

# 돼지 하악 과두의 해면골에서 유한요소분석법으로 예측한 방향에 따른 탄성율과 3차원 골 미세지표 간의 상관관계

서울대학교 치의학대학원 구강악안면방사선학교실, 인제대학교 상계백병원 치과학교실

\*서울대학교 치의학대학원 구강악안면방사선학교실, 치학연구소

\*\*서울대학교 치의학대학원 구강악안면방사선학교실, 치학연구소 및 BK21

박관수 · 이삼선\* · 허경희\* · 이원진\*\* · 허민석\* · 최순철\*

## The relationship between 3D bone architectural parameters and elastic moduli of three orthogonal directions predicted from finite elements analysis

Kwan-Soo Park, Sam-Sun Lee\*, Kyung-Hoe Huh\*, Won-Jin Yi\*\*, Min-Suk Heo\*, Soon-Chul Choi\*

Department of Oral and Maxillofacial Radiology, School of Dentistry, Seoul National University, and Department of Dentistry, Inje University Sanggye Paik Hospital

\*Department of Oral and Maxillofacial Radiology, Dental Research Institute, School of Dentistry, Seoul National University

\*\*Department of Oral and Maxillofacial Radiology, Dental Research Institute and BK21, School of Dentistry, Seoul National University

### ABSTRACT

**Purpose** : To investigate the relationship between 3D bone architectural parameters and direction-related elastic moduli of cancellous bone of mandibular condyle.

**Materials and Methods** : Two micro-pigs (Micro-pig<sup>R</sup>, PWG Genetics Korea) were used. Each pig was about 12 months old and weighing around 44 kg. 31 cylindrical bone specimen were obtained from cancellous bone of condyles for 3D analysis and measured by micro-computed tomography. Six parameters were trabecular thickness (Tb.Th), bone specific surface (BS/BV), percent bone volume (BV/TV), structure model index (SMI), degree of anisotropy (DA) and 3-dimensional fractal dimension (3DFD). Elastic moduli of three orthogonal directions (superior-inferior (SI), medial-lateral (ML), and anterior-posterior (AP) direction) were calculated through finite element analysis.

**Results** : Elastic modulus of superior-inferior direction was higher than those of other directions. Elastic moduli of 3 orthogonal directions showed different correlation with 3D architectural parameters. Elastic moduli of SI and ML directions showed significant strong to moderate correlation with BV/TV, SMI and 3DFD.

**Conclusion** : Elastic modulus of cancellous bone of pig mandibular condyle was highest in the SI direction and it was supposed that the change into plate-like structure of trabeculae was mainly affected by increase of trabeculae of SI and ML directions. (*Korean J Oral Maxillofac Radiol* 2008; 38 : 81-7)

**KEY WORDS** : Architecture; Mandible; Micro-CT; Finite Element Analyses

### 서론

골질의 치유 정도나 치과 임플란트가 부하에 견딜 수 있는 정도, 골 구조의 변화를 야기하는 병변의 진행 등을 평가하기 위해 여러 가지 골질을 예측하는 수단이 중요하며 이를 위한 다양한 연구가 시행되어 왔다. 골질이란 표

현은 매우 모호한 표현으로 치의학 분야에서는 Lekholm과 Zarb(1985) 같은 연구자들이 피질골과 해면골의 분포 양상을 나타내는 거시적 구조를 가지고 골질을 분류하기도 하였다.<sup>1</sup> 그러나 이런 식의 분류는 관찰자에 따라 많은 차이를 나타낼 수 있는 단점을 가지고 있으므로<sup>2</sup> 좀 더 근본적인 골의 미시적 구조와 연관된 물리적 성질을 연구하는 것이 도움이 될 수 있다.

피질골과 해면골은 모두 골의 강도와 같은 기계적 성질에 영향을 미칠 수 있는데 피질골과 해면골을 모두 포함하는 골체를 이용한 연구는 오래 전부터 많이 이루어져

접수일(2008년 3월 14일), 수정일(2008년 4월 25일), 채택일(2008년 4월 30일)

Correspondence to : Prof. Sam-Sun Lee

Department of Oral and Maxillofacial Radiology, School of Dentistry, Seoul National University 28, Yeongseon-dong, Jongno-gu, Seoul 110-749, Korea

Tel) 82-2-2072-3978, Fax) 82-2-744-3919, E-mail) raylee@snu.ac.kr

왔지만 피질골과 해면골 각각에 대한 연구는 그리 많이 이루어지지 않았다. 그러나 해면골에 대하여는 골소주(trabeculae)라는 특징적인 패턴을 가지며 얽혀있는 구조에 대해 많은 사람들이 관심을 보이며 연구를 시도하였다. 해면골을 구성하는 골소주의 방향이나 패턴에 대한 연구는 초기에는 2차원적인 조직형태측정법(histomorphometry)에 의한 연구가 많이 이루어졌는데 얇게 펼쳐진 많은 수의 조직 시편 중 골소주의 형태를 가장 잘 나타내는 부분을 선택하여 분석하는 방법이 사용되기도 하였다.<sup>3</sup> 방사선학적으로는 2차원적 표현만이 가능한 평면 방사선사진을 이용하여 골소주의 형태와 골질을 평가하는 시도가 이루어져 왔다.<sup>4,5</sup> 이러한 2차원적 요소들은 3차원적 요소를 반영하지만 정확한 예측을 허용하지는 않기 때문에 3차원적으로 미세한 골소주의 확인이 가능한 micro-CT와 같은 장비들이 개발되면서 해면골의 골소주 구조에 대한 연구가 비약적으로 발전하기 시작하였다. 이미 발표된 여러 연구에서 3차원 골 미세구조와 2차원 방사선 영상, 해면골의 물리적 성질 간의 상관 관계 등이 알려졌고 최근 들어 국내에서도 이와 비슷한 연구들이 이루어지기 시작했다.<sup>6,9</sup>

유한요소분석법(finite element method, FEM)은 원래 공학 분야에서 구조해석이나 열 전달, 전자기장 해석 등을 위해 전체 물체에 대한 문제를 한꺼번에 풀지 않고 유한개의 요소로 나누어 각각의 요소에 대한 방정식을 세우고 그들을 조합하여 전체 물체에 대한 방정식으로 구하는 수치 기법으로 실제로 실험하지 않고 수학적 계산만으로 어떠한 구조체에 대한 물리적 성질을 얻을 수 있는 방법이다. 컴퓨터의 발달과 함께 해면골 골소주와 같이 복잡한 형태의 구조물에 대한 계산이 가능해졌다. 기계적인 측정으로 실험하기 어려운 상황이나 구조체의 파괴를 방지해야 하는 경우에 특히 유용하다.

