 골수 거동(Interstitial bone fluid flow)에 대한 연구는 전혀 이루어지지 않고 있다.

따라서 골열공-세관 시스템의 골수 거동을 해석하기 위한 미세 골조직의 공극탄성론 모델의 개발이 필요하며 이를 위하여 미세 골조직 CCN(Connected cellular network)에서 외부 응력에 대

한 변형률과 다양한 변형률속도 조건에서의 공극압력, 4 가지의 등방성 공극탄성계수(Drained Shear Modulus, Drained Poisson's Ratio, Undrained Poisson's Ratio, Skempton's Coefficient), 투수계수(Permeability) 등의 측정이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 미세 골조직의 공극탄성계수 측정을 위하여 개발되어진 마이크로 레벨의 실험장치를 이용하여 골조직의 측정에 앞서 골조직과 유사한 공극탄성 특성을 보이는 화학적으로 가공된 인조목을 이용한 압축실험을 수행하여 인조목의 탄성변형거동과 실험장치의 적합성을 평가 하였다.

## 2. 실험장치와 시편

### 2.1 실험장치

본 연구에서는 미세 골조직의 공극탄성계수와 공극압력을 측정할 수 있도록 개발된 실험장치를 이용하였고 Fig. 1 과 같이 그 구성은 시편을 압축하는 가동기인 피에조 액추에이터와 하중을 측정하는 로드셀, 미세구조를 관찰하는 이미지 분석 시스템, 입출력 신호 처리를 위한 제어부로 되어있으며 실제 모습을 Fig. 2 에 나타내었다. 일반적인 만능재료 시험기와는 달리 수직 및 수평으로 하중을 가할 수 있는 장치이며 마이크로 피스톤과 챔버에서는 일축 변형 조건(Uniaxial Strain Condition)에서 공극탄성체의 공극압력을 측정할 수 있다.

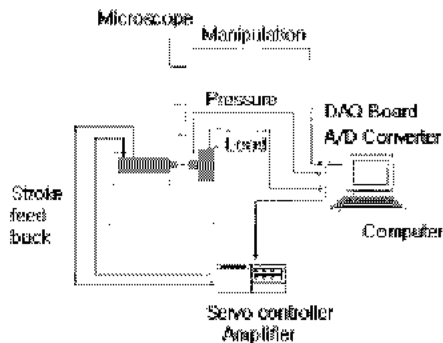


Fig. 1 Schematic diagram of a micro-level compression test system

#### 2.1.1 PZT 액추에이터와 로드셀

실험장치에서 시편을 최대 100  $\mu\text{m}$  정도의 변형을 가했을 때 시편에 작용하는 이론적인 하중은 약 200N 가량 될 것으로 예상되고 정확한 변형률을 제어하기 위해서 고정밀도의 액추에이터가 필요하다. 따라서 입력 전압에 대한 변위의 선형성 제어가 우수한 피에조(PZT) 액추에이터를 이용하였다. 고하

중을 가할 수 있는 독일 PI 사의 P-245.77 모델로서 0 ~ 1000V의 고전압 구동방식이며, 길이 121 mm, 직경 18 mm의 몸체에 길이 5.7 mm, 직경 8 mm의 구동부로 이루어져있고 최대구동범위는 120  $\mu\text{m}$ 이다. 액추에이터 내부에 장착된 센서에서 피드백 된 신호에 의하여 입력 전압에 대한 실제 변위를 제어하며, 분해능은 2.4 nm이고 하중 용량은 인장과 압축에 대하여 각각 300N 과 2000N 이다. 12 비트 D/A 변환기를 사용하여 제어 시 실제 분해능은 30 nm가 되며 상용 소프트웨어인 LabView 를 이용하여 입력 변위와 변형률속도를 제어하게 된다.

하중은 10, 50Kg 용량의 로드셀을 교체할 수 있도록 하여 유출 및 비유출 조건(Drained & Undrained condition) 모두에서 측정이 가능하도록 하였으며 분해능은 각각 0.002, 0.15 Kg이다.

