

## 구형압입시험을 통한 망상골의 기계적 물성 연구

배태수 · 김정규 · 이태수\* · 최귀원

한국과학기술연구원, 의과학연구소, \*서강대학교 기계공학과  
(2001년 8월 20일 접수, 2001년 10월 16일 채택)

### A Study of the Mechanical Properties of Human Trabecular Bone by Spherical Indentation Test

Tae Soo Bae, Jung Kyu Kim, Tae Soo Lee\*, Kuiwon Choi

Biomedical Research Center, Korea Institute of Science and Technology

\*Dept. of Mechanical Engineering, Sogang University

(Received August 20, 2001. Accepted October 16, 2001)

**요약** : 골다공증의 조기 발견 및 치료예후에도 영향을 미치는 망상골 구조의 영률(Young's Modulus)은 그 대상이 사람이므로 일반적인 인장 및 압축시험으로 구해내기 불가능한 실정이다. 본 연구에서는 망상골 구조가 지니고 있는 영률을 평가함에 있어서 구형압입시험을 통하여 망상골 구조의 영률을 구하고자 하였으며, 이를 전산화단층촬영(CT)에서부터 얻을 수 있는 밀도와 실제 측정해서 얻은 밀도와의 관계를 정량화하고자 한다. 31세 남성의 좌우 원위 대퇴골을 해부학적 좌표를 고려하여 고정한 다음 GE9800 CT장비를 사용하여 1mm간격으로 단층촬영을 실시하였으며, 각 영상으로부터 CT수(HU)를 구하였다. Diamond saw를 사용하여 좌우 대퇴골로부터 72개의 8mm 정방형 시편들을 추출하였으며, 제작한 구형압입시험기를 사용하여 각 시편의 IS, AP, 그리고 ML방향으로의 압입시험과 압축시험을 각각 실시하였으며, 이후 시편의 실제 절보기 밀도를 측정하였다. 그 결과 IS방향의 영률이 AP 및 ML방향보다 유의하게 크게 나타났으며, AP방향의 영률 역시 ML방향보다 유의하게 큰 영률을 나타냄을 통하여 망상골의 직교성을 알 수 있었다. CT수와 각 방향의 영률과의 관계에서도 선형적 관계보다는 역관계로 보다 더 잘 설명되어짐을 알 수 있었는데, 이는 이전의 연구자들과 동일한 결과임을 알 수 있었다.

**Abstract** : We intended to evaluate the Young's modulus of trabecular bone of a human distal femur by spherical indentation test and CT images and to quantify relationships between the direction of load, density, and Young's modulus. The specimens were scanned at 1 mm intervals on CT scanner. After scanning, the bones were sectioned with diamond saw, producing 8mm cubes of trabecular bone. The cubes were mechanically tested in inferior-superior(IS), anterior-posterior(AP), and medial-lateral(ML) direction with custom-made device. After testing, the real apparent density of specimens were measured. The results of this study showed that the IS modulus was significantly greater than both the AP and ML modulus and the AP modulus was also greater than ML modulus significantly( $p < 0.01$ ). A significant power relationship between the apparent density and the modulus was also found.

**Key words** : Trabecular bone, Spherical Indentation Test, CT, Apparent density

## 서 론

망상골은 피질골과 달리 해부학적 부위별로 그 밀도(apparent density) 및 구조가 크게 차이가 나서 이에 따른 강도 및 탄성계수의 편차가 심하다. 일반적으로 망상골의 영률은 피질

골의 영률에 비하여 아주 낮은 값을 보여주고 있는데, 이는 망상골의 밀도가 피질골에 비해 15~50%정도이기 때문이다. 또한 망상골의 강도는 피질골에 비하여 현저히 낮은 반면, 구조적인 특성으로 인하여 파괴가 발생하기까지 상당한 양의 에너지가 흡수되며, 이는 충격하중에 대한 저항력을 현저하게 높여주는 등 망상골의 생체역학적 기능이 중요함을 알 수 있다. 따라서 이에 따른 망상골의 기계적 물성인 영률을 정확히 측정하는 것은 조직수준의 수학적 응력분석, 인공관절의 모델링, 그리고 그에 따른 유한요소해석에 있어서 골 성장능력을 정량화 하는데 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다[1-7].

