

## 소의 장골에서 치밀골의 생체역학적인 특성

김남수 · 황의희 · 최성진 · 정인성\* · 최은경\*\* · 최인혁<sup>1</sup>

전북대학교 수의과대학

\*건국대학교 수의과대학, \*\*충북대학교 수의과대학

## Biomechanical Properties of Cortical Bone in Bovine Long Bones

Nam-soo Kim, Eui-Hee Hwang, Sung-jin Choi, In-sung Jung, Ehn-kyung Choi and In-hyuk Choi<sup>1</sup>

College of Veterinary Medicine, Chonbuk National University

\*College of Veterinary Medicine, Konkuk University

\*\*College of Veterinary Medicine, Chungbuk National University

**Abstract :** We were preferred bovine cortical bone to the others in xenobonegrafts for human and small animals, because those were not limited to supply and have sufficient size for bone transplantation. The strength (ST) and stiffness (SF) of cortical bone in bone grafts were very important. The strength and stiffness of cortical bone were much difference according to position of long bone in bovine limbs because which were biomechanical different to bear body weight. Therefore, we determined by three bending point test methods the strength and stiffness of cortical bone which were collected in diaphysis of humerus, radius, femur and tibia of bovine. In the results, the strengths and stiffness among these were highest in radius by ST: 253.84±40.80 MPa, SF: 7.89±1.91 Gpa and lowest in humerus by ST: 185.69±28.54 MPa, SF: 6.21±1.22 Gpa.

**Key word :** cortical bone, biomechanics, bovine limb

### 서 론

뼈의 생체역학적인 조사는 골다공증이나 골절 등, 뼈의 병적인 상태를 이해하는데 필요한 중요성 때문에 많은 연구가 이루어져 왔다. 특히 골의 밀도는 뼈의 강도(strength)와 stiffness(강성도)에 직접적인 영향을 미치고 있어 밀도가 강도를 예측할 수 있는 지표가 되는 것으로 알려져 골의 밀도를 측정하는 많은 방법들이 연구 개발되고 있다<sup>11,16,21,29,31,33,40,41,43,48,49,50</sup>. 골에 함유된 무기물은 골강도에, collagen은 강성도에 주도적인 역할을 하는 것으로 알려져 있다<sup>6,37</sup>. 건강한 동물에서의 뼈의 강도는 동물의 종이나 나이, 체중 및 활동 정도 등에 따라서 다르며 같은 개체에서도 부위에 따라 상당한 차이를 나타내고 있다. 이러한 차이는 뼈가 체중을 지지하는 역할을 감당하고 있기 때문이며 체중은 동물의 종에 따라 다르고 뼈의 성장기와 퇴행기에 따라, 그리고 활동 방법과 정도에 따라 뼈가 감당하는 부중의 차이 때문인 것으로 알려져 있다<sup>1-5,8,9,11,12,14,15,17,23,27,32,33,35,36,38,51,52,54</sup>.

소뼈에서의 역학적인 강도에 관한 연구는 소의 뼈 질환에 대한 연구보다는 주로 실험적인 목적에서 연구되어 왔다<sup>35,45</sup>. 최근에 증가 추세에 있는 이종골 이식에서 소뼈가 가장 많

이 이용되고 있다<sup>7,22,24,26,46,53</sup>. 특히 장골의 치밀골은 면역성 거부반응이 낮고, 이식물로서의 공급이 충분하며, 신생골을 유도할 수 있는 골형성원성 단백질이 함유되어 있을 뿐 만 아니라<sup>10</sup> 소뼈의 치밀골은 사람 뼈와 유사한 역학적인 특성을 가지고 있어 사람이나 동물에서의 분쇄골절이나 골의 큰 결손부를 위한 충전 물로서 선호되고 있다<sup>44,45,47</sup>. 그러나 지금까지 이종골 이식물로서의 소뼈의 치밀골에 관한 역학적인 특성에 관한 연구가 있으나<sup>30,35,44,45,52</sup> 부위에 따른 치밀골의 강도차이에 대해서는 알려져 있지 않다. 장골의 치밀골에 있어서 사람에서는 경골이<sup>5</sup>, 개에서는 상완골이 높은 강도를 가지고 있는 것으로 알려져 있으나<sup>36</sup> 소에서는 아직 알려져 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 이종골 이식에서 선호되는 소의 장골에서 부위에 따른 치밀골에 대한 강도(bending strength)와 강성도(bending stiffness)를 측정하여 이종 이식물로서의 역학적인 기초 자료를 얻고자 하였다.

