

디지털방사선영상에서 추출한 해면질골의 강도와 미세구조의 형태계측학적 분석에 대한 연구

서울대학교 치과대학 구강악안면방사선학교실 및 치학연구소

*서울대학교 치과대학 구강악안면방사선학교실, 치학연구소 및 BK21

**한림대학교 정보통신학과

한승윤 · 이선복 · 오성욱 · 허민석 · 이삼선* · 최순철* · 박태원 · 김종대**

A study of trabecular bone strength and morphometric analysis of bone microstructure from digital radiographic image

Seung-Yun Han, Sun-Bok Lee, Sung-Ook Oh, Min-Suk Heo, Sam-Sun Lee*,
Soon-Chul Choi*, Tae-Won Park, Jong-Dae Kim**

Dept. of Oral and Maxillofacial Radiology and Dental Research Institute, College of Dentistry, Seoul National University

**Dept. of Oral and Maxillofacial Radiology, Dental Research Institute, and BK21, College of Dentistry, Seoul National University*

***Division of Information and Communication Engineering, Hallym University*

ABSTRACT

Purpose : To evaluate the relationship between morphometric analysis of bone microstructure from digital radiographic image and trabecular bone strength.

Materials and Methods : One hundred eleven bone specimens with 5 mm thickness were obtained from the mandibles of 5 pigs. Digital images of specimens were taken using a direct digital intraoral radiographic system. After selection of ROI (100×100 pixel) within the trabecular bone, mean gray level and standard deviation were obtained. Fractal dimension and the variants of morphometric analysis (trabecular area, periphery, length of skeletonized trabeculae, number of terminal point, number of branch point) were obtained from ROI. Punch shear strength analysis was performed using Instron (model 4465, Instron Corp., USA). The loading force (loading speed 1 mm/min) was applied to ROI of bone specimen by a 2 mm diameter punch. Stress-deformation curve was obtained from the punch shear strength analysis and maximum stress, yield stress, Young's modulus were measured.

Results : Maximum stress had a negative linear correlation with mean gray level and fractal dimension significantly ($p < 0.05$). Yield stress had a negative linear correlation with mean gray level, periphery, fractal dimension and the length of skeletonized trabeculae significantly ($p < 0.05$). Young's modulus had a negative linear correlation with mean gray level and fractal dimension significantly ($p < 0.05$).

Conclusions : The strength of cancellous bone exhibited a significantly linear relationship between mean gray level, fractal dimension and morphometric analysis. The methods described above can be easily used to evaluate bone quality clinically. (*Korean J Oral Maxillofac Radiol* 2003; 33 : 113-9)

KEY WORDS : bone; radiography, dental, digital; signal processing, computer-assisted

This study was supported by a grant of the Korea Health 21 R&D Project, Ministry of Health & Welfare, Republic of Korea.(01-PJ5-PG1-01CH12-0002)

접수일 : 2002년 12월 23일; 심사일 : 2002년 12월 26일; 채택일 : 2003년 3월 12일

Correspondence to: Prof. Soon-Chul Choi

Department of Oral and Maxillofacial Radiology, College of Dentistry, Seoul National University, 28 Yongon-Dong, Chongno-Gu, Seoul, 110-749, KOREA

Tel) 82-2-760-3498, Fax) 82-2-744-3919

E-mail) raychoi@snu.ac.kr

서론

치과 영역에서 치료계획의 수립을 위하여 악골의 골질을 평가하는 것은 매우 중요하다. 특히 결손된 치아의 수복을 위해 악골에 인공치를 식립하는 경우가 점점 더 많아지고 있는데, 인공치 식립 전에 식립부위의 골질에 대한

정확한 평가는 인공치의 종류와 식립 술식을 결정하는 때
우 중요한 자료이며 결국 인공치의 예후를 향상시킬 수
있다. 또한 악골의 성질을 파악하는 것은 성인에게 가장
흔한 전신질환 중 하나인 골다공증을 비롯한 골질의 변화
를 초래하는 전신질환의 진단에도 도움이 될 수 있다.^{1,3}