본 논문은 보건복지부 선도기술개발 사업(G-7) 지원으로 이루어 졌음.  
통신저자 : 최귀원, (136-791) 서울시 성북구 하월곡동 39-1  
한국과학기술연구원 의과학연구소  
Tel. 02)958-5921, Fax. 02)958-5909  
E-mail. choi@kist.re.kr

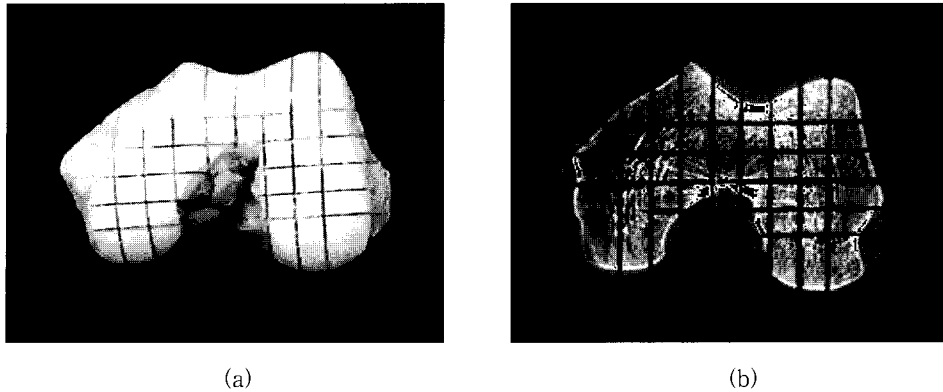


Fig. 1. (a) Total shape of distal femur with saw marks defining 8-mm columns of bone  
(b) Computed tomography scan of the same femur

근래에 들어 골내부의 골량감소로 인해 나타나는 골다공증이 사회적인 관심사로 대두됨에 따라 골다공증의 조기발견 및 치료예후에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 이러한 골다공증을 조기발견 및 치료예후를 위해 골다공증과 관계가 깊은 망상골의 밀도와 그에 상응하는 기계적 물성과의 상호연관성을 망상골의 이방성(Anisotropy)을 고려하여 찾고자 많은 연구가 이루어졌다[8-10]. 기존의 시험방법은 일반적으로 인장 및 압축시험이 주를 이루었는데, 이러한 시험은 시편준비의 어려움이나 시편을 완전한 파단(fracture)시킴으로 재료의 기계적 물성을 평가하는 반면 최근에 들어 간단한 압입으로 인한 압흔(Indentation impression)만을 통하여 재료의 영률은 찾을 수 있는 비파괴적 시험방법(Non-destructive Test)이 새롭게 소개되어지고 있다[11,12].

본 연구에서는 망상골 구조의 영률을 측정함에 있어서 망상골이 지니고 있는 특성을 고려한 새로운 시험방법인 구형압입 시험을 제시하고자 하였다. 또한 망상골은 밀도 혹은 다공성(porosity)에 따른 기계적 성질이 비례적으로 변화하는 것으로 알려져 있으며, 이것은 대체로 선형적인 관계(linear) 혹은 멱관계(power)로 나타내고 있는데, 현재로서는 의견이 분분한 상태이다. 따라서 본 연구에서 구현한 구형압입시험기와 전산화 단층촬영, 및 직접적 측정방법을 이용함으로써 망상골의 골밀도와 기계적 물성간의 관계를 정량화하고자 한다.

## 연구대상 및 방법

시편은 31세 남성의 좌우 원위 대퇴골(distal femur)로써, 기계적인 가공을 하기 전까지  $-70^{\circ}\text{C}$  냉동고에 보관하였다. 보다 정확한 시험을 위해 원위 대퇴골을 anterior-posterior(AP), medial-lateral(ML), 그리고 inferior-superior(IS) 방향을 고려하여 해부학적인 좌표를 정한 후 Plastic Mix(Vertex, Dentimex Inc.)를 사용하여 원위 대퇴골의 diaphysis를 고정함으로써 기계적 가공시의 움직임을 방지하도록 하였다. 구형압입시험과 전산화단층을 수행하였으며, 이때 동일한 지점에 대해 보다 정확한 비교를 위해서, 관상면과 시상면으로만 시편을