### 재료 및 방법

#### 강도 측정용 골편의 제작

도축 후 약 60일간 -30°C로 냉동 보관된 2세령의 수입비육우에서 상완골, 요골, 대퇴골, 경골의 골간부에서 각각 치밀골이 가장 두터운 부분을 채취하여 강도측정에 알맞은 크기로 성형하기 위하여 bone saw로 가로 5 mm, 세로 5 mm, 길이 50 mm 크기로 절단하였다. 본 샘플의 장축은 장골의 종축 방향과 평행하게 성형하였다(Fig 1).

<sup>1</sup>Corresponding author.

E-mail : ihc@chonbuk.ac.kr

이 논문은 2003년도 전북대학교 생체안전성연구소 학술연구비의 일부지원으로 이루어졌음

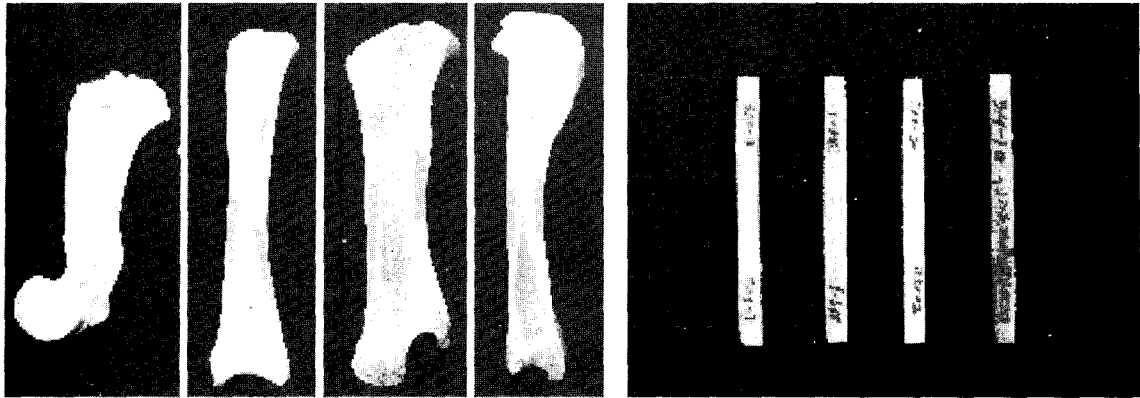


Fig 1. Collective site and fragments of cortical bone in bovine limbs.

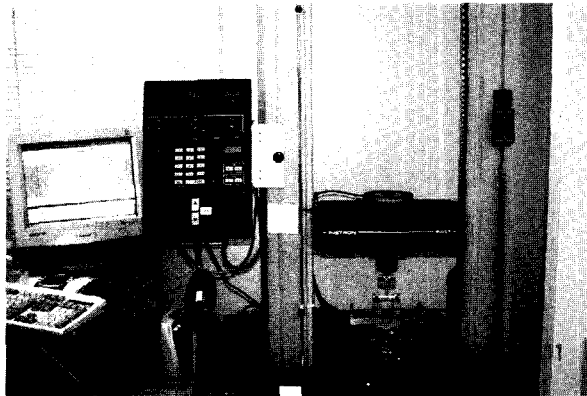


Fig 2. A measuring instrument of bone bending strength (Model no. 4467, INSTRON CO. USA)

**강도와 강성도 측정**

각 치밀골 막대는 실내 습도 50%, 실내 온도 25°C에서 강도측정기(Model no. 4467, INSTRON CO. USA)를 사용하여 3 point bending test를 실시하였으며, 강도(bending strength)와 강성도(stiffness)의 값을 측정 하였다. 측정조건은 crosshead speed 5.0 mm/min, fullscale load range 30.0 kN 이었다. 치밀골의 강도측정 기점은 장골의 방향에 직각인 수평점으로 성형된 샘플의 중간지점에서 측정하였으며 전·후방향과 내외 또는 외내방향을 고려하지 않았다(Fig 2).

**통계 처리**

본 실험에서 골강도 및 강성도의 측정치는 Student's t-test로 처리하였다.

**결 과**

**골강도**

소의 사지골에서 부위별로 측정된 치밀골의 강도는 요골에서 253.8±40.8 MPa로 가장 높게 나타났고 다음은 경골에서 233.6±37.9 MPa, 대퇴골은 220.2±44.1 MPa, 상완골

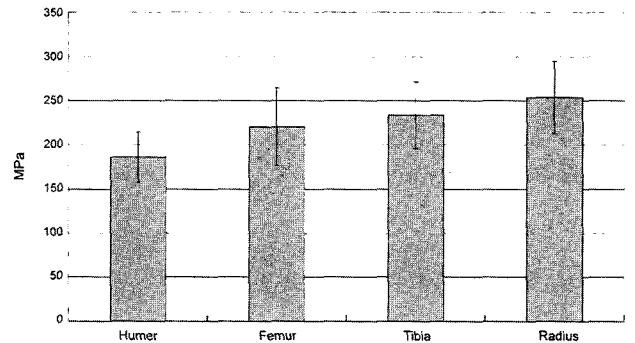


Fig 3. Strength of cortical bone according to position in bovine limbs.

