

신연 골형성에서 재생골의 역학적 및 물리적 성질에 관한 연구

연세대학교 의과대학 정형외과학교실

한수봉 · 최종혁 · 박병문

— Abstract —

Mechanical and Physical Properties of Regenerate Bone of Distraction Osteogenesis

Soo Bong Hahn, M.D., Chong Hyuk Choi, M.D.
and Byeong Mun Park, M.D.

Department of Orthopaedic Surgery, Yonsei University College of Medicine

Distraction osteogenesis techniques have provided more than a clinical treatment of limb length discrepancies and bone deformities. The nature of this mechanical environment and the characteristics of the regenerate bone are not typical of that found elsewhere in the skeleton. The purposes of this study were to investigate the physical and mechanical properties of regenerate bone in different consolidation period (sacrificing at the period of 8, 12, 18, 20, 22, 24, 26 weeks post surgery) and to find out the relationship between both properties.

Two ring Ilizarov fixators were applied to the right tibia in 7 large, skeletally mature dogs. A subperiosteal osteotomy of tibia was performed. Postoperatively, after 7 days of latency period, distraction was begun. Distraction of 1mm daily, 3 times per day was continued until radiographic evidence of a 2.5 cm distraction. Sacrifice was at 8, 12, 18, 20, 22, 24, 26 weeks post surgery. All of the specimens were obtained from regenerate bone and were cutted in the rectangular shape of approximately 8x4x4 mm. Specimens were tested in axial compression and displayed an average modulus of elasticity of 215(sd=184)MPa, an average yield stress of 3.58(sd=2.54)MPa, an average apparent bone density of 0.399(sd=0.107)g/cc, and an average ash weight density of 0.164(sd=0.084)g/cc. A linear regression of ash weight density on apparent density was significant($p<0.009$) with R-square=0.52, and a slope of 0.569. A linear regression of yield stress on modulus of elasticity was significant($p<0.001$) with R-square=0.28, and a slope of 0.007. The radiographic bone densitometry was performed before sacrifice. The results of densitometry of regenerate bone was osteoporotic

* 통신저자 : 한 수 봉

서울시 서대문구 신촌동 134

연세대학교 의과대학 정형외과학교실 (전화 02-361-5647, 5640)

* 본 논문은 1993년도 연세의대 교수연구비의 지원으로 이루어졌습니다.

comparing with those of the opposite tibia which did not be operated in all of the animals. The linear regressions of mechanical properties on physical properties were significant, only 12.34% of the variance in mechanical properties could be explained by the physical properties. In conclusion, based on the observation of the low ash fraction, it would be expected that the relationship between physical properties and mechanical properties may not be strong. This study suggested that the regenerate bone was a composite of bone and non-mineralized tissue until 26 weeks of post surgery. For the more accurate information of material property, testing of real regenerate bone without non-mineralized bone may be necessary.

Key Words: Distraction osteogenesis, Mechanical and physical properties, Linear regression

서 론

선천성 기형이나, 외상 혹은 감염에 의해 성장기에 골성장판 손상으로 인한 후유증이 오면, 사지에 각변형이 동반되기도 하며, 대부분 골단축을 초래하여 사지의 단축 변형을 일으키게 된다. 이러한 사지 단축 변형시 치료로는 사지 골연장술에 의하여 정상 축과 동일한 사지 길이로 복원시키는 것이 외관상으로나 기능상으로 이상적인 치료법이라 하겠다.

사지 장관골의 연장술은 1905년 Codivilla[®]가 대퇴골에 사선 절골술 및 종골 골견인으로 처음 시도한 이후 다양한 수술법과 연장 장치가 고안되어 발전되었으며, 또한 각각의 방법마다 많은 문제점들이 제시되고 있다^{1,2}. 그러나 연장 기구의 발달과 수술 수기의 수정으로 이러한 문제점들이 점차 해결되어 현재 사지 연장술은 정형외과 영역의 변형 교정, 단축 하지 연장 및 사지 재건분야에서 유용하게 사용될 수 있는 방법으로 정착되어 가고 있다.

