

돼지 하악골의 micro-CT 영상에서 추출한 3차원 골미세구조와 골강도 사이의 상관관계

서울대학교 치과대학 구강악안면방사선학교실, 치학연구소 및 BK21

허경희 · 박무순 · 이원진 · 허민석 · 이삼선 · 최순철

Relationship between trabecular strength and three-dimensional architecture in the pig mandible using microcomputed tomography

Kyung-Hoe Huh, Moo-Soon Park, Won-Jin Yi, Min-Suk Heo, Sam-Sun Lee, Soon-Chul Choi

Department of Oral and Maxillofacial Radiology, Dental Research Institute, and BK21, College of Dentistry, Seoul National University

ABSTRACT

Purpose : To investigate the relationship between three-dimensional (3D) bone imaging parameters and trabecular strength in the mandible.

Materials and Methods : Bone specimens were obtained from the mandibles of five male pigs weighing around 110 kg each. Of those, 43 samples were selected for 3D analysis and measured by micro-computed tomography. The five morphometric parameters were trabecular thickness (Tb.Th), bone specific surface (BS/BV), percent bone volume (BV/TV), structure model index (SMI) and degree of anisotropy (DA). Through destructive mechanical testing, strength parameters were obtained.

Results : BV/TV, SMI, BS/BV, and Tb.Th showed significant correlations with strength parameters. DA did not show any correlation with the other parameters. In multiple linear regression analysis, BV/TV alone explained 43% of the variance in Young's modulus. By stepwise inclusion of SMI, the variance in the Young's modulus was better explained up to 52%.

Conclusions : Predicting trabecular strength in the mandible through architectural analysis would be possible. Further study is needed to establish the tendency and variety of trabecular architecture and strength according to the locations within the mandible. (*Korean J Oral Maxillofac Radiol* 2005; 35 : 167-73)

KEY WORDS : Architecture; Compressive Strength; Mandible; Tomography Scanners, X-Ray Computed

서론

골질 (bone quality)의 평가는 골다공증을 비롯한 골질의 변화를 야기하는 전신질환의 진단과 치료 및 예후 평가에 있어 매우 중요하다. 많은 연구들에서 골질에 대한 객관적인 지표로 기계적 강도 (mechanical strength)를 이용하고 있으며, 골밀도 (bone mass)뿐만 아니라, 해면질골의 미세구조 (trabecular microarchitecture)도 골의 기계적 강도를 결정하는데 중요한 기여를 한다고 보고되고 있다.¹⁻⁴

해면질골의 형태계측학적 미세구조 평가는 처음에 조직 시편을 이용하여 골소주 폭경 (trabecular width)과 공간 (spacing)을 직접 계측함으로써 이루어졌다.^{5,6} 이후, Parfitt 등에 의해 parallel plate model에 기초한 방법으로 골소주 수 (trabecular number)와 공간을 계산해내는 방법이 소개되었으며,⁷ 이어서 여러 가지 조직형태계측학적 지표들 (histomorphometric parameters)과 컴퓨터를 이용한 자동화된 계측 방법이 개발되었고,⁸⁻¹⁰ 조직 시편이 아닌 일반 방사선사진에 적용되기에 이르렀다.^{11,12} 하지만, 이러한 방법들은 모두 복잡한 구조를 가지고 있는 3차원 구조물에 대한 간접적인 2차원 정보만을 제공하는 것이라 할 수 있다. 최근, 미세전산화단층촬영법 (micro-CT)과 고해상도 자기공명영상 (high-resolution MRI)을 비롯한 비침습적인 촬영 기술의

접수일 : 2005년 6월 28일; 심사일 : 2005년 6월 29일; 채택일 : 2005년 7월 21일
Correspondence to : Prof. Soon-Chul Choi
Department of Oral and Maxillofacial Radiology College of Dentistry, Seoul National University 28, Yeongeong-dong, Jongno-gu, Seoul, 110-749, KOREA
Tel) 82-2-2672-3498, Fax) 82-2-744-3919, E-mail) raychoi@snu.ac.kr

진보로 말미암아 골의 3차원 미세구조를 직접적으로 평가하는 것이 가능하게 되었다.¹³⁻¹⁶

이후 골의 기계적 강도와 형태계측학적 3차원 미세구조에 대해 많은 연구들이 진행되어 왔지만, 거의 대부분이 척추(spine), 장골(ilium), 대퇴골(femur), 요골(radius), 경골(tibia), 종골(calcaneus)을 대상으로 하였으며, 최근 하악골의 과두(mandibular condyle)를 대상하는 연구가 몇몇 소개되었으나,^{17,18} 하악체(mandibular body)를 대상으로 한 연구는 매우 드물다.^{19,20}

따라서, 본 연구에서는 돼지 하악골을 대상으로 micro-CT에서 추출한 3차원 골미세구조를 분석하여, 골강도와 연관이 있다고 보고된 기존의 여러 미세구조 영상지표들이 하악골에서는 어떠한 상관관계를 나타내는지 알아보고, 하악골의 기계적 강도 예측시 골미세구조 분석치들 각각의 상대적인 기여도를 평가해 보고자 한다.