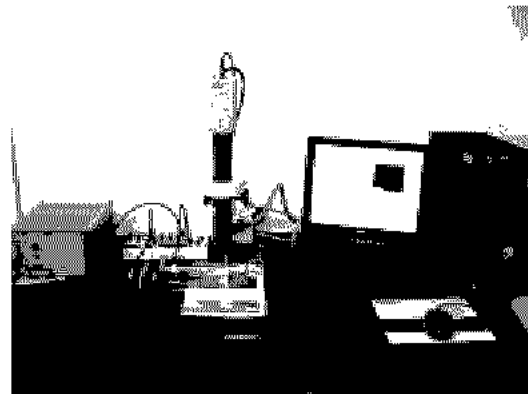


Fig. 2 Developed micro-level compression test system

#### 2.1.2 이미지 분석 시스템

시편의 표면 상태와 액추에이터의 구동 변위 등을 관찰하기 위해서 특수 가공을 한 어댑터를 사용하여 추가로 렌즈를 구성하여 고배율의 영상 획득이 가능하다. 줌 렌즈는 미국 NAVITAR 사의 12 배 렌즈를 사용하였고 여기에 2X2 렌즈를 부착하였으며 HITACHI 사의 1/2" 의 디지털 줌 방식인 KP-D56 CCD 카메라를 장착하여 14" 모니터를 기준으로 약 6000 배의 크기로 조직을 관찰하고, 장치를 셋팅 할 수 있다. 광원은 100W 용량의 할로겐 일루미네이터를 사용하였다.

컴퓨터에서의 영상 획득과 처리는 상용 소프트웨어인 ViewAnalyzer Basic 을 사용하며 이것은 COM(Component Object Model) 기반으로 개발된 소프트웨어로서 셀 카운팅, 표면적 계산, 다중 초점 촬영 등의 디지털 영상 처리 및 분석이 가능하다.

### 2.2 시편

미세골조직은 Fig. 3 과 같이 수많은 세공들이 존재하는 공극탄성체이다. 따라서 이와 유사한 공

극탄성 특성을 보이는 조직으로는 화학적으로 가공된 인조목(Chemical wood)이 가장 적합한 것으로 판단되어 골조직 실험에 앞선 예비 연구로서 인조목을 이용한 압축실험을 수행하여 탄성변형거동과 실험장치의 적합성을 평가 하였다.

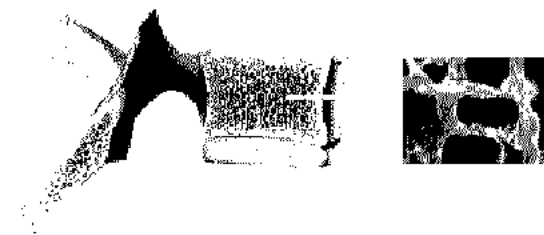


Fig. 3 Micro structure of bone tissue

### 2.2.1 인조목 시편

실험에 사용된 인조목은 (주)세동폴리머에서 생산하는 합성수지이며 목재보다 작업성이 우수하고 결이 없어 가공 중 또는 가공 후 체적 안정성이 뛰어나며 가공 후 목재의 단점인 표면거칠기가 보완된 소재로서 디자인모델 및 샘플 제작이나 설계 금형의 시험가공에 주로 사용되며 밀도가  $0.862 \text{ g/cm}^3$  인 공극탄성체이다. Fig. 4 에는 현미경으로 관찰한 인조목의 표면을 나타내었으며 수십에서 수 마이크로미터의 직경을 갖는 공극들을 확인할 수 있다.