신연 골형성은 서서히 점진적이고 주기적으로 장력을 가하여 절골술 자리에 골조직이 형성되는 것을 의미하며, 장력하에서는 골과 연부 조직을 포함한 모든 조직은 재생될 수 있다는 Tension Neohistogenesis의 원리가 Ilizarov[®]에 의해 처음으로 적용되어 신연 골형성에 의해 형성된 재생골이 경화(consolidation)가 일어날 수 있음이 증명되었다. 점진적인 장력을 가하면 조직이 자극을 받아 재생이 되며 활발히 성장될 수 있다고 한다. 조직이 서서히 지속적인 장력을 받으면 신진대사가 활발해지며, 세포의 증식이 일어나고 세포의 생합성 기능이 자극을 받게 되는데, 이러한 재생과정은 혈류가 충분해야 하며 체중 부하의 자극이 있어야 잘 일어난다. 이

러한 기술은 최근 임상에서 많이 발전되어 왔으나 이러한 과정에 대한 과학적인 기초 자료가 제대로 연구되어 있지 않은 실정이다. 골절 가골의 역학적 성질에 대한 연구는 어느 정도 발표되었으나¹⁰ 연장골에 대한 역학적 검사결과는 드물다¹³.

따라서 본 연구의 목적은 장력을 가하여 절골술 부위에 신연 골형성된 재생골의 탄성계수(modulus of elasticity)와 항복응력(yield stress)을 측정된 역학적 성질과, apparent density와 ash weight density를 측정된 물리적 성질과의 상관관계를 비교 연구하여 신연 골연장술의 과학적인 기초적 기전을 규명하는데 있으며, 이러한 실험적 연구를 통해 골연장술의 합병증을 줄이고 단축사지 연장 및 사지 재건 치료에 기여할 수 있으리라고 사료된다.

재료 및 방법

방사선 소견상 골성장판이 폐쇄된 성숙된, 체중 15-20kg의 황견(Mongrel dog) 7마리를 이용하여 실험하였으며, Pyrimidinetriol(Entobar)(한림제약, 서울특별시, 대한민국)을 2mg/kg로 정맥 주사하여, 기관 마취한 후 우측 경골에 털을 제거하여 동물을 양아위로 고정시킨 후 2개의 원형 외고정 기구(Ilizarov external fixator)(Medicalplastic s.r.l, Milan, Italy)를 우측 경골에 착용시킨 후 외고정 장치 사이의 근위 경골 간부 전외방에 약 3cm길이의 피부 종결개를 가한 후, 골막까지 절개를 가하여 경골을 골막에서 완전히 분리하였다. Gigli saw를 이용하여 슬관절 하부 5cm부위의 경골에 골막 절골술을 가한 후, 골막을 봉합한 후 피부를 봉합하였다. 비골 외측부에 약 2cm길이의 종결개를 가한 후 비골 근위간부를 노출시켜 같은 방법으로

절골술을 가하고 골막과 피부를 봉합하였다.

술후 모든 동물은 독립된 cage에서 사료로 사육하였으며, 압수의 구별은 하지 않았다. 7일간의 휴지기가 지난후 하루 1mm씩 8시간마다 3번에 나누어 골절부를 신연하였으며, 방사선 소견상 2.5cm의 신연이 증명될 때까지 계속 연장하였다.

신연골의 방사선학적 골밀도를 알아보기 위하여 술후 8, 12, 16, 22, 24주 짜 동물을 희생시키기 전, 양측 경골의 골밀도를 측정하였으며, 우측은 재생골 부위 및 재생골 근위부 및 원위부의 3곳에서 측정하였으며, 좌측의 경우 우측의 신연골 생성위치와 동일한 부위에서 골밀도를 측정하였다.

술후 8, 12, 16, 20, 22, 24, 26주에 각각 동물을 희생시킨 후 재생된 골조직을 경골로 부터 절제하여 저속의 Gigli saw를 이용하여 약 8mm두께의 2개의 횡절편을 만든 후 이 횡절편으로 부터 약 8x4x4mm(장축:횡축=2:1)의 입방형 조직을 절제해 내었다. 이때 조직의 크기는 0.05mm오차의 정밀자(digital micrometer)로 각 조직의 치수를 측정하였다.

조직 절편은 장력실험기(Instron, Instron LTD Wycombe, Buckinghamshire, UK)에 특수하게 고안된 기기를 장착하여 1%/sec의 변형율로 압축응력을 가하여 파괴시켰다. 이때 나타나는 응력과 변형율을 응력-변형율 곡선으로 인쇄하여 각 조직 절편의 탄성계수(Modulus of elasticity)와 항복응력(Yield stress)을 계산하였다. 탄성계수는 항복응력의 20-80%내에 포함된 수치에서 선형 회귀 방정식(Linear regression)으로 구하였으며, 또한 항복응력은 0.2% strain에서의 stress로서 계산하였다.

압축응력 검사전 모든 절편은 섭씨 영하 18도에서

얼렸다가 검사 당일 실온에서 해빙시켜 검사하였으며, 역학적 검사 후 각 검사물마다 apparent density와 ash weight density를 측정하였다. Ash weight density측정은 연세대학교 공해연구소의 시설을 이용하여, 섭씨 110도의 dry oven에서 24시간 건조시킨후, 회화로에서 섭씨 600도로 24시간 가열시켜 ash로 만들었으며, 무게측정은 Mettler Pc2000 전자저울(Mettler instrument AG CH-8606, Zurich, Switzerland)을 이용하였다.