재료 및 방법

1. 골시편의 준비

동일 연령대(25-30주)의 무게가 110 kg 정도인 건강한 수돼지 다섯 마리로부터 하악골을 얻었으며, 이 연구계획서는 동물 사용에 관한 윤리 위원회의 심의를 거쳤다.

Micro-cutting and grinding system인 300 CP precision parallel-control EXAKT (Apparatebau GmbH, Norderstedt, Germany)를 이용하여, 계속적으로 관주수를 공급하면서 하악골을 골소주의 주행방향에 대략 수직으로 5 mm 두께로 잘라 연속적인 골판(bone plate)들을 얻었다(Fig. 1A). 그 골판들을 다시 수평으로 절단하여 다양한 넓이의 해면골을 포함하는 많은 골시편들을 얻었으며, 그 중에서 치근, 치배, 혹은 골결손부가 있거나 해면골의 폭이 5 mm 이하인 시편들은 제외하였다. 하악골 내의 다양한 위치에서 선택된 총 43개의 골시편이 준비되었다. 이것들은 즉시 10% 인산 완충 포르말린 용액에 고정되었다.

2. 3차원 영상의 획득

골시편의 절단면 상에서 3차원 골미세구조 분석과 골강도 측정을 하고자 하는 적절한 해면골 부위를 선정하여 지름 4 mm의 원을 연필로 그린 후(Fig. 1B), 그곳에 arylc tap을 부착하여 micro-CT (Skyscan-1072, SKYSCAN, Antwerpen, Belgium) 촬영을 시행하였다. 촬영 중에 골시편들은 포르말린 용액에 의해 습한 상태로 유지되었으며, 촬영 조건은 다음과 같다. 관전압은 80 kVp, 관전류는 100 μ A, 1 mm 알루미늄 여과(filteration)를 이용했고, 촬영시간은 3400 ms이었으며, 23.75의 확대율로 화소 크기(pixel size)는 11.51 μ m였다. 절단면에 부착된 acrylic tap을 이용하여 관심용적(volume of interest, VOI)을 설정하였으며, 그 크기는 $3 \times 3 \times 5$ mm³였다. 개개의 영상에서 골소주(trabeculae)와 골수강(marrow space)을 분리하기 위해 역치값(threshold value)을 150으로 고정하였으며, 그 micro-CT data를 이용하여 3차원 영상을 재구성하였다.

3. 3차원 영상의 분석

SkyscanTM CT-analyzer software를 사용하여 미세구조 영상지표들이 분석되었다. 측정된 영상지표들은 percent bone volume (BV/TV), bone specific surface (BS/BV), trabecular thickness (Tb.Th), structure model index (SMI), 그리고 degree of anisotropy (DA) 이렇게 다섯 가지였다.

BV/TV는 관심용적 내 전체 voxel 중에서 binarized solid subjects가 차지하는 비율로 계산되었는데 이는 관심용적 내에 존재하는 골소주의 양을 의미하며, 이번 연구에서 골 밀도를 나타내는 값으로 이용되었다. BS/BV는 관심용적 내의 binarized solid volume에 대한 binarized solid surface의 비(ratio)로 정의되었으며, 이것은 구조의 복잡성(complexity)을 특징짓는 유용한 기본적 영상지표이다. Tb.Th는 parallel plate model에 근거한 간접 계산법이 아닌 골소주(trabeculae) 내에 수 많은 구(sphere)를 위치시켜 그 평균 직경을 이용하는 직접적인 방법으로 구해졌다.²¹ SMI는 골

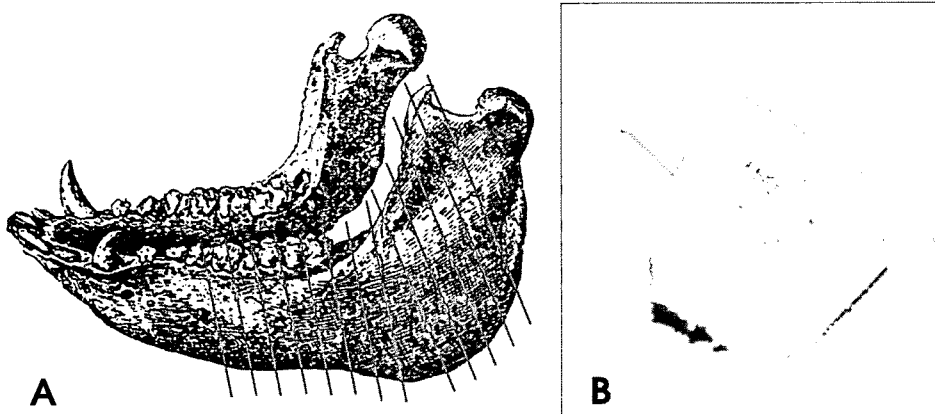


Fig. 1. A. Illustration of a pig mandible and sectioning planes. B. Example of a 5 mm thick bone specimen. A manually drawn circle is shown in the trabecular area on the cutting surface.