각각  $8\text{mm}\times 8\text{mm}$ 의 정사각형으로 Diamond saw (EXACT Precision Parallel Control 300CP/310CP, EXACT Apparatebau GmbH)를 사용하여 최대 50 mm 정도로 절단하였으며, 절단시 계속적으로 물과 생리식염수를 사용하여 절단으로 인해 발생하는 열에 의한 과사와 단층촬영시 시편의 밀도에 영향을 미치는 뼈파편을 줄이고자 하였다. 관상면과 시상면으로만 절단된 후 전산화단층촬영을 통하여 망상골 시편의 겉보기 밀도를 구하고자 경희의료원의 GE-9800 Quick(General Electric Medical System) 기종을 사용하여, 각 단면의 두께는 1.5 mm, 간격은 1 mm로 정하여서, 각각 45개씩의 횡단면을 촬영하였으며, 이 때의 좌표는 시편을 고정할 때 이용되어진 해부학적인 좌표를 동일하게 사용하였다(Fig. 1). 저장되어진 자료들은 Extract(Cornell Univ.)라는 edge-detection 프로그램을 사용하여서 망상골의 영상을 재현 및 망상골의 Hounsfield Unit (HU or CT number)을 구하였다.  $8\text{mm}\times 8\text{mm}$ 의 망상골위에 임의로 10군데의 HU를 구하여서 평균을 하였으며, 실제 구현할 시편의 크기를 고려하여 8개의 단면들에도 동일하게 HU를 측정하여 전체 8단면의 HU를 평균화함으로써 1개의 시편의 HU를 정하였다. 측정되어진 HU는 Hvid *et al.*의 식(apparent density= $0.0013\cdot\text{HU}+0.103$ ,  $R^2=0.935$ )을 이용하여 겉보기 밀도로 변환하였다.

구형압입시험을 통하여 망상골의 기계적 물성을 구하고자 다시금 diamond saw에 관상면과 시상면 절단시, 그리고 전산화 단층촬영시와 동일한 해부학적인 좌표로 맞추어서 재고정하였다. 시편을 횡단면으로 절단하기 위하여 먼저 석고봉대를 사용하여 관상면과 시상면으로 절단되어서 약해진 원위부 대퇴골을 횡단면 절단시 움직이지 않도록 하였으며, 석고가루가 절단되어진 시편사이로 쓰며들지 못하도록 솜을 사용하여 빈공간을 먼저 채웠다. 횡단면 절단시도 관상면과 시상면 절단시와 동일한 방법으로 절단하였으며, 최종적으로 각 대퇴골으로부터  $8\text{mm}$  정방형의 망상골 시편 72개를 구하였다(Fig. 2). 구해진 각각의 망상골에 해부학적인 방향을 표시하였으며, 각 원위부 대퇴골을 총 3단면으로 절단하였으며, 절단 직후 생리식염수에 담궈 씻어서, 면봉대로 감싸서 시험전까지  $-20^{\circ}\text{C}$ 의 냉동고에

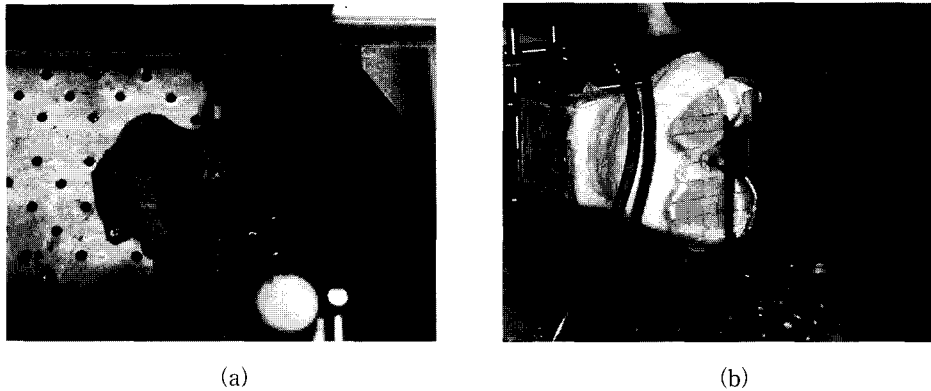


Fig. 2. Axial(a) and Transverse(b) cutting with diamond saw

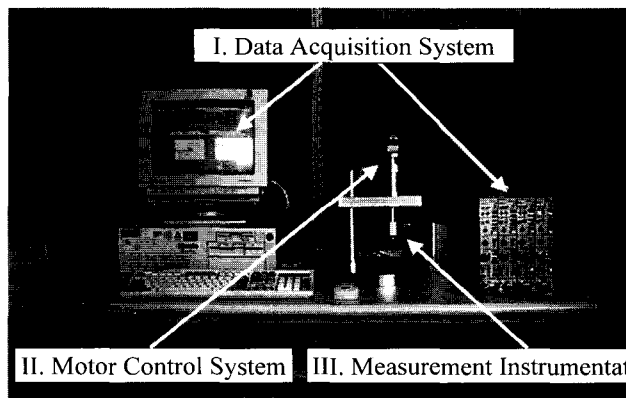


Fig. 3. The configuration of total indentation system

보관하였다.