모든 실험 결과치는 SAS 통계처리 프로그램을 이용하여 personal computer로 처리하였으며, Student t-test 와 Linear regression test로 검사하여 유의수준이 0.05 이하인 경우 통계적 의의가 있는것으로 판정하였다.

결 과

절골술후 매일 1mm씩 신연을 시행하였으며, 7마리중 3마리에서 조기유합이 신연도중에 발견되어, 가골의 절골술후 4일간의 휴지기후에 다시 신연을 계속하였고, 가골의 조기 골유합이 발생된 경우는 모두 20주이후에 희생시켰다. 2.5cm길이의 신연이 형성되기까지는 평균 35일(27일-43일)이 소요되었다. 2마리에서 절골부의 각형성이 발견되어 각교정을 하였으며, 5례에서 핀 삽입부에 감염이 발생되었으나, 3례는 표재감염으로 감염부의 소독 및 항생제 투여로 치료되었으며, 2례에서는 핀 제거 후 다른 방향으로 핀을 삽입하여 치료하였다. 모든 동물에서 방사선 검사상 2.5cm의 신연이 이루어진 후 희생까지 2.5cm길이의 신연을 유지하였다.

1. 골의 물리적 성질(physical properties of

Table 1. Apparent density(B) and ash weight density(A) according to consolidation period after distraction.

	Bone density(g/cc) (B)	Ash weight density(g/cc) (A)	A/B ratio
8 주	0.402 ± 0.097	0.14 ± 0.093	0.348
12 주	0.349 ± 0.054	0.111 ± 0.018	0.318
16 주	0.399 ± 0.101	0.15 ± 0.082	0.377
20 주	0.381 ± 0.097	0.162 ± 0.063	0.425
22 주	0.378 ± 0.126	0.176 ± 0.091	0.465
24 주	0.488 ± 0.110	0.231 ± 0.067	0.473
26 주	0.464 ± 0.041	0.238 ± 0.062	0.513

Ash weight density By Apparent density

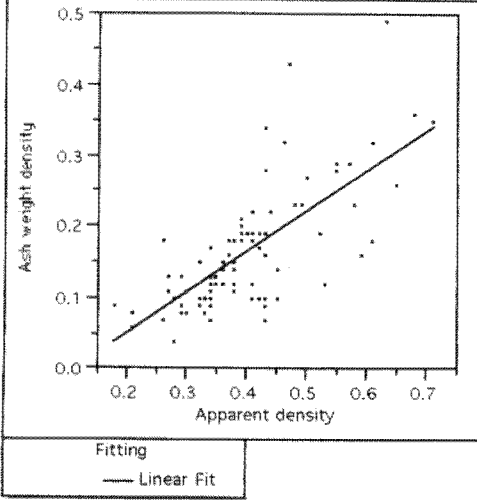


Fig. 1. The relationship between apparent density and ash weight density
(linear equation : $Y = -0.06 + 0.56 X$, R square = 0.52)

regenerate bone) : 신연후 시간 경과에 따른 골의 물리적 성질의 파악을 위하여 골의 apparent density와 ash weight density를 측정하였으며, 술후 8주째부터 4주간격으로 한마리씩 희생시켰으며, 술후 20주 부터는 2주간격으로 희생시켜, 각각의 골편을 채취한 후 측정하였으며, 술후 시간에 따른 모든 표본의 평균치와 오차를 측정하였다. apparent density와 ash weight density는 개체에 따라서 측정치의 차이가 있었으나, apparent density에 대한 ash weight density의 비율 측정이 시간의 경과에 대한 골의 물리적 특성을 측정하는데 정확하며, 그 비율은 신연 8주후 0.348에서 신연 26주째는 0.513으로 시간이 경과 될수록 증가되는 소견이 관찰되었다(Table 1). 신연후 시간 경과에 관계없이 모든 표본의 apparent bone density에 대한 ash weight density의 선형회기 방정식을 측정하였으며, 이것은 통계적인 의의를 갖는 것으로 측정되었으며 ($P < 0.009$), R square는 0.52였고, 기울기는 0.569였다(Fig. 1).

2. 골의 역학적 성질(mechanical properties of regenerate bone) : 신연후 시간 경과에 따른 yield stress는 술후 8주후 1.66 ± 1.33 MPa에서 26

Table 2. Yield stress and modulus of elasticity according to consolidation period after distraction.