소주의 형태가 막대 모양 (rods-like) 혹은 판 모양 (plate-like) 중에 어느 형태가 더 우세한지를 알려주는 지표로서, 표면만곡 (surface convexity)의 측정과 함께 골소주의 triangulated surface를 감별 분석함으로써 측정되었다.²² 이상적인 plate, cylinder, 그리고 sphere는 각각 0, 3, 4의 SMI 값을 가지게 된다. 등방성 (isotropy)은 특정 방향의 축을 따른 구조의 배열이 있는지 없는지, 즉 3차원에서의 대칭성에 대한 측정값이라 할 수 있는데, DA (degree of anisotropy)는 mean intercept-length ellipsoid에서의 최대 반경과 최소 반경의 비 (ratio)로 측정되었다.²³ 이 DA와 골소주의 general stereology parameter들이 BV/TV를 제외하고는 기계적 강도를 결정하는 가장 중요한 요소라고 보고되고 있다.²⁴

4. 기계적 강도 측정

골시편의 기계적 강도를 측정하기 위하여 materials testing machine (Instron 4456, Instron Corp., Canton, USA)을 이용하여 punch shear strength 분석을 시행하였다. 직경이 2 mm인 loading punch를 골시편의 절단면에 그려진, 판심용적의 직상방에 해당하는 원의 중앙에 수직으로 1 mm/min

의 일정한 속도로 하중을 가하였으며 (Fig. 2A), 이 과정에서 응력-변형곡선 (load-deformation curve)을 얻었다. 응력-변형곡선으로부터 세 가지 골강도 지표들 (strength parameters), 즉 골시편의 최대강도 (maximum stress), 항복강도 (yield stress), Young's modulus을 얻었다 (Fig. 2B).

5. 통계 분석

선형상관분석 (linear correlation analysis)을 통해 골시편의 3차원 골미세구조와 기계적 강도 사이의 관계를 조사하였으며, 정규성 (normality)과 선형성 (linearity)을 향상시키기 위해 필요한 경우 측정치들의 로그 변환 (log transformation)도 고려하였다. 또한 3차원 골미세구조들 서로간의 상관관계도 조사하였다.

그리고, 각 3차원 골미세구조 영상지표들의 개별적인 골강도 기여도를 평가하기 위해 이들을 독립변수 (independent or predictor variable)로 하고 골강도 지표를 종속변수 (outcome or dependent variable)로 하는 다중선형회귀분석 (multiple linear regression analysis)을 시행하였다.

모든 통계 분석에는 SPSS for Windows (version 12.0,

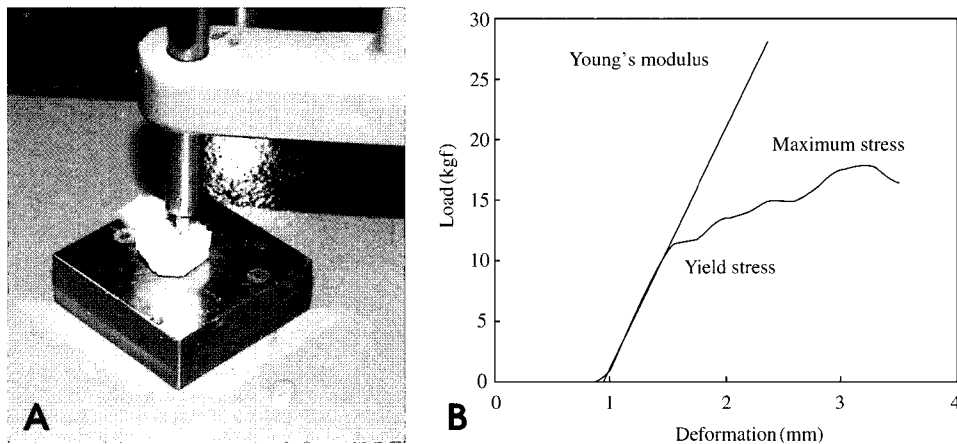


Fig. 2. Through punch shear strength analysis (A), load-deformation data were obtained. From the load-deformation curve (B), three parameters were measured: maximum stress, yield stress and Young's modulus.

Table 1. Pearson correlation coefficients between strength and 3-dimensional parameters

	Strength parameters			Three-dimensional parameters					
	MS	YS	YM	Tb.Th	BS/BV	BV/TV	SMI	DA	
Strength parameters	MS	1	.851**	.777**	.255	1	.851**	.777**	-.607
	YS		1	.896**	.387*	-.416**	.647**	-.523**	-.256
	YM			1	.349*	-.442**	.667**	-.641**	-.270
Three dimensional parameters	Tb.Th			1	-.846**	.707**	-.273	-.277	
	BS/BV				1	-.835**	.419**	.195	
	BV/TV					1	-.581**	-.124	
	SMI						1	.125	
	DA							1	

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

* : Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed). MS: maximum stress, YS: yield stress, YM: Young's modulus, Tb.Th: trabecular thickness, BS/BV: bone specific surface, BV/TV: percent bone volume, SMI: structure model index, DA: degree of anisotropy. The parameters were not log-transformed because they did not showed better normality and linearity after log-transformation.