그러나 골을 직접 채취하여 조사하기 전에는 골질을 예
측하는 것이 매우 어렵고 제한적이므로 간접적으로 골의
성질을 평가할 수 있는 방법들이 많이 강구되어 왔다. 골
다공증에 대한 많은 연구에서 골다공증에서 골량이 감소
한다는 것에 주목하였고, 특히 임상적으로 중요한 골다공
증 환자의 골절 위험도를 평가하기 위하여 주로 DEXA
(Dual Energy X-ray Absorptiometry)나 QCT (Quantitative
Computed Tomography), 초음파 검사 등을 사용하여 골밀
도를 측정하고 이를 토대로 골의 기계적인 강도를 평가하
려는 시도가 많이 있었다.^{4,7} 특히 Lindh 등⁸은 무치악 하악
골에 대하여 QCT를 이용하여 비침습적으로 골밀도를 측
정한 후 인공치 식립전 골질평가법으로 유용하다고 하였
다. 그러나 이러한 방법들은 관련 장비가 고가이고 사용하
는데 번거로움이 있으며 환자에 대해 방사선 조사량이 많
다는 단점이 있다. 또한 Burr와 Martin⁹은 골밀도 측정만으
로는 임상적인 골의 기계적인 성질을 완전히 평가할 수
없다고 하였으며 Mosekilde 등¹⁰은 불화물을 복용시킨 돼
지 척추골에서 초기단계의 골량 증가가 골 강도의 증가를
반영하지는 않는다고 하여 골밀도를 이용한 골의 기계적
인 성질의 평가에 대한 한계를 보고하였다. 이와 관련하여
Mosekilde 등¹¹은 42명의 인간 척추골에 대한 연구에서 인
간 척추골의 연령변화에 따르는 압축강도의 변화가 골량
의 변화 뿐 아니라 trabecular lattice의 연속성의 변화에 따
른다고 하였으며 Heaney¹²는 골밀도 외에 골의 기계적 강
도에 영향을 미치는 요소가 있다고 하였다.

최근에는 디지털 영상 처리 기술의 발달에 힘입어 다양
한 영상 분석법이 고안되었는데 방사선영상을 이용한 골
미세구조의 형태계측학적 분석법^{2,13-16}과 프랙탈 분석법¹⁸⁻²¹
등이 그 예이다. 골조직의 미세구조가 골질에 미치는 영향
에 대한 관심이 높아져 방사선사진을 스캔한 디지털 방사
선영상에서 추출한 2차원적 골 미세구조를 형태계측학적
으로 분석하여 골다공증과의 관련여부를 조사하는 연구가
수행된 바 있다.^{2,14-16} 또한 Mandelbrot¹⁸에 의해 프랙탈 개
념이 소개된 이래 골 미세구조에 프랙탈 분석법을 적용하
여 골다공증과 관련된 골소주의 유형 및 변화의 분석에
관한 연구가 수행된 바 있다.^{19,20} 특히 Geraets와 Van der
Stelt²¹는 치과영역에서의 악골의 프랙탈 분석에 대하여 프
랙탈 차원값을 측정하는 다양한 방법을 정리하였고, 프랙
탈 차원값을 구하는 방법에 따라 프랙탈 값이 다양한 변
화를 보이거나 프랙탈 차원값이 골질 혹은 골의 병적인 변
화를 유의하게 반영한다고 하였다.

이와 같은 연구들은 대부분 병적 조건 하에서 형태계측

학적 분석법 혹은 프랙탈 분석법에 의해 분석한 수치들이
정상 조건 하에서와 차이가 있는가를 분석한 연구들로서
정상 조건하의 다양한 골 미세구조를 가지는 골절편에 대
하여 조절된 환경에서 골질을 물리적으로 측정하고 형태
계측학적 분석법 혹은 프랙탈 분석법의 수치와 직접 비교
를 시도한 연구는 없었다. 따라서 본 논문에서는 골절편의
디지털 구내방사선영상에서 골 미세구조를 추출하여 형태
계측학적으로 분석하고 프랙탈 차원값을 구한 후 골질의
중요한 특성 중 하나인 해면질골의 골 강도를 기계적으로
측정하여 분석치들과 골 강도와의 상관관계를 알아보고자
하였다.

재료 및 방법

1. 골 시편의 준비

동일 연령대의 어린 수컷 돼지 5마리의 하악골 양측을
대상으로 일반 방사선사진을 얻어 골소주의 주행방향을
확인하고 Microcutting grinding system 300 CP precision
parallel control (EXAKT Apparatebau GmbH, Norderstedt,
Germany)을 사용하여 골소주의 주행방향에 수직으로 5
mm 두께로 잘라 가늘고 긴 골 시편을 얻은 후 10 mm 가
량의 길이로 연속적으로 나누어 총 200개의 골 시편들을
얻었다. 얻어진 골 시편들의 두께는 5 mm, 폭과 높이는 10
mm 내외였으며 2면 이상이 치밀골로 둘러싸여 있었다
(Fig. 1A). 이 중 치아, 치배 또는 골 결손부가 포함되었거나,
해면질 골의 폭이 5 mm 이하인 시편을 제외하여 총 111개
의 골 시편을 실험재료로 하였다.