이미 허 등<sup>7</sup>이 돼지 하악 골체의 해면골을 이용한 이전 연구에서 기계적 측정법에 의한 물리적 성질과 3차원 골 미세구조 영상 지표 간의 상관 관계를 밝힌 바 있다. 그러나 일반적으로 기계적 측정법은 파괴적 측정법으로 한 번 실험에 사용한 시편을 더 사용하는 것이 불가능하므로 방향에 따른 물리적 성질의 차이를 알 수 없다. 본 연구에서는 돼지 하악 과두의 해면골을 대상으로 촬영한 micro-CT 데이터를 이용하여 3차원 골 미세구조 영상 지표와 유한요소분석법을 통하여 얻어진 과두의 해부학적 방향에 따른 해면골의 기계적 성질 간의 상관 관계를 알아보려고 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 골 시편의 준비

12개월 된 무게 44 kg의 건강한 수컷 마이크로 돼지

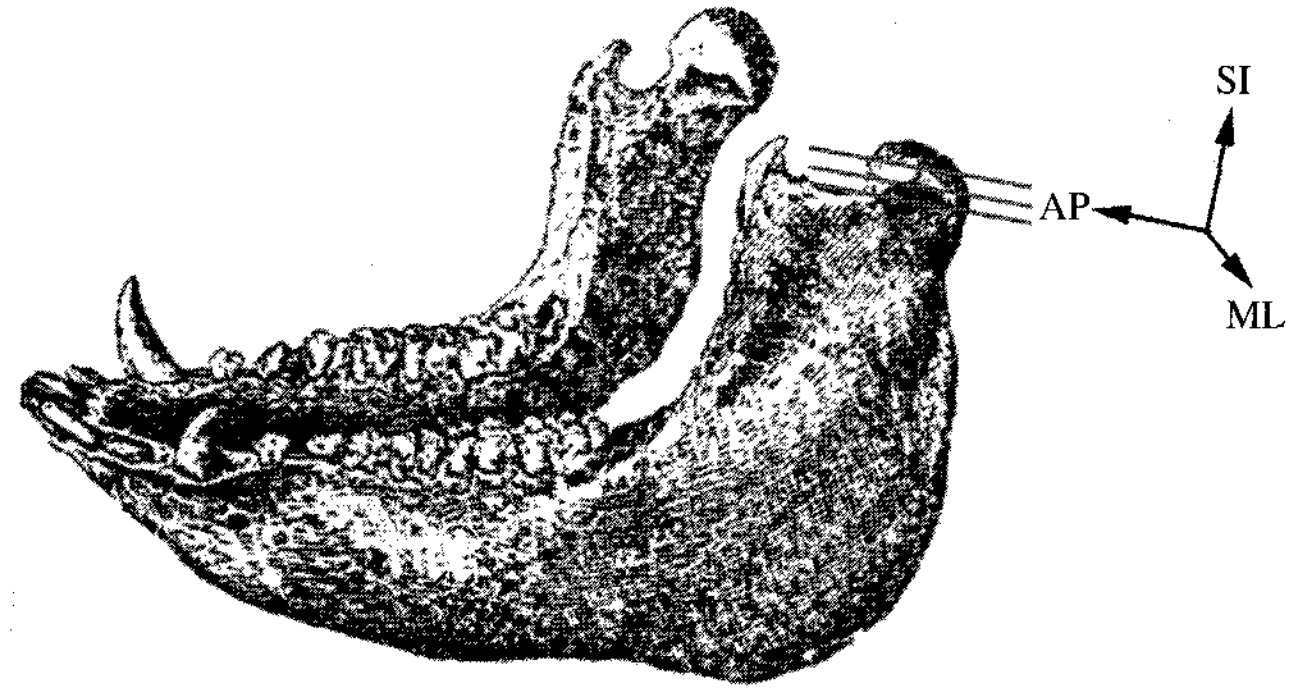


Fig. 1. Illustration of a pig mandible and sectioning planes with definition of the three orthogonal directions.