은 185.7±28.5 MPa로 가장 낮게 나타났다(Fig 3). 전체적으로 소뼈의 사지골에서 치밀골의 강도는 185.7 MPa에서 253.8 MPa 사이에 있었으며 평균은 223.3 MPa로 나타났다. 강도가 가장 높은 요골과 두 번째로 높은 경골과의 차이는 20.2 MPa로 유의적인 차이(P<0.05)가 있었다. 경골과 3 번째로 강도가 높은 대퇴골과의 차이는 13.4 MPa로 유의적인 차이는 없었으나(P=0.18) 요골과 대퇴골 사이에는 매우 유의적인 차이(P<0.01)가 있는 것으로 나타났다. 또한 대퇴골과 강도가 가장 낮은 상완골은 34.5 MPa의 차이로 고도의 유의성 있는 차이(P<0.01)를 나타내고 있었다 (Table 1).

Table 1. P values among strength and stiffness of cortical bone according to position

Strength Stiffness	Strength			
	Humerus	Radius	Femur	Tibia
Humerus		0.0000	0.0005	0.0000
Radius	0.3908		0.0014	0.030
Femur	0.0388	0.6849		0.1816
Tibia	0.0199	0.7560	0.8328	

**강성도**

소의 지골에서 부위별로 측정된 치밀골의 강성도는 요골에서 7.9±1.9 GPa로 가장 높게 나타났고 다음은 경골에서 6.9±1.5 GPa, 대퇴골은 6.8±1.4 GPa, 상완골은 6.2±1.2 GPa로 가장 낮게 나타났다(Fig 4). 전체적으로 소뼈의 사지골에서 치밀골의 강성도는 6.2 GPa에서 7.9 GPa 사이에 있었으며 평균은 6.95 GPa로 나타났다. 강도가 가장 높은 요골과 두 번째로 높은 경골과의 차이는 1.0 GPa로 유의적인 차이(P = 0.76)가 없었으며 경골과 3번째로 강도가 높은 대퇴골과의 차이는 0.1 GPa로서 유의적인 차이는 없었다. 또한 대퇴골과 강도가 가장 낮은 상완골은 0.6 GPa의 차이로 유의성 있는 차이(P < 0.05)를 나타냈다. 상완골과 경골 간에도 0.6 GPa로 유의적인 차이(P < 0.05)를 나타냈다(Table 1).

**소의 사지골에서 장골의 종축선에 대한 경사각**

소의 사지골에서 장골의 종축선에 대한 경사각은 소의 자세에 따라 많은 차이가 있어 Greenough PR(1981)가<sup>19</sup> 인용한 관절 각도를 기준으로 환산하였다(Fig 5). 경사각은 90° 이하의 예각으로 나타났다. 전지에서 요골과 척골의 장축 경사도가 90°이고 주관절 각도가 140°이므로 상완골의 종축각도는 140°-90°로 50°가 된다. 후지에서는 발굽의 각도가

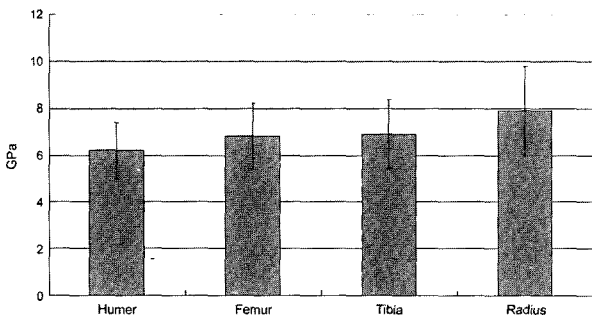


Fig 4. Stiffness of cortical bone according to position in bovine limbs.

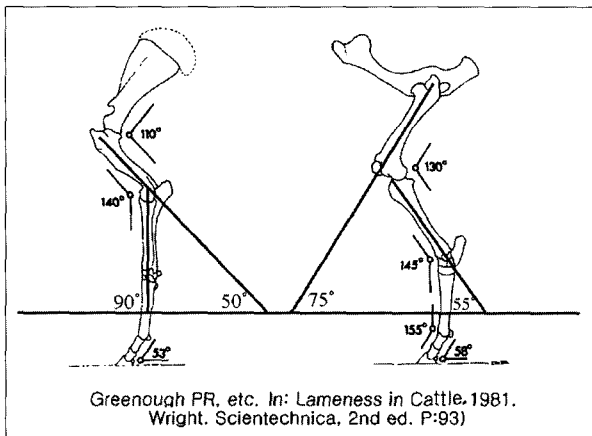


Fig 5. Angle of inclination and joint angulation of bovine limbs.