2. 골 시편의 디지털 구내방사선영상 획득

준비된 모든 골 시편의 해면질골 중앙에 지름 4 mm의
원을 연필로 표시한 후 그 위에 지름 5 mm의 구리 링을
위치시키고, 절단면에 수직으로 방사선을 조사하여 CCD
센서 (Jupiter CDX-2000HQ, Biomedisys Corp., Seoul, Korea)
를 이용하여 디지털 구내방사선영상을 획득하였다 (Fig.
1B). 방사선 조사는 Heliodent DS (Siemens Corp., München,
Germany) 구내방사선촬영기를 이용하였으며, 관전압은 70
kVp, 관전류는 7 mA, 노출시간은 0.16초로 하였으며, 초점-
물체간 거리는 60 cm이었다. 디지털 구내방사선영상은 12
bit의 회색조 값을 가지는 raw image이었으며, 회색조 수준
2200과 3500 범위를 8 bit 회색조 값으로 변환시킨 후 BMP
형식의 파일로 저장하였다.

3. 골 시편의 디지털 구내방사선영상 분석

디지털 구내방사선영상의 분석은 구리링의 중앙에 설정
된 100 × 100 pixel (4.4 mm × 4.4 mm) 크기의 관심영역을 대

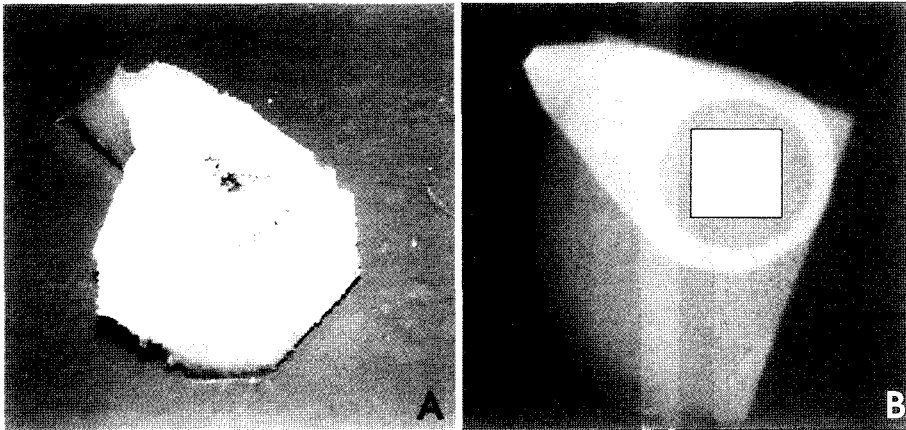


Fig. 1. A, Bone specimen. B, Direct digital intra-oral radiographic image. The square shows region of interest (ROI).

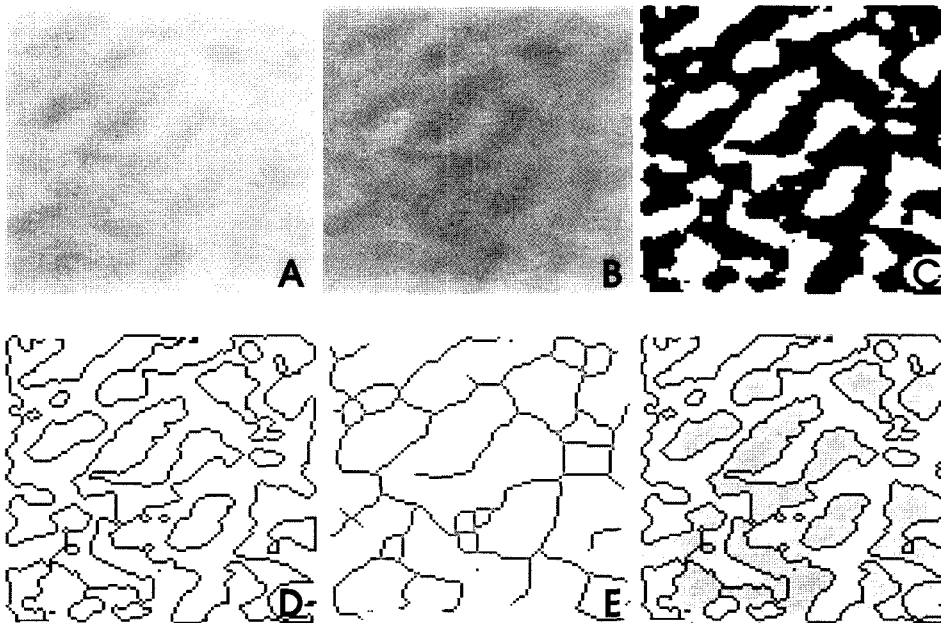


Fig. 2. A, Original image in ROI. B, Subtraction image (standardized image). C, Binary image. D, Outline image. E, Skeletonized image. F, Addition of image A and D. Note that red pixels mean terminal points and blue pixels mean branch points in skeletonized image.