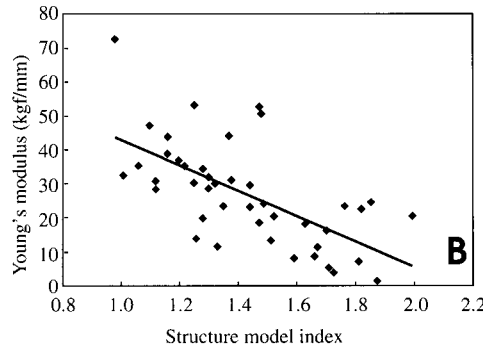
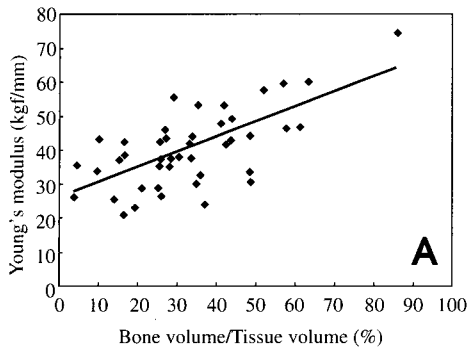


Fig. 3. Relationship between bone strength and 3D bone parameters from μ CT for the 43 bone specimens. Plot of Young's modulus versus percent bone volume (A) and structure model index (B) shows a linear relationship, $r = 0.667$, and $r = -0.641$ respectively ($p < 0.01$).

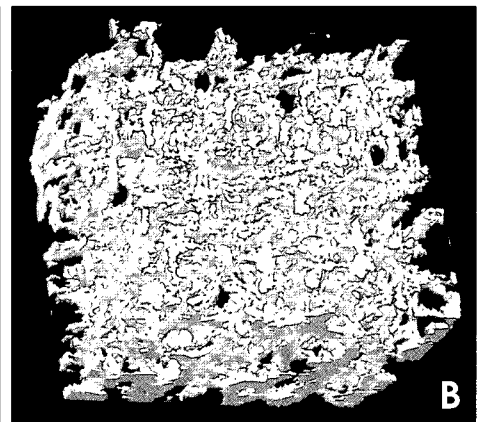
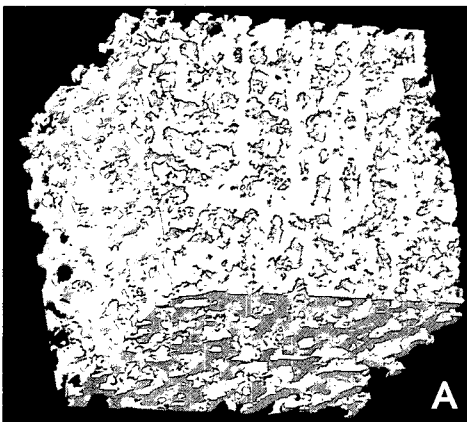


Fig. 4. Examples of 3D reconstructions of μ CT data from bone specimens with high (A) and low (B) trabecular strength. Note that specimen A shows a more plate-like structure (SMI = 1.01) with a higher percent bone volume (BV/TV = 48.4%), and specimen B shows a more rod-like structure (SMI = 1.53) with a lower percent bone volume (BV/TV = 25.1%)

SPSS Inc., Chicago, USA)가 사용되었다.

결 과

골강도와 미세구조 지표들 사이의 상관분석의 결과는 Table 1과 같다.

선형상관분석에서 Young's modulus와 항복강도는 BV/TV, SMI, BS/BV, Tb.Th와, 그리고 최대강도는 BV/TV, SMI와 각각 통계적으로 유의한 상관관계를 보였다. 세 가지 골강도 측정치들 중에서는 Young's modulus가 3차원 골미세구조 지표들과 대체적으로 가장 높은 상관관계를 보였다.

3차원 골미세구조 지표들 중에서는 DA가 유일하게 골강도와 유의한 상관관계를 보이지 않았으며, DA를 제외한 BV/TV, SMI, BS/BV, Tb.Th가 모두 골강도와 유의한 상관관계를 나타내었다. 특히 Young's modulus, 항복강도, 최대강도의 모든 골강도 측정치들은 BV/TV와 가장 뚜렷한 선형상관관계를 나타내었으며 (Fig. 3A), 그 각각의 상관계수 (Pearson correlation coefficient)는 0.667, 0.647, 0.494이었다. 모든 골강도 측정치들은 SMI와도 뚜렷한 선형상관관계를 보였으며 (Fig. 3B), 그 각각의 상관계수는 -0.641 , -0.523 , -0.460 이었다.