	Yield stress(MPa)	Modulus of elasticity(MPa)
8 주	1.66 ± 1.33	58 ± 29
12 주	2.21 ± 1.21	108 ± 31
16 주	5.15 ± 2.70	115 ± 68
20 주	2.24 ± 0.87	202 ± 28
22 주	3.4 ± 1.85	401 ± 167
24 주	5.84 ± 2.60	276 ± 142
26 주	5.67 ± 3.08	534 ± 267

Yield stress By Modulus of elasticity

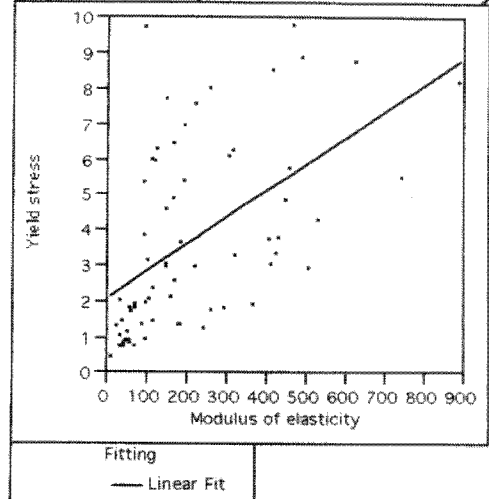


Fig. 2. The relationship between yield stress and modulus of elasticity
(linear equation : $Y = 2.08 + 0.007 X$, R square = 0.28)

주후 5.67 ± 3.08 MPa로 증가되었다. 16주후의 표본에서는 5.15 ± 2.70 MPa, 24주후는 5.84 ± 2.60 MPa의 결과치를 보여 개체에 따라 차이를 보였으나, 전반적으로 신연후 재생골의 경화의 기간이 경과 될수록, 항복응력의 크기는 증가되는 양상을 보였다. 탄성계수도 신연 8주후 58 ± 29 MPa에서 26주 후에는 534 ± 267 MPa로 증가되었으며, 신연 22주후 401 ± 167 MPa로 측정된 것을 제외하고는 신연후의 기간이 증가될수록 그 값이 증가되는 소견을 보였다(Table 2). 항복응력과 탄성계수의 상관관계를 알아보기 위하여 통계학적인 선형 회귀방정식을

Table 3. Average mechanical and physical properties of regenerated bone

Ave. of bone density(g/cc)	0.399 ± 0.107
Ave. of ash weight density(g/cc)	0.164 ± 0.084
Ave. of yield stress(MPa)	3.58 ± 2.54
Ave. of modulus of elasticity(MPa)	215 ± 184

Table 4. Results of bone densitometry(g/cm²)

	normal tibia (N)	regenerate bone (R)	distal to distraction (D)	proximal to distraction (P)	R/N	D/N	P/N
8주	0.879	0.351	0.263	0.477	0.399	0.268	0.542
12주	0.933	0.310	0.234	0.433	0.332	0.250	0.464
16주	0.742	0.269	0.175	0.602	0.36	0.235	0.811
22주	0.638	0.267	0.157	0.285	0.418	0.246	0.446
24주	0.662	0.269	0.176	0.857	0.406	0.296	1.29

R: Bone density of regenerate tibial bone.

N: Bone density of normal tibia at the same location with regenerate opposite tibia.

D: Bone density of distal tibia to regenerate bone.

P: Bone density of proximal tibia to regenerate bone.

Table 5. Linear regression of mechanical properties and physical properties:
($y=ax + b$)

y	x	a	b	p	r-square
modulus	app dens	647	-27	<0.008	0.12
modulus	ash dens	983	60	<0.002	0.22
yield	app dens	13	-2.2	<0.001	0.34
yield	ash dens	14	0.6	<0.001	0.32

구하였으며, 탄성계수에 대한 항복응력의 상관관계에서 기울기는 0.007, 절편은 2.08였으며, R-square는 0.28였다(Fig. 2).

3. 방사선학적 골밀도 검사(Bone densitometry of bone) : 7마리의 동물중에서 신연후 8, 12, 16, 22, 24주후에 희생시킨 5마리의 개에서 희생전에 골밀도 검사를 시행하였으며, 신연을 가한 우측의 재생골 형성부위, 재생골 근위 3cm, 원위 3cm부위에서 골밀도를 측정하였고, 재생골과 같은 부위의 좌측 경골에서도 골밀도를 측정하여 대조군으로 사용하였다.