Table 1. Correlation matrix for mechanical strengths and all parameters

		Mean gray level	Trabeculae area	Periphery	Fractal dimension	Length of skeletonized trabeculae	Number of terminal points	Number of branch points	Branch-terminal ratio
Maximum stress	Pearson correlation	-0.607	-0.074	-0.250	-0.455	-0.168	-0.066	-0.078	0.081
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.440	0.008	0.000	0.078	0.488	0.417	0.396
Yield stress	Pearson correlation	-0.612	-0.233	-0.377	-0.563	-0.315	-0.098	-0.172	0.194
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.014	0.000	0.000	0.001	0.308	0.072	0.042
Young's modulus	Pearson correlation	-0.604	-0.325	-0.418	-0.455	-0.391	-0.195	-0.298	0.269
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.040	0.001	0.004

* Correlation coefficients from linear regression analysis, significance of $p < 0.05$

상으로 Scion image program ver 4.1 (Scion Corp., Frederick, Maryland, USA)의 macro를 이용하여 작성한 자동화된 영

상분석프로그램으로 하였다. 분석항목은 관심영역의 평균 회색조 수준 (mean gray level), 골 면적 (trabeculae area), 골

외곽선 길이 (periphery), 프랙탈 차원 (fractal dimension), 골격 영상 길이 (length of skeletonized trabeculae), terminal point 수 (number of terminal points), branch point 수 (number of branch points), branch-terminal 비 (branch-terminal ratio) 등 8가지였다. 이 연구에 사용된 자동화된 영상분석프로그램의 영상처리과정은 White와 Rudolph²에 의하여 소개된 영상처리과정을 일부 수정한 것이다. 관심영역 (Fig. 2A)의 평균 회색조 수준을 얻은 후 영상을 복제하여 가우시안 필터 (sigma = 10 pixel, kernel size = 31 × 31 pixel)를 적용한 흐림영상을 얻은 후 감산하고 128의 회색조 값을 더하여 저주파수의 노이즈를 제거한 표준영상을 얻었다 (Fig. 2B). 이 표준영상의 평균 회색조 수준은 관심영역의 평균 회색조 수준과 관련없이 128이다. 표준영상을 128의 회색조를 기준으로 이분화 (binary) 영상으로 변환시킨 후 흰점의 수를 구하여 골 면적을 구하였다 (Fig. 2C). 이분화 영상에서 골의 외곽선을 추출하여 외곽선 (outline) 영상을 얻었으며 (Fig. 2D), 외곽선 영상의 검은 점의 수를 구하여 골 외곽선 길이를 구하였으며 외곽선 영상에 tile counting method를 적용하여 프랙탈 차원값을 구하였다. 이때 사용한 tile의 크기는 6-12 pixel이었다. 이분화 영상에 골의 외곽선을 이루는 pixel을 반복적으로 제거하여 pixel 하나의 두께로 이루어지는 골격 (skeletonized) 영상을 얻었으며 (Fig. 2E),

골격 영상의 점의 수를 구하여 골격 영상 길이를 구하였다. 또한 골격 영상을 3 × 3 pixel 크기의 mask로 검사하여 단 한 개의 pixel과 인접한 pixel를 terminal point로 정하였고, 세 개 이상의 인접한 pixel을 가지는 pixel을 branch point로 정하여 각각의 개수를 구하여 terminal point 수, branch point 수를 구하였다. 또한 branch point의 수와 terminal point의 수의 비를 계산하여 branch-terminal 비를 구하였다.

4. 골 시편의 기계적 강도 측정

골 시편의 기계적 강도를 측정하기 위하여 Instron materials testing machine (model 4465, Instron Corp., USA)를 이용하여 punch shear strength 분석을 시행하였다. 실린더 모양인 지름 2 mm의 punch로 골 시편에 연필로 표시된 관심영역 중앙에 1 mm/min의 속도로 힘을 가하여 응력-변형곡선 (load-deformation curve)을 얻었다 (Fig. 3). 응력-변형곡선에서 응력과 변형이 직선관계를 이루며 변화할 때 기울기를 얻어 Young's modulus를 구하였으며, 직선관계에서 벗어나는 점의 응력을 얻어 항복강도 (yield stress)를 구하였다. 또한 골 시편이 완전히 파괴될 때까지 과정 중 최대 응력을 얻어 최대강도 (maximum stress)를 구하였다.