본 실험에서 구현한 시험기는 크게 모터제어부, 측정부, 그리고 자료 검출부로 나뉘어서 구성하였다. 또한 각 부위들을 모듈화시킴으로 각기 다른 장치로의 호환이 가능하게끔 구성하였으며, 모든 제어는 C-언어를 이용하여 프로그래밍하였다 (Fig. 3). 본 실험에서는 인장 및 압축하중을 동시에 측정할 수 있는 로드셀(Interface Inc. Model SML 25 lbs)을 선정하였으며, 로드셀의 신호를 검출하기 위하여 A/D보드(Workmate series, Strawberry Tree Inc.)을 사용하였다. 또한 초정밀 LVDT(Schaevitz Inc.)을 사용함으로써 압입으로 인해 발생하는 상대적인 변위를 측정하였다. 그리고 마지막으로 압입자를 선정함에 있어 압입깊이와 압흔직경의 관계가 비선형적이기 때문에 이론적으로 약 20% 이하의 모든 변형을 구할 수 있는 구형 압입자를 선정하였다. 또한 시험기기의 유효성을 검증하기 위해 아크릴(acryl), 알루미늄(aluminum), 황동(brass), 구리(copper), 그리고 강철(steel)에 대한 압입시험을 실시하였으며, 주어진 영률과의 비교시 5%미만의 오차를 보였다(Fig. 4). 본 연구에서 사용된 하중-해중속도는 접근(approach)-하중(load-ing)-정지(holding)-해중(unloading) 4단계로 정하였으며, 모든 동작들은 프로그램을 통하여 자동화하였다. 먼저 접근단계에서는 1 μm/sec속도로 시편의 표면에 접근하였으며, 하중단계에 이르러서는 2.5 μm/sec로 등속도로 하중을 시편에 가하였다. 또한

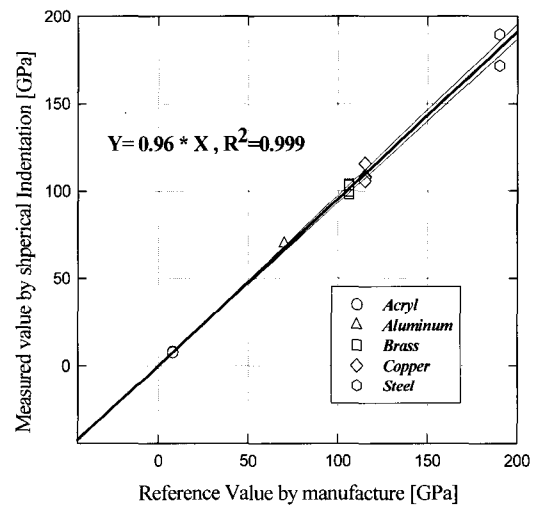


Fig. 4. Verification of the elastic modulus measurements using spherical indentation tester

하중단계에서 해중단계로의 변환을 위해 순간적으로 정지단계를 거치게 하였으며, 이후 하중시의 속도와 동일한 속도로 해중하였다. 준비되어진 망상골의 시편을 -20℃에서 꺼내어 상온에서 30분 동안 해동하였으며, 이물질의 영향을 고려하여 생리식염수를 사용하여 다시금 세척하였다. 또한 세척 후 각각의 시편을 붕대(gauge)로 감싼 후 분리되어진 상자에 넣은 채 시험직전까지 생리식염수로 채워놓음으로 지속적인 습한 상태(wet state)를 유지시켰다. 각 시편에 대해 해부학적으로 AP, ML, 그리고 IS방향으로 본 연구에서 제작한 구형압입시험기를 사용하여 기계적인 시험을 실시하였다. 각 시험은 항복강도를 넘지않는 탄성영역에서 실시하였으며, 이는 지속적인 오실로스코프를 살피면서 실시하였다(Fig. 5). 그 결과 나타난 하중-해중 곡선을 이용하여 영률을 구하였다[11]. 또한 구형압입시험 결과와의 비교를 위해 동일한 시편을 사용하여 압축시험을 실시하였다. 이 때 압축시험시 사용된 장비는 Instron 8511을 사용하였으며, 20Hz의 Sampling Rate에 0.01 mm/sec의 속도로 압축하였다(Fig. 6). 또한 동일한 방법으로 IS, AP, 그리고