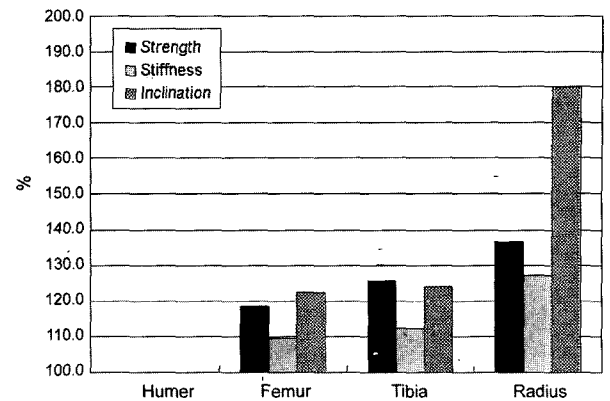


Fig 6. Change rates of values of strength, stiffness and angle of inclination on the basis of humerous

58°, 비절의 각도가 155°이고 하퇴관절의 각도는 145°이므로 경골의 종축각도는 55°가 되며 슬관절의 각도가 130°이므로 대퇴골의 종축 경사각은 75°도가 된다.

**치밀골의 강도와 경사각의 변화율**

치밀골의 강도와 강성도 및 경사각이 가장 낮은 상완골의 측정치를 100으로 하였을 경우에 대퇴골과 경골 및 요골의 차이를 백분율로 환산한 결과는 Fig 6과 같다. 강도가 가장 높은 요골은 상완골보다 36.7%가 높게 나타났으며 대퇴골이 18.6%, 경골이 25.8%가 높게 나타났다. 강성도에서는 요골이 27.4%가 높게 나타났으며 대퇴골이 9.7%, 경골이 12.3%가 높게 나타났다. 경사각은 상완골의 50°에 대하여 요골은 90°로 80% 높게 나타났으며 대퇴골은 22.5%, 경골은 24%가 높게 나타났다.

**고찰**

사람이나 다른 동물에서와 마찬가지로 소뼈의 역학적인 특성은 치밀골의 부위에 따라 많은 차이를 나타내고 있다. 이러한 차이는 사지골의 체중을 부중하는 형태적인 구조는 사지이며 체중의 부중을 감당하고 있는 사지의 뼈와 근육, 관절, 인대, 건, 발바닥 등의 기능적인 역할이 많은 차이가 있기 때문인 것으로 알려져 있다<sup>2,11,12,17,23,33</sup>.

체중을 부중하는 근간인 사지 뼈는 실제의 체중을 부중하는 것보다 훨씬 높은 강도를 가지고 있으며 사람의 경골은 승용차를 바칠 수 있는 강도를 가지고 있는 것으로 알려져 있다<sup>23</sup>. 이것은 생체가 구조적으로 활동 시에는 체중보다 훨씬 높은 하중을 감당할 수 있도록 구성되어 있기 때문이다. 따라서 한 개체에서도 사지의 활동 정도에 따라서 부중력도 다른 것으로 알려져 있다<sup>1,2,19</sup>. 소의 사지는 여러 개의 뼈가 관절로 연결되고 관절은 체중이나 체중보다 훨씬 높은 중력을 부중하고 완충하는데 적합한 각도를 이루고 있으며 관절의 각도에 따라 사지 장골의 방향도 많은 차이를 가지고 있다. 이것은 부중에 따라 생체역학에 적합하도록 관절면이나

골에서 collagen fiber의 구조가 이루어 졌기 때문이며 collagen의 구조 및 방향과 강도 사이에는 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다<sup>2,3,6,17,19,25,39,55</sup>. 즉 관절의 기본각도는 자세에 따라 다소 차이가 있으나 Greenough PR(1981)19 인용한 관절의 관절각을 기준으로<sup>13</sup> 장골의 지면에 대한 예각을 환산하면 상완골이 50°로 가장 낮고, 요척골이 90°로 가장 높으며, 대퇴골은 75°, 경골은 55°로 나타나 본 연구에서 측정된 부위별 치밀골의 강도나 강성도와 밀접한 상관관계가(P<0.01) 있음을 알 수 있었다. 즉 장골의 방향이 수직에 가까울수록 강도와 강성도가 높게 나타나고 있어 장골의 종축방향과 치밀골의 강도가 밀접한 관계가 있음(P<0.05)을 알 수 있었다.