5. 통계분석

통계분석을 위하여 SPSS ver 10.0을 사용하였으며 유의 수준을 5%로, 골 시편의 디지털 구내방사선영상에서 얻어진 분석항목들과 골 시편의 기계적 강도의 측정치들 간에 상관분석을 시행하였다.

결 과

최대강도는 평균 회색조 수준, 골 외곽선 길이, 프랙탈 차원값과 통계적으로 유의한 상관계수를 구할 수 있었다. 항복강도는 평균 회색조 수준, 골 면적, 골 외곽선 길이, 프랙탈 차원값, 골격 영상 길이, branch-terminal 비와 통계적

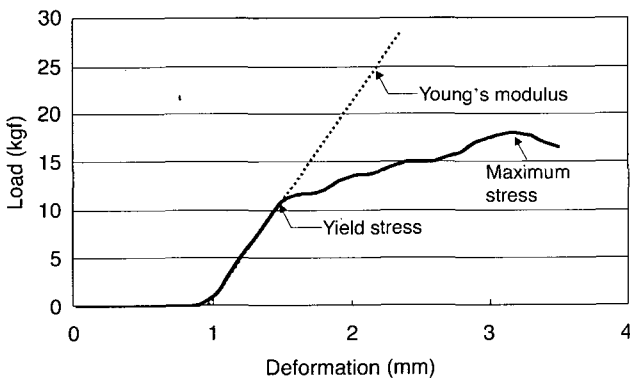


Fig. 3. Load-deformation curve.

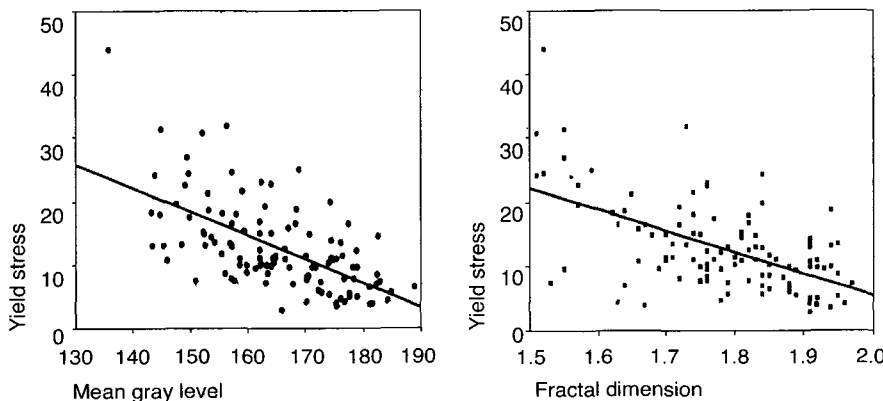


Fig. 4. A, Pearson correlation (Correlation coefficient: -0.612) between mean gray level and yield strength. B, Pearson correlation (Correlation coefficient: -0.563) between fractal dimension and yield strength.

으로 유의한 상관계수를 구할 수 있었다. Young's modulus는 평균 회색조, 골 면적, 골 외곽선 길이, 프랙탈 차원값, 골격 영상 길이, terminal point 수, branch point 수, branch-terminal 비와 통계적으로 유의한 상관계수를 구할 수 있었다.

골 시편의 최대강도와 항복강도, Young's modulus 등 모든 기계적 강도 측정치들은 평균 회색조와 가장 뚜렷한 음의 선형상관관계를 보였으며 각각의 상관계수는 -0.607 , -0.612 (Fig. 4A), -0.604 이었다. 또한 모든 기계적 강도 측정치들은 프랙탈 차원값과도 뚜렷한 음의 선형상관관계를 보였으며 각각의 상관계수는 -0.455 , -0.563 (Fig. 4B), -0.455 이었다. 이밖에 항복강도는 골 외곽선 길이(상관계수: -0.377), 골격 영상의 길이(상관계수: -0.315)와 뚜렷한 음의 선형상관관계를 보였으며 Young's modulus는 골면적(상관계수: -0.325), 골 외곽선 길이(상관계수: -0.418), 골격 영상 길이(상관계수: -0.391)와 뚜렷한 음의 선형상관관계를 보였다.

Young's modulus와 branch point 수(상관계수: -0.298), branch-terminal 비(상관계수: 0.269)는 비교적 높은 선형상관관계를 보였으나 뚜렷한 선형상관관계를 보이지는 않았다.