### 2.2.2 시편의 가공

시편은 분해능이  $10 \mu\text{m}$  인 일본 로랜드(ROLAND D. G.)사의 3 차원 형상 가공기(Desktop engraver: EGX-300, Fig. 5)에서 마이크로 엔드밀과 코어드릴을 사용하여 원통형과 육면체의 두 종류로 가공하였다. Fig. 6 (a)의 원통형 시편은 직경이  $450 \mu\text{m}$  이고 길이가  $930 \mu\text{m}$  로서 1:2 의 형상비를 고려하였고 Fig. 6 (b)의 육면체 시편은 한 변의 길이가  $300 \mu\text{m}$ 인 정육면체로 가공을 하였으나 압축부의 표면처리 과정에서 평형을 맞추기 위한 연삭에 의하여 압축방향의 길이가  $235 \mu\text{m}$ 로 감소하였다.

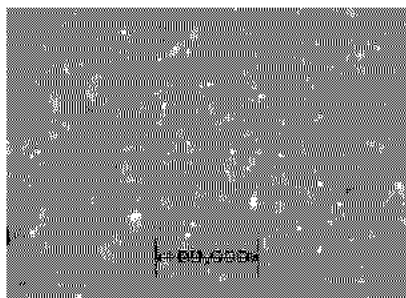


Fig. 4 Microphotograph of specimen surface(unit; $\mu\text{m}$ )

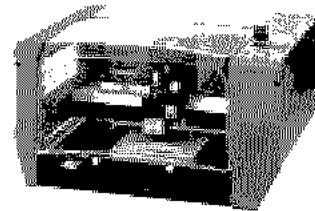
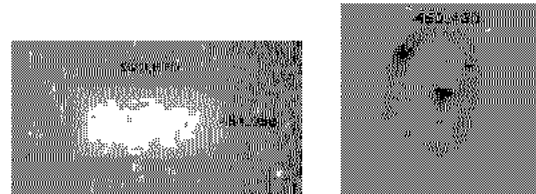
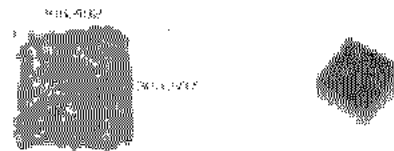


Fig. 5 Desktop engraver: EGX-300(Roland, Japan)



(a) Cylindrical specimen



(b) Cubic specimen

Fig. 6 Shape of specimens



Fig. 7 Experimental setup

## 3. 실험 결과

가공된 두 종류의 시편을 Fig. 7 과 같이 SUS 재질의 플레이트에 설치하여 상온에서 압축실험을 수행하였다. 변형률은 탄성영역으로 예상되는 0.5%를 초과한 2%를 최대로 하였고 변형률속도는 준평형상태(quasi-statics)를 고려하여  $30 \text{ mm/sec}$ ( $18 \mu\text{m}/10\text{min}$ )로 하였다. 실험 결과로서 각 시편의 응력-변형률 곡선과 하중-변위 곡선을 Fig.8 과 Fig.9 에 나타내었다. 측정된 탄성계수는 원기둥과 육면체 시편에서 각각 1.5, 1.6 GPa 인 것으로 나타났으며 하중방향의 길이가 원기둥 시편의 25% 정도인 육면체 시편에서 동일한 변형률에 대하여 상대적으로 큰 응력이 발생하는 것으로 나타났다.