또한 본 연구결과에서 경사각이 90°인 요골이 253.8±40.8 MPa로 가장 높은 강도를 나타냈으며 상완골이나 대퇴골 경골의 강도와 유의성 있는 차이를 나타내고 있었다. 다만 대퇴골과 경골에서만 P=0.18 정도의 차이만 나타내고 있었다. 강성도에서는 강도가 가장 낮은 상완골에서 대퇴골과 경골에서만 유의성 있는 차이를 나타내고 있었다. 강도와 강성도 사이에는 밀접한 상관관계가 있는 것으로 보고 되어 있다<sup>16,29,41</sup>. 본 연구에서는 강도와 강성도 사이에 유의적인 차이가 있었으나 위치별 유의차는 일치하지 않는 점이 있었다.

본 연구결과에서 나타난 강도나 강성도는 각 장골에서 치밀골을 종축방향으로 성형하여 수평축으로 강도를 측정하였으나 많은 연구자들은 같은 치밀골도 측정하는 위치에 따라 다르며 근 위단에서 원위단의 방향으로 측정한다, 즉 종축에 평행하는 수직방향에서 측정된 강도가 종축과 수직인 수평방향으로 측정된 것보다 높은 것으로 알려져 있으며<sup>11,21,23,41,45,50</sup> 같은 수평방향에서도 골의 전방에서 후방으로 측정된 강도가 내측에서 외측의 방향으로 측정된 강도보다 높은 것으로 알려져 있다<sup>11,29</sup>.

본 결과에서 나타난 부위별 치밀골의 강도차이는 위에서 언급한 근 위단에서 원위단 방향으로 측정된 강도가 높다는 것은 중력의 방향이 장골의 종축방향으로 미치고 있기 때문이라고 할 수 있으며 이것은 장골의 장축방향이 지면과 수직에 가까울수록 강도가 높다고 설명 할 수 있다. 또한 치밀골은 종축에 평행한 haversian canal을 중심으로 이루고 있는 층판(lamella)으로 구성되어 있으며 중력이나 부중은 층판과 평행하는 방향으로 작용되고 있다는 연구결과가 뒷받침하고 있다<sup>11,18,33</sup>. 따라서 본 연구결과에서 나타난 요골의 장축방향이 지면과 수직이고 가장 높은 강도를 나타낸 것과 상완골의 장축방향이 지면에 50°로 가장 낮은 각을 나타내고, 강도도 가장 낮은 것은 이러한 이유 때문인 것으로 생각된다. 상완골과 경골의 경사각은 각각 50°와 55°의 근사한 차이를 나타냈음에도 강도에서는 P<0.01의 고도의 유의적인 차이를 나타낸 것은 상완골은 주위에 근육과 건이 많이 분포되어 체중을 지지하는 완충작용을 하고 있으나 경골은 비교적 근육의 분포가 적어 완충작용이 적고 경골은 지면에 가까이 더 많은 체중을 부중한 것으로 생각된다<sup>25</sup>. 이것은 근

육이 골의 강도에 밀접한 영향을 미치고 있다는 보고들이 뒷받침하고 있다<sup>2,35</sup>. 이러한 논리는 대퇴골과 경골의 강도차이가 P<0.01로 고도의 유의적인 차이를 나타낸 것과 같을 것이다. 또한 요골과 경골에서 상완골과 대퇴골보다 치밀골의 강도가 높은 것도 이러한 이유 때문인 것으로 생각된다. 한편 대퇴골과 경골의 강도가 20°의 차이를 나타냈고 대퇴골과 경골은 근육의 완충작용에 차이가 있음에도 유의성 있는 차이가 없는 것은 슬관절과 비절의 관절각도(130°, 145°)가 전지의 주관절이나 완관절의 각도(140°, 90°)보다 크기 때문에 관절이 부중하는 부담이 큰 관계로 차이를 나타내지 않은 것으로 생각된다. 즉 전지의 요-척골의 경사각이 90°이고 완관절 각도는 180°이나 이 각도는 지면에 경사각이 90°의 각도로 체중중력의 전부가 뼈의 종축방향으로 부중되고 있으며 관절로서의 완충기능이 매우 적다는 것을 의미하기 때문일 것이다. 이러한 근거는 관절각이 미치는 하중의 차이에 관한 연구결과들이 뒷받침하고 있다<sup>2,42</sup>.