고 찰

일반적으로 골질을 평가하기 위해서 골밀도를 측정하는 방법이 널리 이용되어 왔다. 성인에게 가장 흔한 전신질환 중 하나로 폐경기 여성에서 약 30% 가량의 유병률을 보이는²² 골다공증 진단에 사용되는 골밀도를 측정하는 방법으로 dual energy X-ray absorptiometry (DEXA)와 quantitative computed tomography (QCT)가 있다. DEXA을 이용한 골밀도의 측정은 에너지가 다른 두개의 X선을 조사하여 연조직의 영향을 배제시키는 방법으로 QCT에 비하여 방사선 노출이 적고 정확하며 사용이 쉬운 장점이 있으나²² 골다공증에 의하여 민감하게 영향을 받는 해면질골을 치밀골과 분리하여 골밀도를 측정할 수 없는 한계가 있다.⁶ 이에 대한 해결책으로 QCT가 사용되었는데 이는 환자에 대한 방사선 조사량이 많으며 비용이 많이 든다는 단점이 있다.²² 또한 Hildebolt¹는 골다공증과 악골의 골밀도와의 관계에 대한 연구에서 악골에서 흔히 개재되는 여러 국소적 요인의 영향으로 정확성이 떨어진다고 하였다.

골의 기계적 강도의 평가는 골질 평가의 중요한 항목이며 특히 골다공증 환자에 대한 골질의 위험도를 평가하는데 중요하므로 많은 연구의 대상이 되어 왔다. 골의 기계적 강도와 골밀도 사이의 유의한 상관관계가 있다는 많은 연구^{11,12}가 발표되었으나 동시에 골의 기계적 강도가 다만 골밀도에 의해서만 결정되지는 않는다고 알려져 있다.⁹⁻¹² 따라서 이런 단점들을 극복하기 위한 연구들이 진행되고

있는 바 최근에는 프랙탈 차원값 및 골 미세구조와 골질과의 상관관계에 대한 연구가 많이 수행되고 있다. 실제로 Ruttimann 등¹⁹은 인공적으로 탈회시킨 상악골에서 프랙탈 차원값이 변화함을 관찰하였다고 보고하였고, Southard 등²⁰은 탈회시킨 인간 상악골을 대상으로 한 실험에서 골소주 패턴이 변화한다고 보고하였으며, Geraets와 Van der Stelt²¹는 요골 원위부에서의 골소주 패턴의 변화 양상이 요추에서의 골밀도 변화 양상과 관계가 있다고 하였다. 또한 White와 Rudolph,² White 등¹⁶은 골다공증 등 전신질환을 가진 환자의 악골에 대해 형태계측학적 분석을 시행한 결과 악골내의 골소주 패턴이 대조군과 비교했을 때 변화가 있음을 보고하였다. 이와 같은 연구들의 결과를 종합해 보면 프랙탈 차원값과 골 미세구조의 패턴이 골질과 어떠한 상관관계가 있으리라 짐작되는데 실제로 본 논문의 연구결과에 따르면 프랙탈 차원값과 골 미세구조의 형태계측학적 분석항목들이 골의 기계적 강도와 뚜렷한 선형상관관계가 있었다.

골 미세구조에 대한 연구는 골조직시편에 대한 연구에서 시작되었는데 골조직시편으로 골 미세구조를 연구한 Parfitt²³은 해면질골의 흡수를 파골세포에 의한 파괴작용과 관련된 급속한 골소실과 조골세포의 감소로 인해 골조직 침착이 감소됨으로써 서서히 진행되는 골소실로 나누어 설명하였다. 또한 그는 골 미세구조의 조직형태계측학적 분석을 소개하였다.²⁴ 이후 골조직시편의 조직형태계측학적 분석에 대한 많은 연구들이 보고되었으며, Croucher 등¹⁷에 의하여 strut analysis와 trabecular bone pattern factor, marrow star volume 등 새로운 개념에 대한 비교가 이루어지기도 하였다. 그러나 골 조직시편을 이용한 골 미세구조의 분석은 침습적인 방법이므로 임상에서 환자에게 적용하기 힘들다.

Geraets 등^{13,14}은 골의 방사선영상에서 골소주의 패턴을 추출하고 형태계측학적으로 분석하는 방법을 소개하였으며, White와 Rudolph,² White 등¹⁶은 이 방법을 다소 변형하여 악골의 구내 방사선사진에 적용하였다. 본 연구에서는 White와 Rudolph,² White 등¹⁶이 사용한 방법을 다소 수정하여 직접 디지털 구내 방사선사진에 적용하였다.