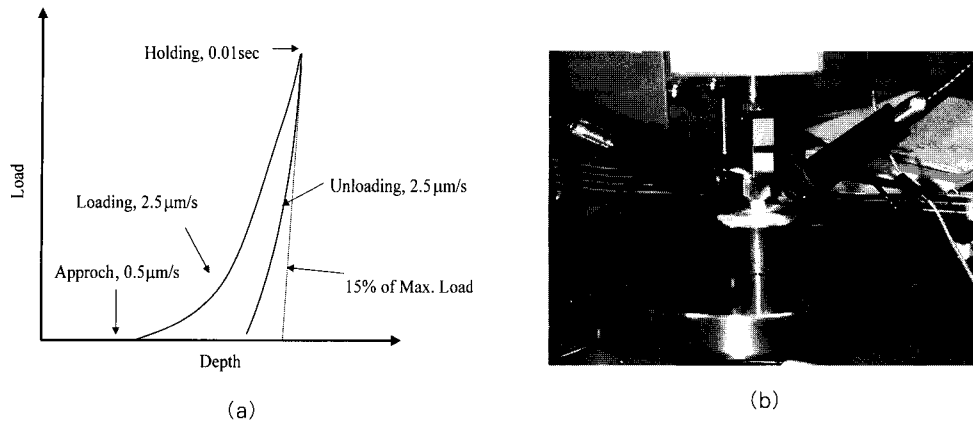


Fig. 5. (a) The different segments of the indentation test (b) Spherical Indentation test for cube trabecular bone

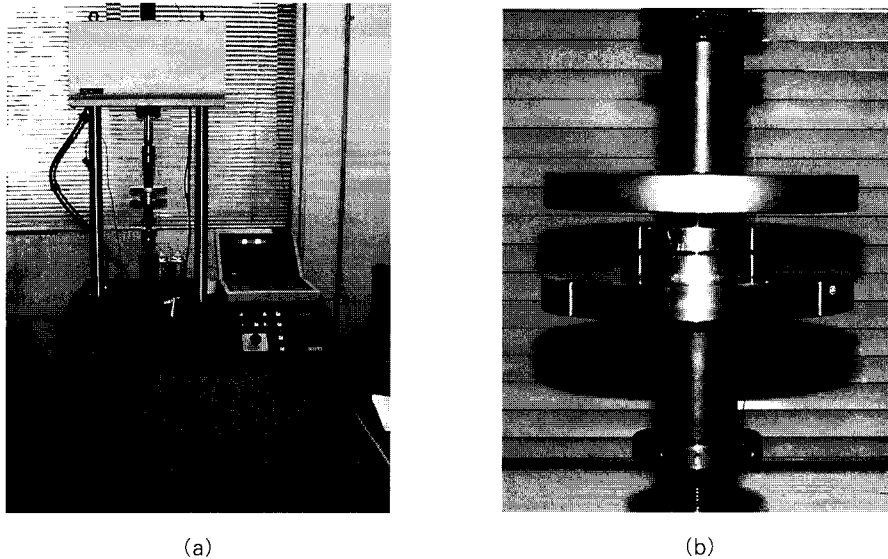


Fig. 6. Compression test for trabecular bone cube by Instron 8511 (a) Instron 8511 system (b) Custom-made Zig and Specimen

ML 방향으로 각각 시험을 실시하였다.

기계적 실험 후 실제 시편의 밀도를 측정하기 위하여 에탄올(70% ethanol)에 하루동안 담귀놓은 후 꺼내어, 원심분리기(High speed centrifuge, SORVALL® Centrifuge)를 사용하여 15분간 12,000 rpm으로 원심분리를 하였으며, Air injector를 사용하여 골수를 제거한 후에 뼈의 무게를 전자저울을 사용하여 측정하였다. 또한 압입시험 전에 기록되어진 시편의 부피를 사용하여 망상골의 밀도를 직접적으로 구하였다.

구형압입시험으로부터 나온 망상골의 영률과 전산화단층촬영을 이용하여 구한 겔보기 밀도 및 직접측정한 밀도와의 관계를 알고자 하여, 본 실험에서는 영률과 겔보기 밀도와의 관계를 제곱승법을 이용한 선형(Linear)모델과 멱(Power)모델로 회귀분석(regression analysis)를 실시하였다. 또한 망상골이 가지고 있는 이방성을 알고자 하여 AP, ML, 그리고 IS 방향의 영률에 대해서도 각각 통계분석을 실시하였다.