그러나 Markel(1994) 등이<sup>36</sup> 조사한 개(Greyhounds)의 사지골에서 부위별 강도를 측정된 결과에 의하면 장골전체의 측정에서 상완골이 압축강성도나 굴곡강성도에서 가장 높게 나타났으며 요골이 가장 낮게 나타났다. 또한 골간중앙부에서 측정된 결과에서는 압축강성도는 경골이, 굴곡강성도는 대퇴골과 상완골이 높게 나타났으며 좌지와 우지에도 다소의 차이가 있는 것으로 보고하고 있다. 이러한 결과는 본 연구에서의 장골의 장축각도와 강도의 유의적인 관계를 적용하기 어렵다. 그러나 이러한 차이는 뼈의 강도차이가 종의 특성보다는 활동방법과 밀접한 관계에 있다는 주장을<sup>1,14</sup> 인용한다면 소는 활동량이 적고 주로 서 있는 습성이 있으며 개는 활동력이 강하고 서 있는 시간이 적으며 또한 많은 하중의 차이와 해부학적인 하중의 완충기능에 대한 차이 때문인 것으로 생각된다. 또한 개에서는 치밀골이 측정되지 않고 전체 장골이 측정된 차이가 있으며 개에서 요골의 강도가 가장 낮게 나타나 있는 것은 전체 장골에서 척골이 측정되지 않은 차이가 있는 것으로 생각된다.

따라서 소에서는 사지의 관절각이 클수록 또는 장골의 지면에 대한 경사각이 클수록(최대 90도) 장골의 장축방향으로 받는 부중이 크며 이것은 생체역학적인 면에서 부중이 큰 만큼 골의 밀도가 높고 그 만큼 골의 강도와 강성도가 높다는 결론을 얻을 수 있다. 이러한 사지 장골의 경사각의 차이는 장골의 강도나 강성도의 차이와 밀접한 상관관계가(P<0.01) 있음을 본 실험으로 증명할 수 있었으며 경사각이 가장 높은 요골의(90°) 강도와 강성도는 253.8±40.8 MPa, 7.9±1.9 GPa로 높게 나타났으며 경사각이 가장 낮은 상완골은(50°) 185.7±28.5 MPa와 6.2±1.2 GPa로 나타나 상완골을 기준으로 하였을 경우 강도는 37%, 강성도는 27%, 경사각은 80%의 범위에서 차이를 두고 있었다.

## 결론

소의 사지 장골에서 강도와 강성도가 우수한 치밀골은 요

골로서 강도가  $253.8 \pm 40.8$  MPa, 강성도가  $7.9 \pm 1.9$  GPa로 나타났으며 다음이 경골로  $233.6 \pm 37.9$  MPa와  $6.9 \pm 1.5$  GPa를 나타냈고 대퇴골은  $220.2 \pm 44.1$  MPa와  $6.8 \pm 1.4$  GPa를 나타냈으며, 상완골은  $185.7 \pm 28.5$  MPa와  $6.2 \pm 1.2$  GPa로 가장 낮게 나타났다.

소뼈의 지골에서 장골의 종축 경사각은 상완골이  $50^\circ$ , 요골이  $90^\circ$ , 대퇴골이  $68^\circ$ , 경골이  $62^\circ$ 이었으며 치밀골의 강도와 강성도는 경사각이 클수록 높게 났으며 각 장골의 강도와 강성도 및 경사각의 차이는 유의성 있는 상관관계가 있었다.