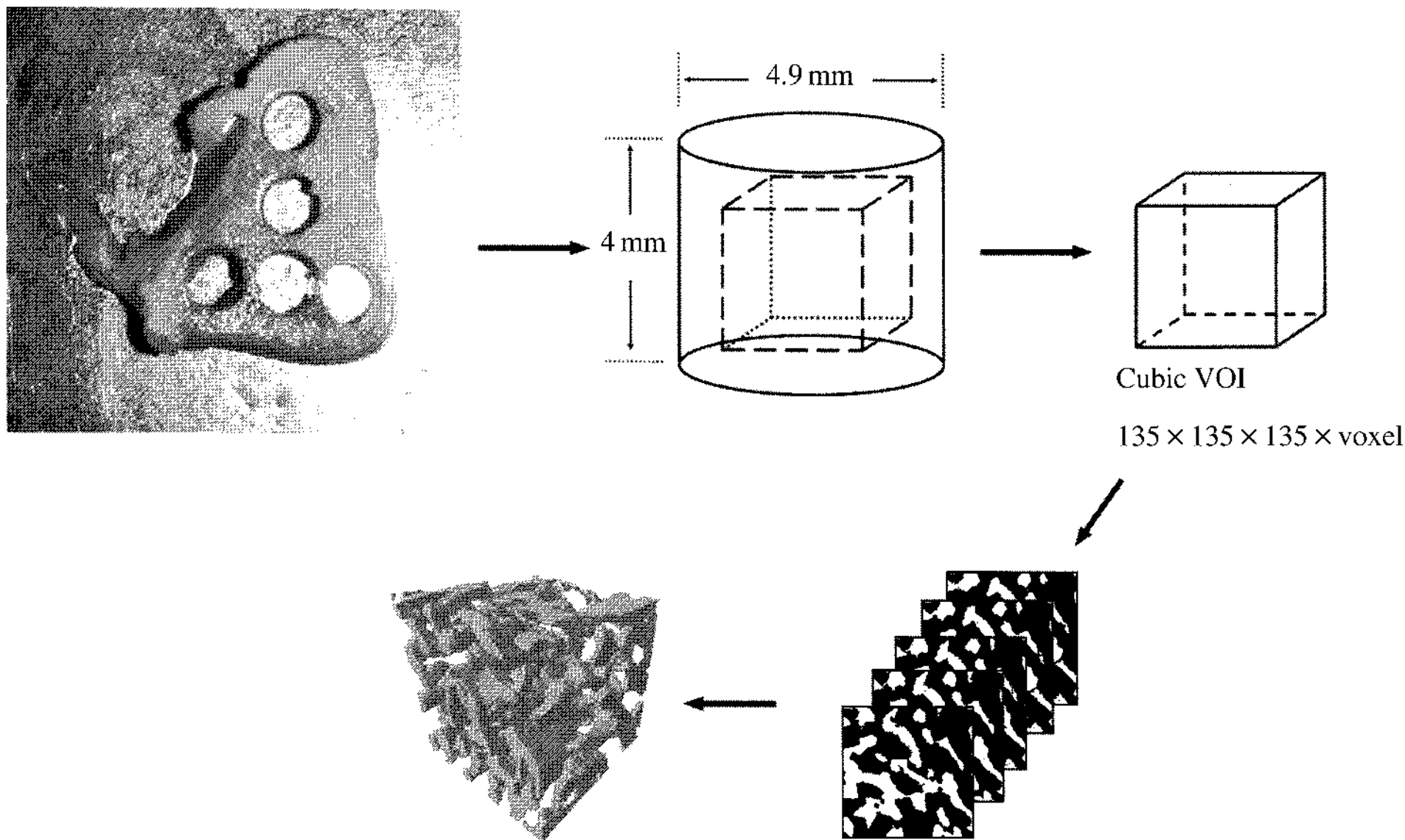
(Micro-pig<sup>R</sup>, PWG Genetics Korea) 2마리로부터 하악 과두를 4개 얻었다. 이 연구계획은 동물사용에 관한 윤리위원회의 심의를 거쳤다.

Micro-cutting and grinding system인 300 CP precision parallel-control EXAKT (Apparatebau GmbH, Norderstedt, Germany)를 이용하여, 계속적으로 관주수를 공급하면서 하악 과두를 축상면(axial plane)에 평행하게 4 mm 두께로 잘라 12개의 골판(bone plate)들을 얻었다(Fig. 1). 얻어진 골판에서 내경 4.9 mm의 트레핀 드릴을 이용하여 해면골만 포함되도록 원기둥 형태의 시편을 얻은 후 해부학적으로 내측(medial)에 원기둥에 평행하도록 선형의 홈을 파서 방향을 확인할 수 있도록 하였다. 얻어진 시편의 총 수는 31개였다.

### 2. micro-CT에 의한 3차원 영상의 획득

얻어진 원기둥 형태의 시편을 micro-CT (Skyscan-1072, SKYSCAN, Antwerpen, Belgium)로 촬영하였다. 각각의 시편은 홈이 파인 부분이 micro-CT 기기 내에서 특정 방향을 향하도록 한 후 촬영하였고, 관전압은 80 kVp, 관전류는 100  $\mu$ A였으며, 1 mm 알루미늄 여과(filtration)를 이용하였고 촬영시간은 3,400 ms였으며 14.00배의 확대율로 화소 크기(pixel size)는 19.53  $\mu$ m였다. 얻어진 데이터는 256비트의 음영 계조(gray scale)를 가진 2차원의 연속된 영상으로 변환되어 PC에 저장되며 관심 용적(Volume of interest, VOI)은 2.62  $\times$  2.62  $\times$  2.62 mm<sup>3</sup>의 크기에 135  $\times$  135  $\times$  135 복셀로 이루어진 정육면체 형태로 원기둥형태의 시편 내에서 선택하였다(Fig. 2).

골소주와 골수강(marrow space)을 분리하기 위한 역치값(threshold value)은 이전의 연구 결과를 참고하여 골소주의 비율이 가장 적게 변화하는 부분으로 결정하였으며, 개개의 연속된 2차원 영상은 이러한 역치값에 의해 골소주를 표현하는 고형의(solid) voxel과 골수강을 표시하는 비고형의(non-solid) voxel로 이루어진 이진화(binanzed) 영상으로



**Fig. 2.** Schematic overview of the specimen preparation. The volume of interest was selected in the center of rendered image of the cylindrical specimen.

변환된 후 3차원 영상으로 재구성하였다.<sup>10-12</sup> 이러한 과정은 모두 Skyscan™ CT-analyzer (ver. 1.5, SKYSCAN, Belgium) 안에서 이루어졌다. 재구성된 영상에서 과두의 해부학적인 방향을 기준으로 전방측-후방측 (anterior-posterior, AP), 상측-하측 (superior-inferior, SI), 내측-외측 (medial-lateral, ML)의 3가지 방향을 정의하였다 (Fig. 1).