강도가 높은 골 시편과 낮은 골 시편에서 각각 얻어진

Table 2. Enter-method multiple linear regression analysis

Model	Predictors	Standardized coefficients	t	Sig.
		Beta		
	(constant)		2.037	.027
	Tb.Th	-.085	-.423	.675
$R^2 = .611$	BS/BV	.304	1.230	.226
adjusted	BV/TV	.770	3.614	.001
$R^2 = .558$	SMI	-.316	-2.412	.021
	DA	-.219	-2.017	.051

Outcome variable: Young's modulus, Tb.Th: trabecular thickness, BS/BV: bone specific surface, BV/TV: percent bone volume, SMI: structure model index, DA: degree of anisotropy.

R^2 : coefficient of determination. The adjusted R^2 , 0.558 indicates that about 56% of the variability of Young's modulus is accounted for by the model. To compare the relative strength of the various predictors, the Beta coefficients are shown. BV/TV has the largest Beta coefficient, 0.770, indicating a one standard deviation increase in BV/TV leads to a 0.770 standard deviation increase in predicted Young's modulus, with the other variables held constant.

미세전산화단층촬영 데이터를 이용한 3차원 재구성 영상의 대표적인 예를 Fig. 4에서 보여주고 있는데, 일반적으로 골강도가 높은 시편에서 BV/TV와 Tb.Th는 더 높고 SMI와 BS/BV는 더 낮은 측정치를 보였다.

3차원 골미세구조 지표들 서로간의 상관관계분석에서는 BV/TV, BS/BV, Tb.Th 사이의 상관관계가 서로 매우 강하

Table 3. Stepwise-method multiple linear regression analysis

Model	Predictors	Adjusted R ²
1	BV/TV	.431
2	BV/TV, SMI	.518

Outcome variable : Young's modulus

BV/TV: percent bone volume, SMI: structure model index

R²: coefficient of determination

This stepwise-method multiple linear regression analysis shows that BV/TV had the strongest predictability of the strength, and better prediction could be obtained by the combination of SMI. But the other parameters were removed from the models by stepping method criteria, probability-of-F-to-enter $\leq .050$, probability-of-F-to-remove $\geq .100$

게 나타났으며 ($r > 0.7$), SMI는 BV/TV, BS/BV와 중등도의 상관관계를 나타낸 반면, 유일하게 DA는 다른 지표들과 아무런 유의성 있는 상관관계를 보이지 않았다.

Young's modulus를 종속변수로, 3차원 골미세구조를 독립변수로 하는 enter-method 다중선형회귀분석에서, 종속변수의 전체 변동 중에서 회귀모형에 의해 설명된 변동의 정도를 나타내는 값인 결정계수(R-square)는 0.61이었으며, 독립변수의 수를 고려한 수정 결정계수(adjusted R-square)는 0.56이었다(Table 2). 각 3차원 골미세구조의 상대적인 골강도 기여도를 나타내는 beta coefficients는 BV/TV가 가장 높았으며, 그 다음이 SMI였다. 그리고, stepwise-method 다중선형회귀분석에서도 역시 BV/TV가 가장 높은 기여도를 나타낼 수 있었는데, BV/TV 하나만으로도 0.43의 결정계수를 나타내었으며, SMI의 포함에 의해 회귀모형의 결정계수는 0.52로 높아질 수 있었다(Table 3).

고 찰

돼지 하악골을 대상으로 한 이번 연구에서, 골소주 부피의 양이 클수록 골강도는 높아졌으며, 해면골의 미세구조 측면에서는 골소주의 두께가 두꺼울수록, 골소주의 복잡도(complexity)가 낮을수록, 그리고 골소주의 모양이 막대 모양보다 판 모양이 우세할수록 골강도는 높아지는 경향을 보였다. 그리고, 모든 기계적 강도 측정치들은 BV/TV과 가장 뚜렷한 선형상관관계를 보였으며 다중선형회귀분석에서도 BV/TV의 결정력이 가장 높았는데, 이는 다른 부위의 골을 대상으로 한 이전 연구들의 결과들과 일치하는 것으로서, 골강도를 예측하는 데 있어 골밀도의 결정력이 가장 크다는 것을 의미한다. 또한, 다중선형회귀분석에서 골밀도 뿐만 아니라 골미세구조를 함께 고려할 때 골강도 변동의 설명력이 더욱 높아질 수 있었는데, 이로써 골소주의 미세구조도 골의 기계적 강도에 일정 부분 기여함을 확인할 수 있었다.