## 참 고 문 헌

- Augers RA, Miller MR, Siamese SJ, Norrdin RW. Correlation of flexural structural properties with bone physical properties: a four species survey. *Biomed Sci Instrum.* 1996; 32: 251-60.
- Badoux DM. General biostatics and biomechanics, In: Sisson and Grossman's The anatomy of the domestic animals, Getty R. 4th ed. W.B. Saunders Co. 1975; 48-83.
- Brinker WO, Olmstead ML, Geoffrey SS, Prieur WD. Manual of internal fixation in small animals, 2nd ed. Springer. 1998; 4-5.
- Brodt MD, Ellis CB, Silva MJ. Growing C57Bl/6 mice increase whole bone mechanical properties by increasing geometric and material properties. *J Bone Miner Res.* 1999 Dec; 14(12): 2159-66.
- Burstein AH, Reilly DT, Martens M. Aging of bone tissue: Mechanical properties. *J Bone Joint Surg* 1976; 58A: 82-86.
- Burstein AH, Zika JM, Heiple KG, Klein L. Contribution of collagen and mineral to the elastic-plastic properties of bone. *J Bone Joint Surg Am.* 1975 Oct; 57(7): 956-61.
- Callan DP, Rohrer MD Use of bovine-derived hydroxyapatite in the treatment of edentulous ridge defects: a human clinical and histologic case report. *J Periodontol* 1993; 64: 575-582.
- Cowin SC. Wolff's law of trabecular architecture at remodeling equilibrium. *J Biomech Eng.* 1986 Feb; 108(1): 83-8.
- Currey JD. Physical characteristics affecting the tensile failure properties of compact bone. *J Biomech.* 1990; 23(8): 837-44.
- Cutting CB, McCarthy JG, Knize DM. Repair and grafting of bone. In: Plastic surgery I, General principle. WB Saunders co. 1990: 594-597.
- Drozdowska B, Pluskiewicz W, Przedlacki J. Prediction of the biomechanical properties of cancellous bone using ultrasound velocity and bone mineral density - an vitro study. *Med Sci Monit.* 2002; 8(1): MT 15-20.
- Duncan RL and Turner CH. Mechanotransduction and the functional response of bone to mechanical strain. *Calcif tissue Int* 1995; 57: 344-358.
- Ferretti JL, Capozza RF, Mondelo N, Zanchetta JR. Interrelationships between densitometric, geometric, and mechanical properties of rat femora: inferences concerning mechanical regulation of bone modeling. *J Bone Miner Res.* 1993 Nov; 8(11): 1389-96.
- Ferretti JL, Spiaggi EP, Capozza R, Cointry G, Zanchetta JR. Interrelationships between geometric and mechanical properties of long bones from three rodent species with very different biomass: phylogenetic implications. *J Bone Miner Res.* 1992 Dec; 7 Suppl 2: S433-5.
- Fyhrie DP and Schaffler. The adaptation of bone apparent density to applied load. *J Biomech* 1995; 28: 135-146
- Fyhrie DP and Vashishth. Bone stiffness predicts strength similarly for human vertebral cancellous bone in compression and for cortical bone in tension, *Bone*, 2000; 26(2): 169-173.
- Glaser C, and Putz R. Functional anatomy of articular cartilage under compressive loading quantitative aspects of global, local and zonal reaction of the collagenase network with respect to the surface integrity. *Osteoarthritis and Cartilage* 2002; 10: 83-89.
- Goulet RW, Goldstein SA, Ciarelli MJ, Kuhn JL, Brown MB, Feldkamp LA. The relationship between the structural and orthogonal compressive properties of trabecular bone. *J Biomech.* 1994 Apr; 27(4): 375-89.
- Greenough PR, MacCallum FJ, Weaver AD. Lameness in cattle. 2nd ed. Wright-Scientific 1981; 37-97.
- Hamer AJ, Strachan JR, Black MM, Ibbotson C, Elson RA, A new method of comparative bone strength measurement. *J Med Eng Technol.* 1995 Jan-Feb; 19(1): 1-5.
- Hans D, Wu C, Njeh CF, Zhao S, Augat P, Newitt D, Link T, Lu Y, Majumdar S, Genant HK. Ultrasound velocity of trabecular cubes reflects mainly bone density and elasticity. *Calcif Tissue Int.* 1999 Jan; 64(1): 18-23.
- Hashizume H, Tamaki T, Oura H, Minamide A Changes in the extracellular matrix on the surface of sintered bovine bone implanted in the femur of a rabbit: An immunohistochemical study. *J Orthop Sci* 1998; 3: 42-53.
- Hodgkinson R. The ability of ultrasound velocity to predict the stiffness of cancellous bone in vitro. *Bone*, 1997; 21: 183-190.
- Hollinger JO, Schmitz JP, Mark DE, Seyfer AE Osseous wound healing with xenogeneic bone implants with a biodegradable carrier. *Surgery* 1990; 107: 50-54.
- Hottinger HA, DeCamp CE, Olivier NB, Hauptman JG, Soutas-Little RW. Noninvasive kinematic analysis of the walk in healthy large-breed dogs. *Am J Vet Res.* 1996 Mar; 57(3): 381-8.26. Hubble MJW. Bone transplantation. *Current Orthopedics* 2001; 15(3): 199-205.
- Hulse D and Hyman Bill. Fracture biology and biomechanics, In: Textbook of small animal surgery, 2nd ed. Saunders 2003; 1785-1792
- Jang IY. A study on freeze-dried bone. *J of Korean Orthop Assoc.* 1988; 23(3): 929-935.
- Jurist JM and Foltz AS. Human ulnar bending stiffness, mineral content, geometry and strength. *J Biomechanics.* 1977; 10: 455-459.
- Keaveny TM, Wachtel EF, Ford CM and Hayes WC. Differences between the tensile and compressive strength of bovine tibial trabecular bone depend on modulus. *J Biomech* 1944; 27: 1137-1146.
- Keller TS, Mao Z and Spengler DM. Young's modulus, bending strength and tissue physical properties of human compact bone. *J Orthop Res* 1990; 8: 592-603.
- Keller TS, Spengler DM, Carter DR. Geometric, elastic, and structural properties of maturing rat femora. *J Orthop Res.* 1986; 4(1): 57-67.
- Kopperdahl DL and Keaveny TM. Yield strain behavior of trabecular bone. *J biomech.* 1998; 31: 601-608.
- Kotha SP, Walsh WR, Pan Y, Guzelsu N. Varying the