관심영역의 평균 회색조 수준은 본 실험에서 골 시편들의 두께가 5 mm로 일정하였으므로 골밀도와 직접적인 관련이 있을 것으로 생각되며, 골 시편의 기계적인 강도 측정치들과 뚜렷한 음의 선형상관관계를 보였다. 이는 골의 기계적 강도측정치들과 골밀도 간에 뚜렷한 상관관계가 있다는 것을 의미하는 것으로 생각한다. 디지털 방사선영상의 평균 회색조에 대한 연구²⁵에서 스태뎁지를 사용하여 디지털 영상의 회색조를 표준화시키고 linear calibration 시키는 방법이 보고되었으나 본 실험에서는 직접 디지털 구내방사선영상 획득장치(Jupiter CDX-2000HQ)에서 촬영 후 영상의 변형이 가해지지 않은 raw 영상을 직접 얻어 사

용하였으며 실험 전에 구리 스텝웨지를 포함하여 촬영한 raw 영상들에서 포함된 스텝웨지의 단계별 회색조 수준을 비교하여 유의한 오차가 없음을 확인하였다. raw 영상은 12 bit의 회색조 값을 가지고 있었으며, 모든 골 시편의 방사선영상 중 회색조의 최대값과 최소값을 포함하는 2200과 3500 범위를 선택하여 8 bit 회색조 값으로 변환시켜 분석에 사용하였다.

표준영상을 얻기 위하여 가우시안 필터 ($\sigma = 10$ pixel, kernel size = 31×31 pixel)를 적용한 영상을 감산하고 128 값을 각각의 점들에 더하여 저주파 노이즈를 제거하였다. 우리가 사용한 직접 디지털 구내방사선영상의 해상도는 약 600 dpi이었으며, 분석대상인 돼지 하악골의 골 패턴의 크기를 고려할 때 가우시안 필터의 값이 적당하다고 생각한다. 표준영상의 평균 회색조 수준은 관심영역의 평균 회색조 수준과 상관없이 항상 128이다. 표준영상을 128 회색조 수준을 기준으로 이분화 영상을 얻고 골 면적을 구하였다. 이 때 골면적은 조직형태계측학적인 골 면적 (bone area)과는 다른 의미를 갖는다. 방사선영상은 골 패턴의 중첩된 투영상이므로 많은 중복과 패턴의 소실을 감안해야 하며 결국 골질과의 관련이 적을 것으로 생각되며, 우리 실험결과에서도 Young's modulus와 뚜렷한 음의 선형상관관계를 보였을 뿐 다른 두 기계적 강도 값과는 유의한 상관관계가 없었다.

외곽선 영상에서 골 외곽선의 길이와 프랙탈 차원값을 구했는데 이 두 분석항목은 모두 골소주 패턴의 복잡성을 의미한다. Parfitt²³은 해면질골의 골소실이 일어나는 기전 중 첫째 기전이 파골세포의 의한 파괴작용과 관련한 급속한 골소실이고 두 번째 기전이 조골세포의 골조직 침착의 감소에 기인한 서서히 진행되는 골소실이라고 하였다. 이 두 가지 골흡수 기전에 의해 골소주가 흡수되면 그 외형이 결국 복잡해진다고 할 수 있고 따라서 골소주가 복잡할수록 골 흡수가 진행되고 있다고 생각할 수 있을 것이다. 우리의 실험결과에서 골 외곽선의 길이와 프랙탈 차원값은 항복강도, Young's modulus와 각각 뚜렷한 음의 선형상관관계를 보였다. 이는 가늘고 복잡한 골소주 패턴을 보이는 골절편에서 골의 기계적 강도 측정치가 작았다는 것을 의미한다. 여기서 주목할 수 있는 결과는 골 외곽선의 길이 보다 프랙탈 차원값의 상관계수의 절대값이 더 컸다는 것이며 이는 프랙탈 차원값이 골 외곽선 길이보다 골 시편의 기계적 성질을 더 잘 반영한다는 의미이다.

골격 영상에서 얻은 골격 영상 길이와 terminal point 수, branch point 수, terminal-branch 비 등에서는 골격 영상의 길이와 항복강도, Young's modulus가 뚜렷한 음의 선형상관관계를 보인 것 외에 뚜렷한 선형상관관계를 보이지 않았다. 이러한 분석법은 조직형태계측학적 연구에서 비롯된 분석법으로 다수의 골소주의 패턴이 중첩되고 소실된 방사선영상에 적용하기 어려운 것으로 생각된다. 그러나 만

약 얇은 골 시편에서 얻은 방사선영상을 분석할 경우 큰 의미를 가질 수도 있을 것으로 기대된다.

Bender와 Seltzer,²⁶ Cavalcanti 등²⁷의 연구에 따르면 피질골을 통과하는 방사선사진에서 관찰되는 대부분의 골소주 패턴은 피질골 내면의 골내면의 골 패턴이라고 하였다. 본 실험은 피질골을 통과하지 않은 방사선사진에서 얻은 골소주 패턴을 분석하였으므로 피질골의 효과를 무시할 수 있었다. 반면 본 실험의 결과를 임상에 적용하기 위해서는 피질골을 통과하는 방사선사진에서 추출한 골소주 패턴에 대한 연구가 필요할 것으로 생각되며, 특히 피질골 내면의 골패턴에 의한 영향을 제거하는 영상처리과정에 대한 연구가 필요할 것으로 생각한다. 또한 최근에 micro CT를 이용한 골 미세구조의 3차원 방사선영상에 대한 연구^{28, 29}가 많이 진행되고 있어, 2차원 방사선영상에서 추출한 골 미세구조와 상호 관계에 대한 입체적 연구가 필요할 것으로 생각한다.