## 결 과

시편의 Hounsfield Unit 평균치는 76 HU에서 572 HU로 다양하게 나타났으며, 전체 평균치는 336.45 HU로 나타났고, 2개의 시편에 대한 평균치는 각각 324.2 HU와 348.5 HU로 나타났다. 기계적 시험 전에 기록되어진 시편의 부피와 또한 구형압입시험 후 고속 원심분리기와 전자저울을 사용하여 구하여진 실제 겔보기 밀도의 평균치는  $0.4 \text{ g/cm}^3$ 로 나타났으며, 이 때 HU와 실제 겔보기 밀도 사이에 상당히 높은 관계성이 있음을 알 수 있었다(Fig. 7).

구형압입자를 사용한 압입시험결과를 보면 IS방향, AP방향, 그리고 ML방향의 탄성계수의 평균치가 각각 1.48 GPa, 1.14 GPa, 그리고 0.97 GPa로 나타났다. 또한 대다수의 시편에서 IS방향의 탄성계수가 AP방향 및 ML방향의 탄성계수보다 평균적으로 22.5%, 34.5% 정도 크게 나타났으며, AP방향의 탄성계수는 ML방향의 탄성계수에 비해 평균적으로 15.5% 정도

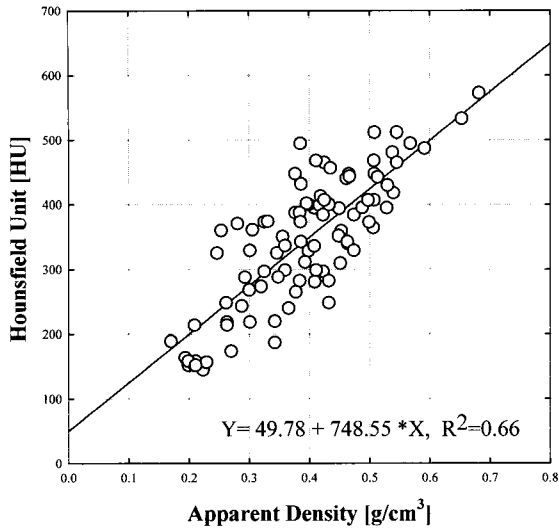


Fig. 7. The relation between apparent density and HU

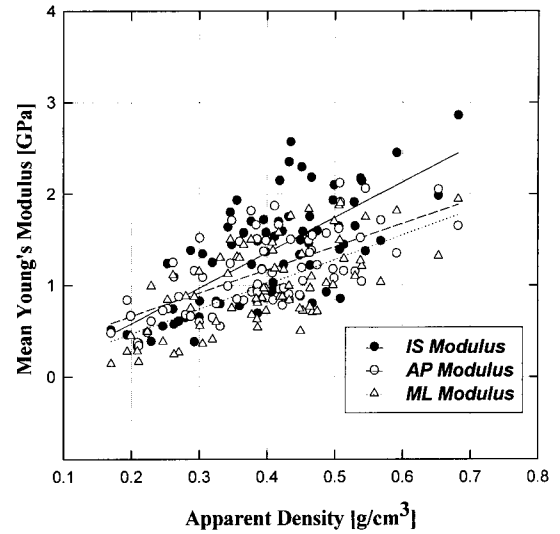


Fig. 8. Tangent elastic modulus during spherical indentation as a function of apparent density

큰 값을 보였다. 또한 Instron 8511을 사용한 압축시험의 결과 구형압입시험의 결과와 유사하게 IS방향의 영률이 AP, ML방향보다 통계학적으로 크게 나타남을 알 수 있었고, 모든 경우에 대해서 통계학적으로 유의한 차이가 있음을 알 수 있었다.(Fig. 8,  $p < 0.05$ )

각 시험을 통하여 얻어진 망상골의 탄성계수와 Hounsfield Unit, 그리고 실제 시편의 부피와 무게를 통해 구한 겉보기 밀도와와의 관계를 살펴보았다. 그 결과 Hounsfield Unit가 증가함에 따라 망상골의 탄성계수가 증가하는 형태를 보였으며, 회귀분석을 통하여 보았을 때 선형적인 관계( $R^2=0.33\sim0.36$ )보다는 역제곱수의 관계( $R^2=0.4\sim0.42$ )가 더 높은 관계성을 보였으며, 통계학적으로 유의한 차이를 나타냈다.( $p < 0.05$ ) 또한 실제 시편의 겉보기 밀도와와의 관계에 있어서는 망상골의 탄성계수가 모든 방향에 대하여 비례적으로 증가하는 것을 볼 수 있었으며, Hounsfield Unit와의 관계와 마찬가지로 선형적인 관계( $R^2=0.42\sim0.51$ )보다 역제곱수의 관계( $R^2=0.5\sim0.59$ )가 더 높은 관계성을 보였으며, 역시 통계학적으로 유의한 차이를 나타냈다.(Table 1,  $p < 0.05$ )