대조군에 대한 재생골의 골밀도비는 신연 8주후에 0.399, 12주후 0.332, 16주후 0.36으로 신연후 8주에서 16주 사이에는 특이한 차이가 관찰되지 않았

으나, 신연 22주에 0.418, 24주에 0.406으로 측정되어 신연 22주를 중심으로 골밀도가 증가된 소견이 관찰되었다. 신연 재생골 근위부 및 원위부에서의 골밀도 측정상 신연 기간에 관계없이 신연 원위부에서 골밀도가 근위부에 비해 감소된 소견이 관찰되었으며, 재생골의 골밀도도 재생골 원위부의 골밀도보다 증가된 소견이 관찰되었다. 또한 대조군에 대한 신연골 원위부의 골밀도비는 모든 개체에서 기간에 관계없이 0.235에서 0.296의 수치로 낮은 소견을 보여 신연후 8주 부터 재생골 원위부의 현저한 골밀도의 감소가 관찰됨을 알 수 있었다(Table 3).

4. 재생골의 물리학적 및 역학적 성질의 비교 (relationship of physical and mechanical properties) : 신연후 기간에 관계없이 측정된 모든

Yield stress By Apparent density

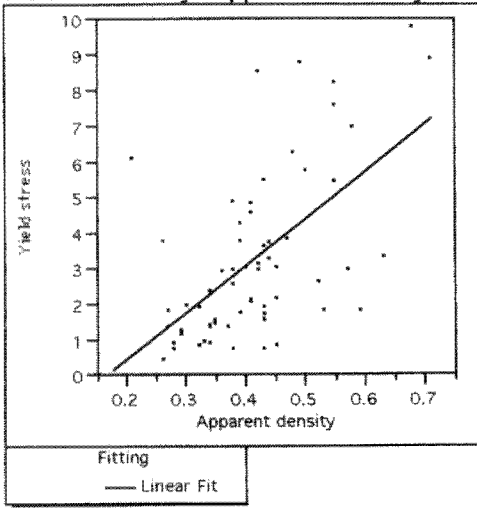


Fig. 3. The relationship between yield stress and apparent density
(linear equation : $Y = -2.2 + 13.1 X$, R square = 0.34)

Modulus of elasticity By Apparent density

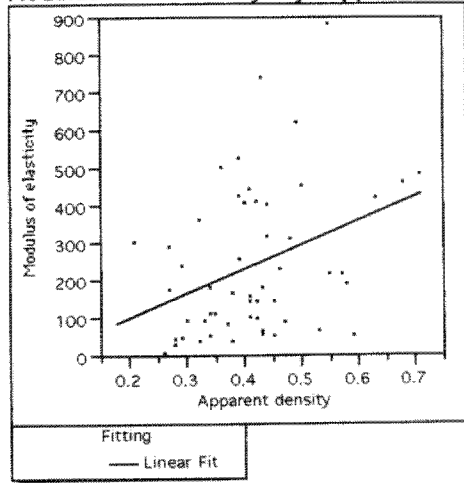


Fig. 5. The relationship between modulus of elasticity and apparent density
(linear equation : $Y = -27 + 647 X$, R square = 0.12)

Yield stress By Ash weight density

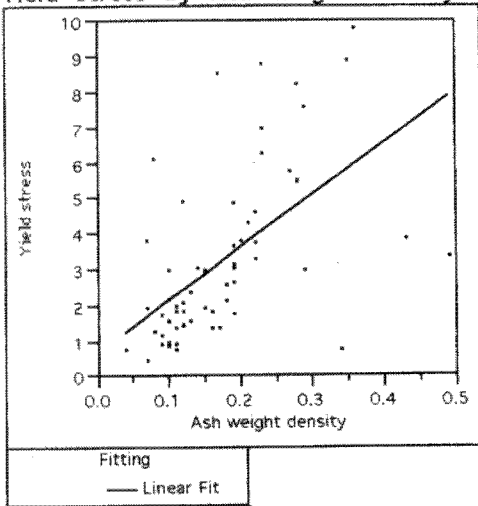


Fig. 4. The relationship between yield stress and ash weight density
(linear equation : $Y = 0.69 + 14.6 X$, R square = 0.32)

Modulus of elasticity By Ash weight density

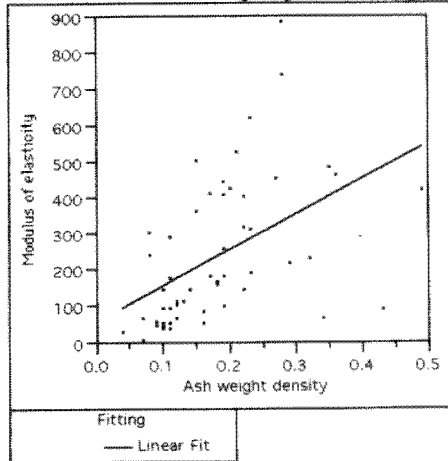


Fig. 6. The relationship between modulus of elasticity and ash weight density
(linear equation : $Y = 60 + 983 X$, R square = 0.22)