### 3. 3차원 영상의 분석

3차원 미세구조 영상 지표의 분석 역시 재구성된 3차원 영상에서 Skyscan™ CT-analyzer (ver. 1.5, SKYSCAN, Belgium)를 이용하여 이루어졌으며 본 연구에 이용된 지표의 종류는 이전의 연구에서 이용한 5가지의 지표 (trabecular thickness (Tb.Th), bone specific surface (BS/BV), percent bone volume (BV/TV), structure model index (SMI), degree of anisotropy (DA) 외에 3-dimensional fractal dimension (3DFD)을 추가한 6가지였다. BV/TV는 이진화되어 표현된 관심 용적 안에 존재하는 전체 voxel 중에 고행의 영역을 나타내는 voxel의 비율로 관심 용적 내에서 골소주가 차지하는 비율을 의미한다. BS/BV는 관심 용적 안에 이진화된 고행 영역의 voxel 개수에 대한 voxel 표면적의 비율로 골소주의 부피에 대한 골소주의 표면적의 비율을 의미한다. Tb.Th는 관심 용적 내에서 고행의 영역을 나타내는 개개의 voxel에 대하여 해당 voxel을 포함하는 구 (sphere)를 위치시켜 그 구의 크기가 고행의 영역만을 포함하는 최대의 크기가 되도록 한 후 이 구들의 직경의 평균을 내어 얻어지는데 골소주의 평균 두께를 의미한다. SMI는 3차원으로 재구성된 이진화 영상에서 고행의 영역을 나타내는 voxel 부분의 표면적과 부피, 고행의 영역을 나타내는 voxel 부분에 voxel을 첨가하여 희석 (dilation)하는 과정을

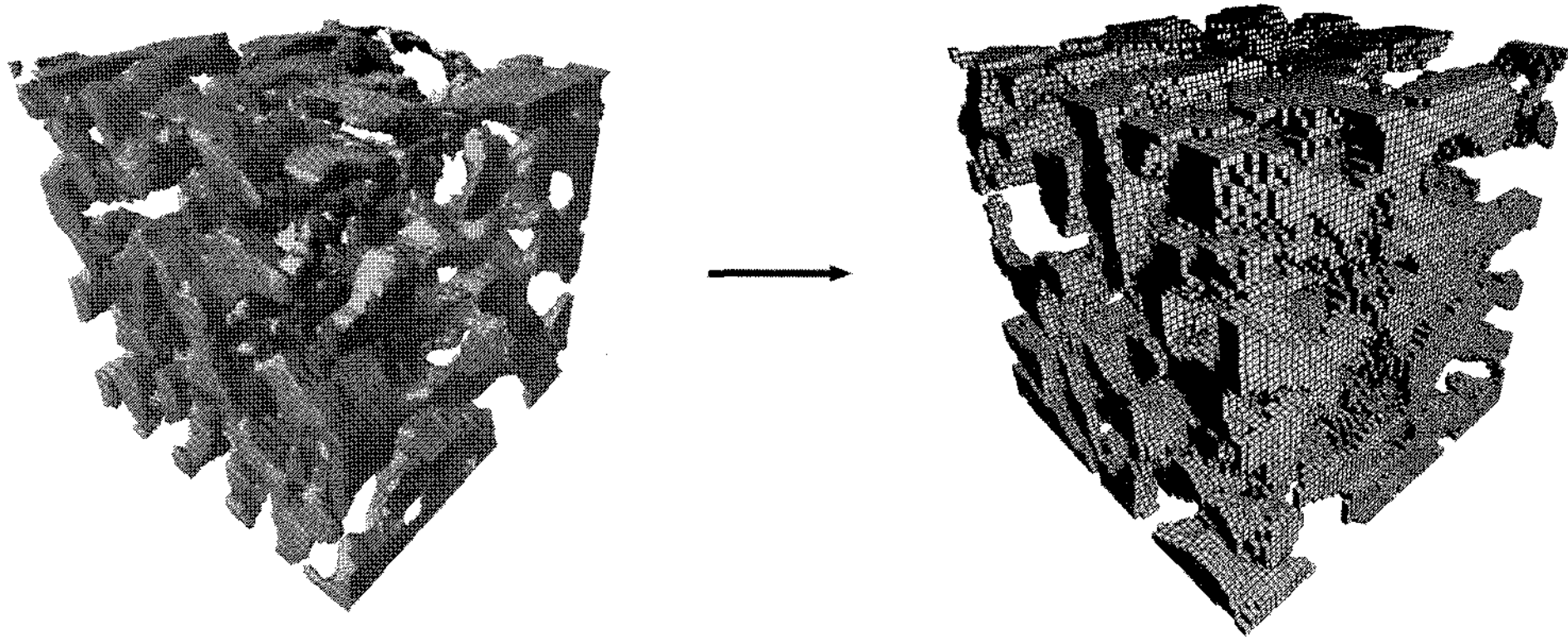
거쳐 나타난 영역의 표면적 등의 관계를 계산과정을 거쳐 얻어지는 수치로 골소주가 주로 판상 (plate-like)이나 막대상 (rod-like) 구조 중 어느 쪽의 구조로 이루어져 있는지를 나타내어 주는 지표이다. 0에 가까울수록 판상 구조를, 3에 가까울수록 실린더 구조를, 4에 가까울수록 구형의 구조를 가짐을 의미한다. 3DFD는 어떠한 구조의 표면 복잡도 (surface complexity)를 나타내는 지표로서 대상의 표면이 공간을 차지하고 있는 정도를 나타내며 box-counting method를 이용하여 계산되어어진다. DA는 비등방성 (anisotropy)의 정도로서 골소주의 분포나 배열이 3차원 상에서 대칭성이나 방향성을 이루는지를 나타내어 주는 지표이다. Mean intercept length method라는 방법으로 어떤 관심 용적에 여러 방향에서 투사된 선과 이진화된 고행의 voxel이 만나는 위치를 확인하여 각각의 선에서 가장 넓게 만나는 점들을 연결하여 타원체를 만든 후 작은 지름과 큰 지름간의 비율로 얻어진다.