이번 연구에서 골소주 방향성의 정도를 나타내는 DA는 골강도와 아무런 유의한 상관관계를 나타내지 않았는데, 이는 기존의 연구들과는 다른 결과였다.^{18,24,25} 일반적으로

골소주가 등방성에 가까울 때는 그 골소주에 가해지는 힘을 주위로 골고루 분산시킬 수 있으므로 더욱 강한 힘에 저항할 수 있는 반면, 골소주의 방향이 어느 한 방향을 향해 배열되어 있는 경향이 클수록, 즉 비등방성(anisotropy)이 클수록 골강도는 감소하는 것으로 보고되고 있다. 그러나, 이번 연구에서는 골시편을 하악골의 골소주 방향에 수직되게 절단한 후, 골소주의 배열 방향과 하중 적용 방향이 대략 일치되도록 하중을 적용하였기 때문에, 골소주의 비등방성 정도가 기계적 강도 측정치에 그다지 영향을 미치지 못한 것으로 생각된다. 골소주의 비등방성 그 자체 보다는 골소주의 배열 방향과 하중 적용 방향 사이의 편위(deviation) 정도가 골강도에 더 큰 영향을 미쳤을 것으로 생각되는데,¹⁸ 앞으로 하악체를 대상으로 하여 이에 관한 추가적인 연구가 요구된다.

다른 미세구조 지표들이 서로 간에 밀접한 상관관계를 나타낸 것과는 달리 DA는 다른 미세구조 지표들과 통계학적으로 유의한 상관관계를 나타내지 않았다. 이것은 DA가 다른 지표들과는 크게 연관 없는 독립적인 계측치라는 것을 의미하며, DA가 다른 계측치와는 달리 mean intercept length라는 다소 독특한 방법을 이용하여 구해지는 데에서 기인하는 것으로 생각된다.^{23,24} 만약, 두 다른 미세구조 지표들이 서로 상관관계를 보이지 않는다면, 그것은 그들이 서로에 대해 독립적이라는 의미이고, 골강도 예측에 있어서도 서로 독자적인 기여도를 나타낼 것이다. 그러므로, 골강도를 예측할 때 독립적인 지표를 찾아내는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다.¹⁸ 이 사실은 Tb.Th와 BS/BV이 비록 골강도와 통계학적으로 유의한 상관관계를 보였음에도 불구하고, 이들과 BV/TV이 매우 강한 상관관계를 나타내어 ($r > 0.7$), 즉 이들의 설명력이 BV/TV의 설명력과 서로 중복되므로, stepwise 다중선형회귀분석에서 Tb.Th와 BS/BV이 제외되었음을 통해 간접적으로 확인할 수 있었다. 이러한 점에서, 앞으로의 다른 연구에서 만약 DA가 골강도와 직접적인 상관관계를 가진다면, 그것이 골강도 예측에 매우 강한 독자적인 기여도를 나타낼 것으로 기대할 수 있다.

3차원 골미세구조를 다룬 이전의 연구들에서, voxel 크기 혹은 해상도가 미세구조 측정의 정확도에 미치는 영향에 대해 보고된 바 있다.²⁶⁻²⁸ 즉, voxel 크기가 크고 해상도가 낮아질수록 미세한 골소주가 소실되거나 융합(merging)되면서 그 계측 정확도가 감소될 수 있다. 그러나, 이번 연구의 micro-CT 영상에서 적용된 해상도는 측정의 정확도와 해상도의 영향을 다룬 이전 연구들에서 reference standard로 사용된 해상도보다 더 높았으며, 따라서 이번 연구에 사용된 11.51 μm 의 해상도는 돼지 하악골의 골미세구조를 정확하게 재구성하는 데에 적절하다고 생각한다.

하지만, 이번 연구의 한계점으로 몇 가지 고려되어야 할 것들이 있다. 첫째로, 이 연구에서 사용된 돼지 하악골은

연령대가 좁은 범위의 건강한 돼지만을 대상으로 하여 얻어졌고, 이것은 아마도 골시편들 사이에서 기계적 강도와 미세구조의 차이가 상대적으로 다양하지 못하고 좁은 범위의 측정치로 나타났을 가능성이 있다. 그럼에도 불구하고, 하악골 내의 다양한 해부학적 위치의 차이에 기반한 것으로 생각되는 구조적 다양성이 나타났으며,^{29,30} 따라서 이 연구에서는 하악골 내부의 다양한 위치에 따른 골강도와 구조의 차이를 이용했다고 할 수 있다. 둘째로, micro-CT에서 골수강과 골소주를 분리하기 위해 역치값을 설정할 때 아르키메데스 원리(Archimedes principle)를 이용하는 방법이 가장 정확한 것으로 보고되고 있으나,³¹ 이번 연구에서는 보다 간편하게 예비실험을 통해 경험적으로 얻어진 역치값을 이용했다. micro-CT에서 중요한 문제 중의 하나가 이 역치값을 올바르게 설정하는 것이라 할 수 있는데, 어떤 역치값을 선택하느냐에 따라 골소주의 양이 줄어들 수도 있고 늘어날 수도 있어서 특히 BV/TV의 측정치에 큰 영향을 미칠 수 있다.^{32,34} 하지만, Hara 등은 이러한 역치값의 변화에 따른 DA 값의 변화는 무시할 만하고, Tb.Th와 BS/BV도 역치값의 변화에 그다지 민감하지 않다고 보고하였다.³²