고찰

본 연구를 통하여서 망상골의 겉보기 밀도를 측정함에 있어 CT와 실측의 방법을 사용하여 겉보기 밀도를 구하였다. 그 결과 HU를 통한 겉보기 밀도와 실측을 통한 겉보기 밀도사이 선형적인 관계를 나타냄을 알 수 있었다. 이는 Hvid의 변화식을 통하여 구해진 겉보기 밀도와 15%의 차이를 보였다. 그러나 Hvid의 변화식을 통하여 구해진 밀도와 실측해서 얻어진 밀도에 대한 Hounsfield Unit와의 관계를 보았을 때, 기울기의 값에서는 다소 차이가 있으나, 둘 다 모두 선형적인 관계를 나타냈으며 이는 이전의 연구자들의 연구결과와도 일치하는 것이다[6-8,13]. 이처럼 실제 겉보기 밀도와 HU와의 선형적인 관계는 통계적으로 유의한 관계를 이루고 있으며 ( $R^2=0.66$ ), 이러한 결과는 *in vivo*로 국부 골밀도를 측정함에 있어서 상당히 우수한 예측자료로 쓸 수 있음 알 수 있었다. 물론 망상골의 밀도만으로 망상골에 관계되어진 모든 물성변화를 설명할 수는 없다. 그러나 골다공증의 조기진단에 있어서 CT를 사용함에 매우 유용한 것임을 보여주는 것이다.

또한 본 실험을 통하여서 구형압입자를 이용한 압입시험을 통하여 실제 대상이 되는 망상골의 영률을 구하였으며, 그 결과 최소 140.3 MPa에서 최대 2568.7 MPa로 나타났다. 이 결과

Table 1. Relationship between HU(Hounsfield Unit), Apparent density(g/cm<sup>3</sup>), and Orthogonal moduli (GPa) by Spherical Indentation

		n	Linear model E <sub>i</sub> =A(density or HU)+error				Power model E <sub>i</sub> =A(density or HU) <sup>P</sup> +error			
			HU		Apparent Density		HU		Apparent density	
			slope	r <sup>2</sup>	slope	r <sup>2</sup>	Power	r <sup>2</sup>	Power	r <sup>2</sup>
Distal Femur	IS	72	0.0036	0.3539	3.8681	0.5111	0.0029	0.4241	4.2773	0.5855
	AP	72	0.0025	0.2844	2.5322	0.4279	0.0110	0.4000	2.6801	0.4966
	ML	72	0.0027	0.3630	2.7020	0.4226	0.0014	0.4120	3.2857	0.5088
Total		216	0.0030	0.3241	3.0318	0.4165	0.0033	0.3910	3.3479	0.4907

는 이전의 원위 대퇴골을 대상으로한 시험의 결과치인 최소 7.6 MPa에서 최대 2942 MPa의 범위내에 들어갔다. 또한 IS방향의 영률이 AP방향 및 ML방향보다 유의하게 큰 값을 보이고, AP방향의 영률 또한 ML방향의 것보다 크게 나타남을 보여줌으로 망상골의 특징 가운데 하나인 이방성을 알 수 있었으며, 망상골 구조의 좌표(Orientation)가 실제 망상골의 탄성계수에 지대한 영향을 미침을 알 수 있었다[5,8,14,15]. 그러나 Reilly와 Burstein, 그리고 Goldstein et. al 의 연구결과가 망상골 및 피질골에 대해 횡등방성(transversely isotropic)의 성질을 나타내었던 것과는 달리, 본 실험에서는 시편의 3축 방향 영률이 모두 통계학적으로 유의한 차이가 남을 통하여 횡등방성보다는 직교성(orthogonality)을 나타내는 것을 알 수 있었다.

수많은 연구자들이 망상골 구조의 밀도와 기계적 물성과의 관계를 찾고자 하였다. 본 실험에서 망상골 구조의 밀도와 기계적 물성이 탄성계수와의 관계를 선형 및 비선형 회귀분석으로 분석해 본 결과 두 변수와의 관계가 멱관계가 더 합당하다는 결과를 나타냈다. 이전의 망상골을 대상으로 한 많은 연구는 밀도와 탄성계수와의 관계를 선형적인 관계로 표현했다[8,16]. 그러나 근래에 들어서 이루어진 대다수의 연구에서는 선형적인 관계가 아닌 멱관계를 발표함을 볼 때, 본 실험의 결과 역시 같은 결과를 나타냄을 알 수 있었다[3,5]. 이로써 압입시험 및 비파괴적 방법인 CT 모두가 망상골의 겉보기 밀도와 그 물성과의 관계를 예측하는 아주 좋은 방법들이라 사료된다.