### 4. 유한요소법에 의한 탄성율의 측정

등방성 (isotropic)의 물질이 미시적 단계에서 골고루 분포되어 있다는 가정하에 골소주로 이루어진 정육면체 형태의 관심 용적 부분에 대한 거시적 단계의 물성에 대한 유한요소분석이 이루어졌다. 유한요소분석은 다음과 같은 3단계로 이루어졌다.

1. 적절한 역치값 조절을 통해 얻어진 이진화된 관심 용적을 유한요소 단위로 변환시킨다 (Fig. 3).
2. 상용의 유한요소분석 소프트웨어를 이용하여 선형 분석을 시행한다.
3. 거시적 단계에서 선형 탄성을 가졌다는 근거하에 관심 용적의 골소주 구조에 대한 탄성율을 계산한다.





**Fig. 3.** The VOI(Left) processed with optimal threshold was converted into a finite element mesh (Right). The finite element mesh was constructed from micro-CT data.

유한요소 모델의 형성에 있어 이진화된 고품의 voxel은 8개의 절점을 가진 육면체의 요소(8-node brick element)로 변환되어 직접 모델의 형성 및 분석에 이용할 수 있으나 여러 개의 voxel을 하나의 요소로 묶어서 분석하는 방법도 많이 사용하고 있는데 본 연구에서는 가로, 세로, 높이 각 2개씩 총 8개의 voxel을 하나의 요소로 묶어서 절반이상이 이진화된 고품의 voxel로 이루어진 경우 고품의 요소로 판정하기로 하였다.<sup>13,14</sup> 이렇게 만들어진 유한요소 모델에 사용된 요소의 수는 54,085개부터 119,395개였다. 조직의 성질을 정의하기 위해 적용된 영율은 10 GPa이었고 포아송비(Poisson ratio)는 0.3이었다.<sup>15</sup> 이와 같은 정의 아래 직접 작성한 프로그램으로 유한요소 모델을 만들었고 MSC. Nastran (ver. 2005 R2, MSC Software Corporation, Santa Ana, CA) 소프트웨어를 이용해 유한요소분석을 시행하였다. 탄성율의 계산은 육면체의 모델의 한쪽 면에서 1N의 인장력을 적용하여 늘어난 길이를 가지고 계산하였으며 적용된 경계 조건은 힘을 가하는 반대측 면을 고정하였고 힘의 방향에 수직인 면 중 2개의 면은 인장력에 의해 모델이 늘어나더라도 평평한 형태만은 유지하도록 하였다. 이러한 방법으로 방향에 따른 탄성율  $E_{AP}$ (전방측-후방측 방향 탄성율, Elastic property of anterior-posterior direction),  $E_{SI}$ (상측-하측 방향 탄성율, Elastic property of superior-inferior direction),  $E_{ML}$ (내측-외측 방향 탄성율, Elastic property of medial-lateral direction)을 구하였다.

### 5. 통계분석

세 방향에 따른 탄성율의 평균값 간의 차이가 존재하는지 여부를 반복측정분산분석(repeated measures of ANOVA)를 통해 조사하였고, paired T-test를 이용해 세 방향 중 AP와 SI, AP와 ML, SI와 ML 방향에 따른 탄성율의 평균값에 차이가 있는지 조사하였다. 또한 micro-CT 3차원 골 미세 영상 지표와 방향에 따른 탄성율 간의 상관 관계를 피어슨 상관계수를 이용하여 조사하였다.

**Table 1.** Descriptive statistics and comparison of Elastic moduli of three directions by paired T-test

	Mean	Standard deviation	Ranges
n		31	
$E_{AP}$ (MPa) (medial-lateral)	272.61	228.14	51.6-1153.0
$E_{ML}$ (MPa) (anterior-posterior)	244.19	160.93	15.7-632.1
$E_{SI}$ (MPa) (superior-inferior)	533.85	260.71	17.2-1103.6

$E_{AP}$ ,  $E_{ML}$ ,  $E_{SI}$ : Elastic modulus along the anterior-posterior, medial-lateral, superior-inferior direction.

$E_{SI}$  is significantly larger than  $E_{AP}$  and  $E_{ML}$  by paired T-test ( $p < 0.01$ ).

$E_{AP}$  is not significantly larger than  $E_{ML}$  by paired T-test ( $p > 0.05$ ).

**Table 2.** Pearson's correlation coefficients between Elastic moduli of three directions and various 3D micro architectural parameters.

	3D architectural parameters					
	BV/TV	BS/BV	Tb.Th	SMI	DA	3DFD
$E_{AP}$	0.337	-0.305	0.606	0.180	-0.046	0.060
$E_{ML}$	0.620**	-0.051	-0.120	-0.505**	-0.221	0.581*
$E_{SI}$	0.819**	0.093	-0.197	-0.653**	0.146	-0.765*

\*\* : Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

\* : Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

$E_{ML}$ ,  $E_{AP}$ ,  $E_{SI}$  : Elastic modulus along the anterior-posterior, medial-lateral, superior-inferior direction.

BV/TV: percent bone volume, BS/BV: bone specific surface, Tb.Th: trabecular thickness, SMI: structure model index, DA: degree of anisotropy, 3DFD: 3 dimensional fractal dimension.

### 결 과

세 방향에 따른 탄성율의 평균값은 통계적으로 유의미한 차이를 보였다(repeated measures of ANOVA,  $p < 0.01$ ). 두 방향씩 따로 따로 검정한 결과는 SI 방향의 탄성율은 AP와 ML 방향에 비해 통계적으로 유의하게 큰 평균값을 나타내었고, AP 방향과 ML 방향의 비교에서는 AP 방향의

탄성율과 ML 방향의 탄성율은 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다(Table 1).