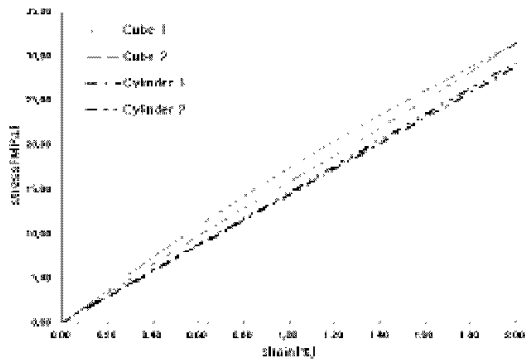


Fig. 8 Stress-strain curve

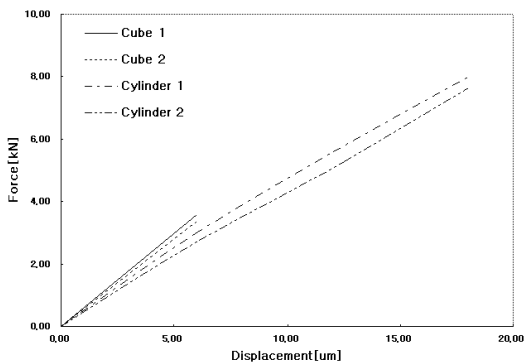


Fig. 9 Force-displacement curve

#### 4. 결론

본 연구에서는 미세 골조직의 외부 응력에 대한 변형률과 다양한 변형률속도 조건에서의 공극 압력, 공극탄성계수 등의 측정을 위하여 개발되어진 마이크로 레벨의 초정밀 실험장치를 이용하여 골조직의 측정에 앞서 골조직과 유사한 공극탄성 특성을 보이는 인조목을 시편으로 하여 압축실험을 수행하여 탄성변형거동을 살펴보았다. 골조직의 일반적인 탄성변형 한도는 1% 이하이지만 본 연구에서는 최대 2%의 변형을 가하여 실험장치의 적합성을 평가하였고 그 이상의 압축실험도 가능한 용량임을 확인할 수 있었다. 거시적인 인장, 압축실험에서의 시편은 규격화되어 있지만 본 연구와 같은 미세적인 개념에서의 규격화는 전무한 실정이다. 따라서 시편 단면의 형상과 형상비 등을 고려한 실험이 충분히 수행되어 미세조직의 시편 규격화가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 또한 이러한 실험장치는 골열공-세관 시스템에서의 골수 유동에 의한 압력구배 측정실험도 충분히 가능할 것으로 예상된다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구사업(R01-2003-000-10798-0)의 지원에 의해 수행되었다.

#### 참고문헌

1. J. Wolff: Das Gesetz der Transformation der Knochen, Berlin, 1892.
2. C. T. Rubin and L. E. Lanyon: Dynamic strain similarity in vertebrates; an alternative to allometric limb bone scaling, *J. Theoretical Biology*, Vol. 107, pp. 321-327, 1984.
3. R. A. Hillam: Response of bone to mechanical load and alterations in circulating hormones. Ph.D. Thesis, University of Bristol, 1996.
4. S. Judex and R. F. Zernicke: Does the mechanical milieu associated with high-speed running lead to adaptive changes in diaphyseal growing bone? *Bone*, Vol. 26, pp. 153-159, 2000.
5. T. M. L. Knothe and U. Knothe: An ex vivo model to study transport processes and fluid flow in loaded bone. *J. Biomech.*, Vol. 33, pp. 247-254, 2000.
6. L. E. Lanyon: Functional strain as a determinant for bone remodeling. *Calcif. Tissue Int.*, Vol. 36, S56-61, 1984.
7. S. A. Goldstein, L. S. Matthews, and J. L. Kuhn: Trabecular bone remodeling: and experimental model. *J. Biomech.* Vol. 24, pp. 135-150, 1991.
8. S. P. Fritton, K. J. McLeod, and C. T. Rubin: Quantifying the strain history of bone: spatial uniformity and self-similarity of low magnitude strains. *J. Biomech.* Vol. 33, pp. 317-325, 2000.
9. J. A. O'Connor, L. E. Lanyon, and H. MacFie: The influence of strain rate on adaptive bone remodeling. *J. Biomech.*, Vol. 15, pp. 767-781, 1982.
10. S. Weinbaum, S. C. Cowin, and Y. Zeng: Excitation of osteocytes by mechanical loading-induced bone fluid shear stresses. *J. Biomechanics*, Vol. 27, pp. 339-360, 1994. Tlusty, J., Smith, S., and Zamudia, C., "Operation Planning Based on Cutting Process Model," *Annals of the CIRP*, Vol. 39, pp. 517 - 521, 1990.