- mechanical properties of bone tissue by changing the amount of its structurally effective bone mineral content. *Biomed Mater Eng.* 1998; 8(5-6): 321-34.
35. Lipson SF, Katz JL. The relationship between elastic properties and microstructure of bovine cortical bone. *J Biomech.* 1984; 17(4): 231-40.
  36. Markel MD, Sielman E, Rapoff AJ, Kohles SS. Mechanical properties of long bones in dogs. *Am J Vet Res.* 1994 Aug; 55(8): 1178-83.
  37. Martin RB. Determinants of the mechanical properties of bones. *J Biomech.* 1991; 24 Suppl 1: 79-88.
  38. Martin RB, Ishida J. The relative effects of collagen fiber orientation, porosity, density, and mineralization on bone strength. *J Biomech.* 1989; 22(5): 419-26.
  39. Martin RB and Atkinson. Age and sex related changes in the structure and strength of the human femoral shaft. *J biomech* 1977; 10: 223-231.
  40. Millis DL and Martinez SA. Bone grafts, In: *Textbook of small animal surgery*, 2nd ed. Saunders 2003; 1875-1891.
  41. Njeh CF, Kuo CW, Langton CM etc. Prediction of human femoral bone strength using ultrasound velocity and BDM. *Osteopor Int* 1997; 7:471-477.
  42. Nielsen C, Stover SM, Schulz KS, Hubbard M, Hawkins DA. Two-dimensional link-segment model of the forelimb of dogs at a walk. *Am J Vet Res.* 2003 May; 64(5): 609-17.
  43. Pithioux M, Lasaygues P, Chabrand P. An alternative ultrasonic method for measuring the elastic properties of cortical bone. *J Biomech.* 2002 Jul; 35(7): 961-8.
  44. Poumarat G, Squire P.: Comparison of mechanical properties of human, bovine bone and a new processed bone xenograft. *Biomaterials.* 1993 Apr; 14(5): 337-40.
  45. Reilly DT and Burstein AH, The elastic and ultimate properties of compact bone tissue. *J Biomech* 1975; 8: 393-405.
  46. Ripamonti U, Magan A, Ma S, Van den Heever B, Moehl T, Reddi H Xenogeneic osteogenin, a bone morphogenetic protein, and demineralized bone matrices, including human, induce bone differentiation in athymic rats and baboons. *Matrix Biol* 1991; 11: 404-411.
  47. Salama R. Xenogeneic bone grafting in humans. *Clin Orthop Rel Res.* 1983 Apr; 174: 113-121.
  48. Turner CH, and Burr DB. Basic biomechanical measurements of bone: A tutorial. *Bone*, 1993; 14: 595-608.
  49. Toyras J, Nieminen MT, Kroger H and Jurvelin JS. Bone mineral density, ultrasound velocity, and broadband attenuation predict mechanical properties of trabecular bone differently. *Bone*, 2002; 31(4) Oct.: 503-507.
  50. Tuominen T, Jamsa T, Tuukkanen J, Marttinen A, Lindholm TS, Jalovaara P. Bovine bone implant with bovine bone morphogenetic protein in healing a canine ulnar defect. *Int Orthop.* 2001; 25(1): 5-8.
  51. Wall Jc, Chatterji SK, Jeffery JW. Age-related changes in the density and tensile strength of human femoral cortical bone. *Calcif Tissue Int*, 1979 Apr; 27(2): 105-108.
  52. Williams JL, Eick JD, Schmidt TL. Tensile properties of the physis vary with anatomic location, thickness, strain rate and age. *J Orthop Res* 2001 Nov; 19(6): 1043-1048, Erratum: *J Orthop Res* 2002 Jul; 20(4): 894.
  53. Young C, Sandstedt P, Skoglund A. A comparative study of anorganic xenogenic bone and autogenous bone implants for bone regeneration in rabbits. *Int J Oral Maxillofac Implants* 1999; 14: 72-76.
  54. Zioupos P and Currey JD. Changes in the stiffness, strength, and toughness of human cortical bone with age. *Bone*, 1998 Jan; 22(1): 57-66.
  55. Zioupos P, Currey JD and Hamer AJ. The role of collagenin the declining mechanical properties of aging human cortical bone. *J Biomaterials material research*, 1999 May; 45(2): 108-116.