이러한 요소들은 이번 연구에서 골의 기계적 강도와 여러 미세구조 지표들 사이의 상관관계가 이전의 연구들과 비교해 상대적으로 낮게 나타난 것에 대한 설명이 될 수 있을 것이다. 하지만, 다른 부위의 골과는 다른 하악이라는 골의 특수성을 고려하지 않을 수 없다. 하악골은 다른 부위와 달리 구내 환경과의 밀접한 관련으로 인해 염증이 매우 민감할 수 있고, 따라서 하악골 내부의 위치에 따른 구조적 다양성이 언제라도 일정치 않게 변화할 수 있는 것이다. 하악골 내부에서의 해부학적 위치에 따른 골강도와 미세구조의 차이에 관해서는 추가적인 연구가 필요하다.

해면골의 기계적 성질을 연구하는데 있어 압축시험(compression test)은 표준적인 방법이라 할 수 있으며, 압축 강도(compressive strength)를 이용한 많은 연구들이 보고되고 있다.^{2,3,17-19} 그럼에도 불구하고, 기계적 강도 계측치들은 그 압축시험에 내재된 오차에 의해 쉽게 영향을 받을 수 있다. 또한, 하중 적용 방향에 따라 기계적 강도가 달라질 수 있으며, 따라서 골 시편의 비등방성 탄성(anisotropic elastic properties)을 완전하게 고려한다는 것은 거의 불가능하다.²⁴ 최근 기하학적 구조와 재료의 성질을 함께 고려하는 유한요소분석(finite element analysis)의 도입으로 실험상의 오류들을 배제할 수 있게 되었다.^{35,36} 따라서, 3차원 재구성 데이터를 이용하는 연구에서 유한요소분석은 앞으로 하악골에서의 기계적 강도와 미세구조 사이의 관계를 더욱 정확하게 규명해 줄 수 있을 것이다.

결론적으로, 돼지 하악골에서 골미세구조를 이용하여 골강도를 예측하는 것이 가능할 것으로 생각되며, 전치부, 구

치부, 하악지 등 하악골 내부의 여러 부위에 따른 골강도와 미세구조의 경향성에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. Dalle CL, Giannini S. Bone microarchitecture as an important determinant of bone strength. *J Endocrinol Invest* 2004; 27 : 99-105.
2. Thomsen JS, Ebbesen EN, Mosekilde L. Relationships between static histomorphometry and bone strength measurements in human iliac crest bone biopsies. *Bone* 1998; 22 : 153-63.
3. Borah B, Dufresne TE, Chmielewski PA, Gross GJ, Prenger MC, Phipps RJ. Risedronate preserves trabecular architecture and increases bone strength in vertebra of ovariectomized minipigs as measured by three-dimensional microcomputed tomography. *J Bone Miner Res* 2002; 17 : 1139-47.
4. Pattijn V, Van Cleynenbreugel T, Vander SJ, Van Audekercke R, Van der Perre G, Wevers M. Structural and radiological parameters for the nondestructive characterization of trabecular bone. *Ann Biomed Eng* 2001; 29 : 1064-73.
5. Wakamatsu E, Sissons HA. The cancellous bone of the iliac crest. *Calcif Tissue Res* 1969; 4 : 147-61.
6. Weinstein RS, Hutson MS. Decreased trabecular width and increased trabecular spacing contribute to bone loss with aging. *Bone* 1987; 8 : 137-42.
7. Parfitt AM, Mathews CH, Villanueva AR, Kleerekoper M, Frame B, Rao DS. Relationships between surface, volume, and thickness of iliac trabecular bone in aging and in osteoporosis. Implications for the microanatomic and cellular mechanisms of bone loss. *J Clin Invest* 1983; 72 : 1396-409.
8. Garrahan NJ, Mellish RW, Compston JE. A new method for the two-dimensional analysis of bone structure in human iliac crest biopsies. *J Microsc* 1986; 142 : 341-9.
9. Vesterby A, Gundersen HJ, Melsen F. Star volume of marrow space and trabeculae of the first lumbar vertebra: sampling efficiency and biological variation. *Bone* 1989; 10 : 7-13.
10. Hahn M, Vogel M, Pompesius-Kempa M, Delling G. Trabecular bone pattern factor-a new parameter for simple quantification of bone microarchitecture. *Bone* 1992; 13 : 327-30.
11. Kumasaka S, Kashima I. Initial investigation of mathematical morphology for the digital extraction of the skeletal characteristics of trabecular bone. *Dentomaxillofac Radiol* 1997; 26 : 161-8.
12. 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.
13. Rueggsegger P, Koller B, Muller R. A microtomographic system for the nondestructive evaluation of bone architecture. *Calcif Tissue Int* 1996; 58 : 24-9.
14. Barou O, Valentin D, Vico L, Tirode C, Barbier A, Alexandre C, et al. High-resolution three-dimensional micro-computed tomography detects bone loss and changes in trabecular architecture early: comparison with DEXA and bone histomorphometry in a rat model of disuse osteoporosis. *Invest Radiol* 2002; 37 : 40-6.
15. Stampa B, Kuhn B, Liess C, Heller M, Gluer CC. Characterization of the integrity of three-dimensional trabecular bone microstructure by connectivity and shape analysis using high-resolution magnetic