3차원 골 미세 영상 지표와 방향에 따른 탄성율 간의 상관 관계는 Table 2에 제시한 바와 같다. SI 방향의 탄성율은 BV/TV, SMI, 3DFD와 유의한 상관 관계를 보였으며 ML 방향의 탄성율 역시 BV/TV, SMI, 3DFD와 유의한 상관 관계를 보였지만 AP 방향의 탄성율은 어떠한 지표와도 유의한 상관 관계를 보이지 않았다. 특히 SI 방향의 탄성율은 BV/TV, SMI, 3DFD와 높은 상관 관계를 보였으며, ML 방향의 탄성율은 BV/TV와만 높은 상관 관계를 보였고 SMI, 3DFD와는 중등도의 상관 관계를 보였다.

## 고 찰

본 연구에서는 세가지 방향에 대한 탄성율을 구하였다. 여기서 결정한 방향은 해부학적으로 구별하기 쉬운 방향을 기준으로 이루어졌다. 해부학적인 방향과 골소주의 물리적 성질이 정확히 일치하는지 여부는 확실하지는 않지만 이러한 관계에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다. 지금까지의 연구 결과들을 종합하면 대개 해부학적으로 특정한 방향과 유사하게 골소주는 배열되어 있으며 골소주의 배열 방향과 해면골의 물리적 성질 사이에는 어떠한 특정한 상관 관계를 가질 가능성이 높다는 것이다.<sup>16-18</sup> 상식적으로 생각해 보아도 어떠한 구조가 특정한 방향성을 띠고 배열되어 있다면 이는 이 구조체의 물리적 성질에 영향을 미칠 것임이 자명하다.

이전의 연구에서 3차원 영상 미세 지표와 탄성율 사이의 상관 관계는 대체로 BV/TV에서 강하게 나타났다.<sup>6,7,9,19</sup> 본 연구에서도 마찬가지로 BV/TV와 각 방향의 탄성율 사이의 관계가 대체로 가장 높게 나타났다. BV/TV는 관심용적 내에 골소주가 차지하는 비율을 의미하는 지표이므로 골소주가 많이 있을수록 탄성율이 높아짐을 의미한다. 이번 연구에서는 해부학적으로 세가지 방향, 즉 전후방향, 내외방향, 상하방향에 따른 탄성율을 각각 구하였기 때문에 비교 역시 각각 이루어졌다. 특이한 것은 과두에서 전후방향으로 나타나는 탄성율은 가장 상관 관계가 높을 것으로 여겨지는 BV/TV와도 유의한 상관 관계를 나타내지 않았다는 점이다.

다른 미세 지표인 SMI는 상하방향의 탄성율과는 강한 음의 상관 관계를 보였고 내외방향의 탄성율과는 중등도의 음의 상관 관계를 보였는데 이는 SMI 라는 지표의 특성과 연관지어 생각해볼 수 있다. SMI 라는 지표는 수치가 0에 가까워 질수록 판상의 골소주 구조를 가짐을 의미하고 수치가 커질수록 판상의 구조는 없어지고 막대형 또는 실린더형, 구형의 구조를 가지게 됨을 의미하며 이는 판상의 구조에 가까운 구조가 될 때 골의 탄성율이 높아지는 것을 의미한다.<sup>20</sup> 해면골 구조 내에서 골소주가 차지하는

비율이 높을수록 해면골은 판상의 구조를 띠는 연구 결과도 있으므로 BV/TV와 함께 SMI가 골의 탄성율과 높은 상관 관계를 가지는 것을 설명할 수 있으며, 그 탄성율이 SMI와 상관 관계가 있는 것으로 나타난 상하방향과 내외 방향의 골소주 구조가 판상의 골소주 구조를 만드는 중요한 역할을 한 것으로 추측할 수 있다.<sup>21</sup>

비등방성의 정도(DA)는 어떠한 방향의 탄성율과도 상관 관계를 보이지 않았는데 기존의 몇몇 연구에서도 비록 한 방향에 대한 탄성율과의 비교였지만 같은 결과를 보였다.<sup>6,7,9</sup> 이렇게 상관 관계가 없다는 결과는 이미 알려진 대로 mean intercept length와 같이 DA를 구하는 방식의 특수성으로 인해 DA가 다른 미세 지표와는 다른 성질을 지니고 있음을 알려줌과 동시에 DA가 구해지는 방법에서 얻어지는 구조의 방향성과 실제 해부학적 방향성의 차이가 있음에서도 추론할 수 있다. 첫 부분에 언급한 바와 같이 골소주의 구조가 비등방성이 있다는 사실은 이미 알려져 있기 때문에 비등방성을 가졌다는 사실, 즉 특정한 방향성을 띠고 있을 가능성이 있다는 사실에 대한 연구가 많이 이루어졌다.<sup>12,22,23</sup> 물론 비등방성을 가지고 있다고 하여 반드시 특정 방향으로 골소주가 배열되어 있으리라고 확신할 수는 없다. 또한 골소주가 배열되어 있는 구조적 방향성은 물리적인 성질의 방향성과도 유사하게 나타나게 된다. 본 연구에서 사용한 CT-analyzer 소프트웨어에서 DA를 구하는 과정은 알기 쉽게 말하자면 mean intercept length method를 통해 가장 골소주가 많이 배열되어 있는 방향과 가장 적게 배열되어 있는 것으로 추정되는 방향간에 얻어진 수치 사이의 비율로서 얻어지므로 단순히 탄성율과 같은 물리적 성질과 비교한다면 그것이 어떠한 방향의 물리적 성질이란 사실에 관계없이 상관 관계가 적게 나올 수밖에 없다. 차라리 각 방향의 탄성율의 비와 DA를 비교하는 것이 유의미한 상관 관계를 가질 가능성이 높다. 본 연구에서는 DA를 찾아내는 방식으로 방향을 정하여 탄성율을 구하지 않았기 때문에 DA와 유의한 상관 관계가 나타나지 않을 것으로 추정할 수 있다.<sup>24</sup>

3차원 프랙탈 차원은 상하방향의 탄성율과는 높은 상관 관계를 보였고 내외방향의 탄성율과는 중등도의 상관 관계를 나타내었는데 탄성율이 높은 구조에서 골소주의 양이 많고 상하방향과 내외방향으로의 골소주 배열이 높아진다는 사실과 프랙탈 차원을 구한 방식인 box counting method와 연관 지을 수 있겠다. 다만 전후방향으로의 탄성율과는 상관 관계를 가지지 않는 것으로 나타난 결과에 대한 추가적인 연구가 필요할 것이다.