표본의 apparent density의 평균치는 $0.399 \pm 0.107\text{g/cc}$, ash weight density는 $0.164 \pm 0.084\text{g/cc}$, yield stress는 $3.58 \pm 2.54\text{MPa}$, 탄성

계수는 $215 \pm 184\text{MPa}$ 였다(Table 4). 재생골의 역학적 및 물리학적 특성의 연관 관계를 알아보기 위하여 선형회귀 방정식을 이용하였으며, 항복응력과 탄성계수를 y값으로 정하여, 항복응력과 apparent density 및 ash weight density를 각각 비교하였고, 탄성계수와 apparent density 및 ash weight

density를 각각 비교하였다. 모든 선형 회귀방정식은 통계적으로 유의있게 관찰되었으나($P < 0.001 - 0.008$), R square의 값이 0.12-0.34로서 역학적 성질은 물리학적 성질과 12%-34%만이 연관된 것으로 나타나, 신연 후 재생골의 물리학적 및 역학적 연관 관계는 높지 않은 것으로 사료되었다(Table 5, Fig. 3, 4, 5, 6).

고 찰

하지 부동의 치료에 골연장술에 의한 신연 골형성은 신연하에서 절골술 부위에서 유발되는 골형성을 의미하며, 서서히 점진적이고도 주기적인 장력을 가하여 절골술 자리에 골조직이 형성되는 것을 나타낸다. 이러한 기술은 최근 임상에서 많이 발전되어 왔으나 이러한 과정에 대한 과학적인 기초 자료가 제대로 연구되어 있지 않은 상태이다. 골절 가골의 역학적 성질에 대한 연구는 어느 정도 발표되었으나, 연장골에 대한 역학적 검사 결과는 드물다.

본 실험에서 실험동물로 이용한 개는 인간의 신연 골형성과 비슷한 모델로서 신연 골형성에 대한 실험 동물로 많이 이용되고 있으며^{10,15}, Kuhn 등¹⁰은 개의 원위 대퇴부를 이용하여 인간의 골조직과 비교한 생역학적 실험 후 개의 골소주는 인간의 것과 질적으로 유사하다고 하여, 일반적인 신연골에 대한 실험에서 개를 이용한 실험에 대한 타당성을 부여하였고, apparent density에 대한 ash weight density의 비율은 인간의 경우 약 0.54이며, 개의 경우 0.55의 비율을 갖는다고 하였다. 또한 Gong 등⁶은 인간의 경우 0.56, 개의 경우 0.547의 비율을 발표하였다.

전체 골조직에서 나타나는 특성은 골조직 구성물의 특징적인 기능과 구조적인 기질화에 의하여 결정되며, 따라서 골조직에서의 전체적인 특성을 파악하기 위하여는 신연의 경우 재생된 골조직에 대한 material level에서의 측정이 필수적이다. 즉 골의 apparent density와 ash weight density의 측정이 필수적이며, 이 중 골의 ash weight density는 골내의 무기물 구성성분(mineral component)에 관계되어 결정되며, apparent density는 무기물 외에, 유기물, 물 및 휘발성 무기물질 등의 구성성분에 의해 결정되어 진다. Waanders 등¹⁰은 개를 이용한

실험에서, 성숙이 덜 진행된 재생골에서 apparent density에 대한 ash weight density의 선형 회귀 방정식은 경사도가 성숙골에 비해 낮다고 하였으며, 결국 재생골은 아직은 활발한 활동기에 있어 골기질이 평형을 이루지 못하고 불균일성을 나타낼 것이며, 즉 부분적으로 광화작용(mineralization)이 덜 된 부분을 포함하게 된다고 하였으며, 이것은 결국 apparent density에 영향을 미쳐, 예상보다 낮은 ash fraction이 나타나게 된다고 보고 하였다. Carter와 Hayes⁵는 이러한 ash weight density와 apparent density는 정상골에서 선형관계(liner relationship)를 갖는다고 하였으며, 이것은 mineralize된 조직의 측정에 필수적이라고 하였다. Aronson 등³은 재생골과 정상골의 골밀도와 칼슘(calcium)을 측정 한 보고에서 절골술 후 119일째 재생골과 정상골의 측정치가 같아졌다고 보고하였다. 본 실험의 경우 재생골에서 apparent density와 ash weight density는 선형관계를 갖는 것으로 측정되고, 또한 골경화의 기간이 증가될수록 apparent density에 대한 ash weight density의 비율이 증가되는 것으로 나타나, Waanders등이나, Carter와 Hayes와 같은 결과를 얻었다. 또한 본 실험의 경우 정상측의 골조직에 대한 물리적인 특성을 측정하지 않았지만, Kuhn 등¹⁰에 의한 개에서의 apparent density에 대한 ash weight density의 비가 정상에서 0.55를 기준으로 할 경우, 절골술 후 182일째에도 그 비율이 0.513으로 측정되어, 119일째 골밀도와 calcium 측정치가 정상으로 회복되었다는 Aronson 등의 보고³와는 차이가 있었다.