- resonance imaging in vivo. *Top Magn Reson Imaging* 2002; 13 : 357-63.
16. Majumdar S. A review of magnetic resonance (MR) imaging of trabecular bone micro-architecture: contribution to the prediction of biomechanical properties and fracture prevalence. *Technol Health Care* 1998; 6 : 321-7.
 17. Teng S, Herring SW. Anatomic and directional variation in the mechanical properties of the mandibular condyle in pigs. *J Dent Res* 1996; 75 : 1842-50.
 18. Giesen EB, Ding M, Dalstra M, van Eijden TM. Architectural measures of the cancellous bone of the mandibular condyle identified by principal components analysis. *Calcif Tissue Int* 2003; 73 : 225-31.
 19. Misch CE, Qu Z, Bidez MW. Mechanical properties of trabecular bone in the human mandible: implications for dental implant treatment planning and surgical placement. *J Oral Maxillofac Surg* 1999; 57 : 700-6.
 20. Choel L, Last D, Duboeuf F, Seurin MJ, Lissac M, Briguet A, et al. Trabecular alveolar bone microarchitecture in the human mandible using high resolution magnetic resonance imaging. *Dentomaxillofac Radiol* 2004; 33 : 177-82.
 21. Fajardo RJ, Muller R. Three-dimensional analysis of nonhuman primate trabecular architecture using micro-computed tomography. *Am J Phys Anthropol* 2001; 115 : 327-36.
 22. Hildebrand T, Ruegsegger P. Quantification of bone microarchitecture with the structure model index. *Comput Methods Biomech Biomed Engin* 1997; 1 : 15-23.
 23. 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; 27 : 375-89.
 24. Odgaard A. Three-dimensional methods for quantification of cancellous bone architecture. *Bone* 1997; 20 : 315-28.
 25. Sugita H, Oka M, Toguchida J, Nakamura T, Ueo T, Hayami T. Anisotropy of osteoporotic cancellous bone. *Bone* 1999; 24 : 513-6.
 26. Muller R, Koller B, Hildebrand T, Laib A, Gianolini S, Ruegsegger P. Resolution dependency of microstructural properties of cancellous bone based on three-dimensional mu-tomography. *Technol Health Care* 1996; 4 : 113-9.
 27. Kothari M, Keaveny TM, Lin JC, Newitt DC, Genant HK, Majumdar S. Impact of spatial resolution on the prediction of trabecular architecture parameters. *Bone* 1998; 22 : 437-43.
 28. Kim DG, Christopherson GT, Dong XN, Fyhrie DP, Yeni YN. The effect of microcomputed tomography scanning and reconstruction voxel size on the accuracy of stereological measurements in human cancellous bone. *Bone* 2004; 35 : 1375-82.
 29. Misch CE, Qu Z, Bidez MW. Mechanical properties of trabecular bone in the human mandible: implications for dental implant treatment planning and surgical placement. *J Oral Maxillofac Surg* 1999; 57 : 700-6.
 30. Choel L, Last D, Duboeuf F, Seurin MJ, Lissac M, Briguet A, et al. Trabecular alveolar bone microarchitecture in the human mandible using high resolution magnetic resonance imaging. *Dentomaxillofac Radiol* 2004; 33 : 177-82.
 31. Ding M, Odgaard A, Hvid I. Accuracy of cancellous bone volume fraction measured by micro-CT scanning. *J Biomech* 1999; 32 : 323-6.
 32. Hara T, Tanck E, Homminga J, Huiskes R. The influence of micro-computed tomography threshold variations on the assessment of structural and mechanical trabecular bone properties. *Bone* 2002; 31 : 107-9.
 33. Ito M, Nakamura T, Matsumoto T, Tsurusaki K, Hayashi K. Analysis of trabecular microarchitecture of human iliac bone using micro-computed tomography in patients with hip arthrosis with or without vertebral fracture. *Bone* 1998; 23 : 163-9.
 34. Ruegsegger P, Koller B, Muller R. A microtomographic system for the nondestructive evaluation of bone architecture. *Calcif Tissue Int* 1996; 58 : 24-9.
 35. 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.
 36. Van Rietbergen B, Odgaard A, Kabel J, Huiskes R. Direct mechanics assessment of elastic symmetries and properties of trabecular bone architecture. *J Biomech* 1996; 29 : 1653-7.