## 결 론

골다공증과 같은 골관련 정형외과적 질병에 있어서 골자체의 기계적 물성을 찾는 것은 매우 중요한 사항으로 알려져 있다. 본 연구에서는 압입이론을 바탕으로 한 구형압입시험을 통하여 원위 대퇴골 부위의 망상골이 지니고 있는 기계적 물성인 영률을 IS, AP, 그리고 ML 세방향으로 구하였다. 그 결과 IS방향의 탄성계수가 AP와 ML 방향의 영률에 비해 유의하게 큰 값을 나타냄을 알 수 있었다( $p < 0.01$ ) 또한 AP방향의 탄성계수 역시 ML방향의 수치보다 통계적으로 유의하게 큰 값을 보였다( $p < 0.01$ ) 이를 통하여 원위 대퇴골을 조사한 본 실험에서는 망상골 구조가 직교성의 특징을 나타냄을 알 수 있었다.

마지막으로 CT를 사용한 밀도 및 실측 밀도와 구형압입시험을 통해 구해진 망상골의 탄성계수와의 관계를 보았을 때, 이전 연구자들의 결과와 동일한 멱관계가 나타남을 알 수 있었다. 이처럼 CT를 통한 HU와 실제 시편의 영률을 관계지음으로 실제 골다공증으로 인한 골질의 위험을 예견할 수 있으며, 지속적인 치료를 통한 예후에도 크다면 도움이 되리라 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. Ashman RB: "Elastic modulus of trabecular bone material". J Biomechanics, 21:177-181, 1988
2. Brown TD and Ferguson AB: "Mechanical property

- distributions in the cancellous bone of the human proximal femur". Acta orthop scand, 51:429-437, 1980
3. Carter DR and Hayes WC: "The compressive behavior of bone as a two-phase porous structure". J Bone Joint Surg, 59A:954-962, 1977
4. Gibson LJ: "The mechanical behavior of cancellous bone". J Biomechanics, 18:317-328, 1985
5. Goldstein SA: "The mechanical properties of trabecular bone: dependence on anatomical location and function". J Biomechanics, 20:1055-1061, 1987
6. Latz JF, Gerhart SA, and Hayes WC: "Mechanical properties of trabecular bone from the proximal femur: A quantitative study". J Comput Assist Tomogr, 14:107-114, 1990
7. McBroom RJ, Hayes WC, Edwards WT, Goldberg RP and White AA: "Prediction of vertebral body compressive fracture using quantitative computed tomography". J Bone Joint Surg, 67A:1206-1214, 1985
8. Ciarelli MJ, Goldstein SA, Kuhn JL, Cody DD and Brown MB: "Evaluation of orthogonal mechanical properties and density of human trabecular bone from the major metaphyseal regions with materials testing and computed tomography". J Orthop Res, 9:674-682, 1991
9. Katz JL: "The elastic anisotropy of bone. J Biomechanics, 20:1063-1070, 1987
10. Van Buskirk WC and Ashman RB: "The elastic moduli of bone". Mechanical properties of bone, AMD vol 45:131-144, 1981
11. Francis HA: "Phenomenological analysis of plastic spherical indentation". Transactions of the ASME. J Engng Mater and Tech, July:272-281, 1976
12. Gubicza J, Juhasz A, Arato A, Szommer P, Tasnadi P. and Voros G: "Elastic modulus determination from depth sensing indentation testing". J Mater Sci Letters, 15:2141-2144, 1996
13. Frank Linde and Ivan Hvid: "Stiffness behavior of trabecular bone specimens". J Biomechanics, 29:83- 89, 1987
14. Goulet RW, Goldstein SA, Ciarelli MJ, Kuhn JL, Brown MB and Feldkamp LA: "The relationship between the structure and orthogonal compressive properties of trabecular bone". J Biomechanics, 27: 375-389, 1994
15. Martin RB: "The relative effects of collagen fiber orientation, porosity, density, and mineralization on bone strength". J Biomechanics, 22:419-426, 1989
16. Currey JD: "The effect of porosity and mineral content on the young's modulus of elasticity of compact bone". J Biomechanics, 21:131-139, 1988