이와 같이 여러 가지 골 미세 영상 지표와 탄성율과의 상관 관계가 가지는 의미를 생각해보았지만 이러한 상관 관계는 말 그대로 영상 지표와 탄성율의 상관 관계만을 의미하며 어떤 지표가 해면골의 물리적 성질에 어떻게 영향을 미치는지를 정확하게 설명하여 주는 것은 아니므로

이에 대한 연구 또한 필요하다 하겠다.

탄성율 자체에 대해서만 본다면 각 방향에 따른 탄성율은 방향에 따라 다른 결과를 보였는데 상하방향으로의 탄성율이 다른 방향의 탄성율보다 유의하게 높은 것으로 나타났다으며 내외방향의 탄성율과 전후방향의 탄성율은 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 이것은 돼지 하악 과두의 해면골이 물리적으로 비등방성을 띤다고 말할 수 있으며 이러한 물리적 비등방성은 구조적인 비등방성과도 연관이 있으므로 돼지 하악 과두는 골소주의 구조로 볼 때에도 상하방향으로 가장 많은 배열을 하고 있을 가능성이 높다는 것을 알려준다.<sup>16-18</sup>

유한요소분석법에 의한 연구에 의한 실험 결과는 실제로 측정된 결과와 다를 수 있다는 문제를 제기할 수 있다. 하지만 본 연구에서와 같이 작은 시편을 사용하여 실험한 경우에는 기계적인 방법으로 실제 측정을 하기가 어렵다. 육면체의 작은 시편을 제작하기도 어려울 뿐 아니라 이렇게 작은 시편을 실험하기 위한 기계도 별로 없으며 해면골과 같이 다공성의 구조를 가진 시편은 고정 방법이나 힘을 가하는 미세한 방향의 차이에 의한 시편의 뒤틀림, 시편의 고정 자체의 어려움 등에 의해 매우 많은 실험 오차가 발생하게 된다. 해면골로 이루어진 시편과 같은 작은 구조물을 실제 측정할 때 이러한 실험 오차를 없애는 방법 자체도 또 다른 연구 대상이 되고 있다. 기계적인 측정법은 대개 파괴적 방법이며 비파괴적 방법으로 사용이 가능한 기기도 있지만 파괴적 방법을 사용하는 기기보다 훨씬 더 정밀도를 요하기 때문에 시편의 크기를 크게 얻을 수 있는 척추나 대퇴골 등에서 실험이 이루어지고 있다. 물론 가능하기만 하다면 기계적 측정과 유한요소법에 의한 측정을 함께 고려하는 것도 좋은 방법일 것이다.<sup>25-28</sup>

유한요소분석법의 또 한가지 한계는 탄성율 외에 최대강도(maximum stress)나 항복강도(yield stress)와 같은 다른 물리적 성질을 구하기가 어렵다는 점이다. 탄성율과 같은 물성은 응력-변형 곡선 상에서 선형의 관계를 가지는 부분에 해당하므로 유한요소분석에서도 선형의 방정식을 사용하면 되지만 다른 물리적 성질들은 비선형 방정식을 풀어야 한다. 물론 이러한 비선형 방정식의 계산이 불가능한 것은 아니지만 훨씬 더 많은 계산식과 시행착오를 거쳐 설계해야 할 문제이므로 훨씬 더 많은 시간이 필요하며 좀 더 장기적인 연구가 필요하다 하겠다. 또한 범하기 쉬운 오류는 선형방정식에 의한 유한요소분석법에 의해 얻어진 결과를 골강도(bone strength)와 완전히 같은 것으로 해석해서는 안된다는 것이다. 골강도는 다양한 물리적 성질이 합하여진 결과를 통합적으로 말하는 것이다. 물론 이전의 연구에서 얻어진 바와 같이 탄성율과 같은 성질이 다른 물리적 성질과도 높은 상관 관계를 이루므로 골강도와 많은 연관성이 있을 가능성은 높다고 할 수 있다.<sup>6,7</sup>

본 연구는 돼지의 하악 과두의 해면골에 대하여만 이루

어졌지만, 하악의 정중부나 골체부, 하악지부와 같은 부위도 연구 대상에 포함시킨다면 하악골 전체에 대한 골소주 구조나 물리적 성질의 특성 등에 관해 좀더 정확히 알 수 있을 것으로 생각되며 나아가 돼지가 아닌 인간의 하악골에서의 연구나 상악골에 대한 연구, 무치악 환자나 유치악 환자와의 비교 연구 등이 함께 이루어진다면 더욱 좋은 자료가 될 것으로 믿는다.

결론적으로 돼지 하악 과두의 해면골은 상하방향으로 가장 높은 탄성율을 가지고 있으며 골소주의 양이 늘어나 구조가 판상에 가까워지면 탄성율도 높아지고 이렇게 늘어나는 골소주는 상하방향과 내외측방향으로 위치하는 것으로 추정된다.