Sferra 등¹⁴은 orthofix를 이용한 신연실험에서 절골술 후 약 1주후 부터 5주까지 신연하여 절골술 8주째 재생된 골조직에 대한 생역학 검사에서 재생골은 정상골보다 그 torsion에 대한 강도가 같거나 더욱 강해진 소견이 관찰되었음을 보고하였으나, 본 실험의 경우 술후 시간이 경과될 수록 항복용력과 탄성계수의 크기가 증가되는 양상이 관찰되었으며, 정상측과 비교하여 검사할 수는 없으나, 방사선학적 골밀도 측정상 정상측에 비해 술후 24주까지 재생골의 골밀도가 감소되고, apparent density에 대한 ash weight density의 비율도 정상보다 낮아, 압박력에 대한 강도는 정상보다 낮은 것으로 사료되었으며, Sferra등의 결과와는 가해진 힘의 종류가 다르지만

골의 강도에 대하여는 상반된 결과를 보였다.

Bell 등⁶은 척추골의 ash weight density는 연령이 증가될수록 감소되는 소견을 보인다고 하고, 이때 척추골에 대한 압박강도와는 선형적인 관계가 없다고 하였다. 그러나 Weaver와 Chalmer¹⁷는 ash weight density와 연령이 골소주의 최대압박강도(ultimate compression strength)에 미치는 영향을 관찰한 후, 골조직의 강도와 ash density 사이에 상당한 연관성이 있다고 발표하여 골조직의 물리적 성질 및 역학적 성질 사이에 연관성이 있다고 하였다. Galante 등⁷은 척추의 골소주에서 apparent density와 압박 강도 사이에 연관성이 있다고 하였으며, McElhaney 등^{11,12}도 골조직의 apparent density와 압박 강도 사이에 연관성이 있는 것 이외에 압박 탄성계수(compressive modulus)와 apparent density 사이에도 연관성이 있다고 하였다. Kuhn 등⁸도 개와 인간의 골에 대한 물리적 성질과 역학적 성질의 비교에서 정상의 경우 약 80% 이상의 연관성이 있다고 보고하여, 대부분의 저자들은 ash weight density와 압박강도 사이에 연관성이 있다고 하였으며, Waanders 등¹⁰은 개를 이용한 신연골 형성에 대한 물리적 및 역학적인 관계에 대한 실험에서 두 특성 사이의 관계는 15-50%만이 서로 연관되어 있다고 하여, 정상골과 같이 밀접한 관계가 없다고 보고하였고 이것은 조직의 비전형성(non-homogeneity)과 low ash density에 의하여 유발되었다고 하였다. 본 연구에서는 재생골의 물리학적 성질과 역학적 성질에 대한 선형회기 방정식에서 두 특성 사이에는 연관이 있는 것으로 통계학적으로 나타나, 대부분의 저자^{7,9,11,12,16,17}와 유사한 결과를 얻었으며, 본 실험의 경우, 그 연관성은 12-34%만 회기 방정식으로 설명되어질 수 있는 것으로 나타나, Waanders 등의 경우보다 낮은 연관성의 소견을 보였다. 이것은 재생골이 정상골과 비무기질화된 조직이 혼합된 상태에서 실험한 결과에 의해 유발된 것으로 사료되며, 특히 Waanders 등의 경우 술후 20주까지의 표본에서만 측정된 것으로 26주까지의 표본으로 검사한 본 실험을 비교하면, 더욱 그 연관성은 감소된 것으로 사료된다.

방사선 골밀도 측정상 재생골의 골밀도는 정상측보다 실험기간중 항상 낮게 측정되어, 술후 119일째 골밀도가 정상으로 회복되었다는 Aronson 등³의 보

고와는 차이가 있었으며, 재생골 원위부의 골밀도가 가장 낮게 측정되어 실험 후 8주부터 절골술 이하 부위의 골밀도가 상당히 감소됨을 알 수 있었으며, 이것은 실험동물이 수술부위의 다리에 실험기간 동안 거의 체중을 부하 하지 않는 것으로 관찰되어 체중부하의 감소에서 유발된 것으로 사료되었다. 또한 수술후 26주째까지의 골의 물리적 성질이 정상으로 회복되지 않고, 골의 강도도 회복이 늦은 원인으로 작용되었다고 사료되어 적절한 실험을 위하여는 체중 부하를 효과적으로 유발시킬수 있는 방법이 필요할 것이다.