## 참 고 문 헌

1. Lekholm, U, Zarb GA. Patient selection and preparation. In: Bränemark PI, Zarb G.A, Albrektsson, T, editors. Tissue Integrated Prosthesis: Osseointegration in Clinical Dentistry, Chicago: Quintessence Publ Co.; 1985. p. 199-209.
2. Lindh C, Petersson A, Rohlin M. Assessment of the trabecular pattern before endosseous implant treatment: diagnostic outcome of periapical radiography in the mandible. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 1996; 82 : 335-43.
3. Weinstein RS, Hutson MS. Decreased trabecular width and increased trabecular spacing contribute to bone loss with aging. Bone 1987; 8 : 137-42.
4. White SC, Rudolph DJ. Alterations of the trabecular pattern of the jaws in patients with osteoporosis. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 1999; 88 : 628-35.
5. Heo MS, Park KS, Lee SS, Choi SC, Koak JY, Heo SJ, et al. Fractal analysis of mandibular bony healing after orthognathic surgery. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 2002; 94 : 763-7.
6. Huh KH, Park MS, Yi WJ, Heo MS, Lee SS, Choi SC. Relationship between trabecular strength and three-dimensional architecture in the pig mandible using microcomputed tomography. Korean J Oral Maxillofac Radiol 2005; 35 : 167-73.
7. Huh KH, Yi WJ, Jeon IS, Heo MS, Lee SS, Choi SC, et al. Relationship between two-dimensional and three-dimensional bone architecture in predicting the mechanical strength of the pig mandible. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 2006; 101 : 363-73.
8. Song YB, Lee W, Lee CJ, Ji JH, Lee BD. Study of bony trabecular characteristics using bone morphometry and micro-CT. Korean J Oral Maxillofac Radiol 2007; 37 : 27-33.
9. Yoon YN, Lee W, Lee BD. Analysis on correlation between bone strength by FEA, micro-CT parameters and bone. Korean J Oral Maxillofac Radiol 2007; 37 : 53-9.
10. Ruegesser P, Koller B, Muller R. A microtomographic system for the nondestructive evaluation of bone architecture. Calif Tissue Int 1996; 58 : 24-9.
11. Muller R, Van Campenhout H, Van Damme B, Van Der Perre G, Denqueker J, Hildebrand T, et al. Morphometric analysis of human bone biopsies: a quantitative structural comparison of histological sections and micro-computed tomography. Bone 1998; 23 : 59-66.
12. Giesen EB, van Eijden TM. The three-dimensional cancellous bone architecture of the human mandibular condyle. J Dent Res 2000; 79 :

- 957-63.
13. Jacobs CR, Davis BR, Rieger CJ, Francis JJ, Saad M, Fyhrie DP. The impact of boundary conditions and mesh size on the accuracy of cancellous bone tissue modulus determination using large-scale finite-element modeling. *J Biomech* 1999; 32 : 1159-64.
  14. van Ruijven LJ, Giesen EB, Farella M, van Eijden TM. Prediction of mechanical properties of the cancellous bone of the mandibular condyle. *J Dent Res* 2003; 82 : 819-23.
  15. van Rietbergen B, Weinans H, Huiskes R, Odgaard A. A new method to determine trabecular bone elastic properties and loading using micromechanical finite-element models. *J Biomech* 1995; 28 : 69-81.
  16. Odgaard A, Kabel J, van Rietbergen B, Dalstra M, Huiskes R. Fabric and elastic principal directions of cancellous bone are closely related. *J Biomech* 1997; 30 : 487-95.
  17. van Rietbergen B, Odgaard A, Kabel J, Huiskes R. Relationships between bone morphology and bone elastic properties can be accurately quantified using high-resolution computer reconstructions. *J Orthop Res* 1998; 16 : 23-8.
  18. van Eijden TM, van Ruijven LJ, Giesen EB. Bone tissue stiffness in the mandibular condyle is dependent on the direction and density of the cancellous structure. *Calcif Tissue Int* 2004; 75 : 502-8.
  19. Teo JC, Si-Hoe KM, Keh JE, Teoh SH. Relationship between CT intensity, micro-architecture and mechanical properties of porcine vertebral cancellous bone. *Clin Biomech* 2006; 21 : 235-44.
  20. Hildebrand T, Ruegsegger P. Quantification of bone microarchitecture with the structure model index. *Comput Methods Biomech Biomed Engin* 1997; 1 : 15-23.
  21. Day JS, Ding M, Odgaard A, Sumner DR, Hvid I, Weinans H. Parallel plate model for trabecular bone exhibits volume fraction-dependent bias. *Bone* 2000; 27: 715-20.
  22. Whitehouse WJ. The quantitative morphology of anisotropic trabecular bone. *J Microsc* 1974; 101 : 153-68.
  23. Harrigan TP, Mann RW. Characterization of microstructural anisotropy in orthotropic materials using a second rank tensor. *J Mat Sci* 1984; 19 : 761-7.
  24. van Eijden TM, van der Helm PM, van Ruijven LJ, Mulder L. Structural and mechanical properties of mandibular condylar bone. *J Dent Res* 2006; 85 : 33-7.
  25. Ladd AJ, Kinney JH, Haupt DL, Goldstein SA. Finite-element modeling of trabecular bone: comparison with mechanical testing and determination of tissue modulus. *J Orthop Res* 1998; 16 : 622-8.
  26. Jacobs CR, Davis BR, Rieger CJ, Francis JJ, Saad M, Fyhrie DP. The impact of boundary conditions and mesh size on the accuracy of cancellous bone tissue modulus determination using large-scale finite-element modeling. *J Biomech* 1999; 32 : 1159-64.
  27. Follet H, Peyrin F, Vidal-Salle E, Bonnassie A, Rumelhart C, Meunier PJ. Intrinsic mechanical properties of trabecular calcaneus determined by finite-element models using 3D synchrotron microtomography. *J Biomech* 2007; 40 : 2174-83.
  28. Chevalier Y, Pahr D, Allmer H, Charlebois M, Zysset P. Validation of a voxel-based FE method for prediction of the uniaxial apparent modulus of human trabecular bone using macroscopic mechanical tests and nanoindentation. *J Biomech* 2007; 40 : 3333-40.