요약 및 결론

본 실험에서 재생골의 물리적 특성과 역학적 특성은 술후 26주까지의 신연 및 골경화의 기간후에도 정상으로 회복되지 않았으며, 물리적 특성과 역학적 특성의 상관관계도 정상보다 낮은 소견을 보여, 역학적 특성은 물리적 특성에 의하여 일부만 설명이 가능하여 술후 26주까지도 정상 회복이 안되는 것으로 판명되어, 골의 신연골 연장시 재생골의 경화가 일어날 때까지 외고정 장치를 충분히 사용해야 재생골의 골절을 방지 할 수 있을 것으로 사료된다. 더욱 정확한 실험을 위하여는 재생골이 충분히 성숙될 때까지의 기간 설정 및 실험중 효과적인 체중부하의 방법 등의 개발 이외에도 재생골 조직중 mineralize 된 부분만을 선택적으로 채취하여 실험하여 더욱 정확한 재생골의 물리적 및 역학적 성질에 대한 규명이 필수적일 것으로 사료된다.

REFERENCES

- 1) **Abbott LC** : The operative lengthening of the tibia and fibula. *J Bone Joint Surg*, 9:128-152, 1927.
- 2) **Anderson WV** : Leg lengthening. *J Bone Joint Surg*, 34-B:150, 1952.
- 3) **Aronson J, Good B, Stewart C, Harrison B and Harp J** : Preliminary studies of mineralization during distraction osteogenesis. *Clin Orthop*, 250:43-49, 1990.
- 4) **Bell GH, Dunbar O, Beck JS and Gibb A** : Variation in strength of vertebrae with age and their relation to osteoporosis. *Calcif Tissue Res*, 1:75-86, 1967.

- 5) **Carter DR and Hayes WC** : The compressive behavior of bone as a two-phase porous structure. *J Bone Joint Surg*, 59-A:954-962, 1977.
- 6) **Codivila A** : On the means of lengthening in the lower limbs, the muscles and tissues which are shortened through deformity. *Am J Orthop Surg*, 2:353-369, 1905.
- 7) **Galante J, Rostoker W and Ray RD** : Physical properties of trabecular bone. *Calcif Tissue Res*, 5:236-246, 1970.
- 8) **Gong JR, Arnold JS and Cohn SH** : Composition of trabecular and cortical bone. *Anat Rec*, 149:325-331, 1964.
- 9) **Ilizarov GA** : A new principle of osteosynthesis, using cross wires and ring(in russian). SB Nauchn Rab Kurgan *OBI Nanchn Med Ova*, 146-160, 1954.
- 10) **Kuhn JL, Goldstein SA, Ciarelli MJ and Matthews LS** : The limitation of canine trabecular bone as a model for human: A biomechanical study. *J Biomechanics*, 22:95-107, 1989.
- 11) **McElhaney JH, Alem NM and Roberts VL** : A porous block model for cancellous bone. New York, Am Soc of Mech Engineers publication 70-WA/BHF-2:1-9, 1970.
- 12) **McElhaney JH, Fogle JL, Melvin JW, Hayes RR, Roberts VL and Alem NM** : Mechanical properties of cranial bone. *J Biomech*, 3:495-511, 1970.
- 13) **Schickendantz MS, Watson JT, Sferra JJ and Kambic HE** : A model for evaluating the strength of bones lengthened by distraction osteogenesis. *Clin Orthop*, 275:248-252, 1992.
- 14) **Sferra J, Kambic HE, Schickendantz MS and Watson JT** : Biomechanical analysis of canine bone lengthened by the callotasis method. *Trans Orthop Res Soc*, 18, 1992.
- 15) **Terjessen T** : Healing of rabbit tibial fractures using external fixation. Effects of removal of the fixation device. *Acta Orthop Scand*, 55:192, 1984.
- 16) **Waanders NA, Kuhn JL, Herzenberg JE and Goulet JA** : The mechanical and physical properties of regenerate bone in a canine model of distraction osteogenesis. *Trans Orthop Res Soc*, 580, 1993.
- 17) **Weaver JK and Chalmer J** : Cancellous bone: its strength and changes with aging and an evaluation of some methods for measuring its mineral content. I. Age changes in cancellous bone. *J Bone Joint Surg*, 48-A:289-299, 1966.