본 연구에서 사용한 골질 평가를 위한 골 미세구조의 분석법의 임상적인 가치는 비침습적인 분석법일 뿐 아니라 최근 급격히 보급되고 있는 직접 디지털 구내방사선영상을 이용하며 자동화한 영상처리과정으로 임상적용이 쉽다는 점에 있다. 특히 인공치 식립전에 쉽게 적용할 수 있는 임상적인 골질분석법으로 사용이 가능할 것이다.

본 실험에서 돼지 하악골 시편에서 해면질골의 골 강도는 평균 회색조 수준과 프랙탈 차원값, 형태계측학적 분석치들과 뚜렷한 선형상관관계를 보여 이와 같은 골질 분석법은 치과 진료실에서 쉽게 촬영할 수 있는 디지털 구내방사선사진을 이용하는 비침습적인 분석법이므로 쉽고 임상적인 골질 분석법이 가능할 것이다.

참 고 문 헌

- Hiltebolt CF. Osteoporosis and oral bone loss. Dentomaxillofac Radiol 1997; 26 : 3-15.
- 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.
- White SC. Oral radiographic predictors of osteoporosis. Dentomaxillofac Radiol 2002; 31 : 84-92.
- Rosenthal DI, Ganott MA, Wyshak G, Slovik DM, Doppelt SH, Neer RM. Quantitative computed tomography for spinal density measurement. Factors affecting precision. Invest Radiol 1985; 20 : 306-10.
- Genant HK, Block JE, Steiger P, Glueer CC, Smith R. Quantitative computed tomography in assessment of osteoporosis. Semin Nucl Med 1987; 17 : 316-33.
- Pouilles JM, Tremollieres F, Todorovsky N, Ribot C. Precision and sensitivity of dual-energy x-ray absorptiometry in spinal osteoporosis. J Bone Miner Res 1991; 6 : 997-1002.
- Töyräs J, Nieminen MT, Kroger H, Jurvelin JS. Bone mineral density, ultrasound velocity, and broadband attenuation predict mechanical properties of trabecular bone differently. Bone 2002; 31 : 503-7.
- Lindh C, Nilsson M, Klinge B, Petersson A. Quantitative computed

- tomography of trabecular bone in the mandible. *Dentomaxillofac Radiol* 1996; 25 : 146-50.
9. Burr DB, Martin RB. The effects of composition, structure and age on the torsional properties of the human radius. *J Biomech* 1983; 16 : 603-8.
 10. Mosekilde L, Kragstrup J, Richards A. Compressive strength, ash weight, and volume of vertebral trabecular bone in experimental fluorosis in pigs. *Calcif Tissue Int* 1987; 40 : 318-22.
 11. Mosekilde L, Mosekilde L, Danielsen CC. Biomechanical competence of vertebral trabecular bone in relation to ash density and age in normal individuals. *Bone* 1987; 8 : 79-85.
 12. Heaney RP. Bone mass and osteoporotic fractures. *Calcif Tissue Int* 1990; 47 : 63-5.
 13. Geraets WG, van der Stelt PF, Netelenbos CJ, Elders PJ. A new method for automatic recognition of the radiographic trabecular pattern. *J Bone Miner Res* 1990; 5 : 227-33.
 14. Geraets WG, van der Stelt PF, Elders PJ. The radiographic trabecular bone pattern during menopause. *Bone* 1993; 14 : 859-64.
 15. Caligiuri P, Giger ML, Favus MJ, Jia H, Doi K, Dixon LB. Computerized radiographic analysis of osteoporosis: preliminary evaluation. *Radiology* 1993; 186 : 471-4.
 16. White SC, Cohen JM, Mourshed FA. Digital analysis of trabecular pattern in jaws of patients with sickle cell anemia. *Dentomaxillofac Radiol* 2000; 29 : 119-24.
 17. Croucher PI, Garrahan NJ, Compston JE. Assessment of cancellous bone structure: comparison of strut analysis, trabecular bone pattern factor, and marrow space star volume. *J Bone Miner Res* 1996; 11 : 955-61.
 18. Mandelbrot BB. *The fractal geometry of the nature*. New York: WH Freeman and Company; 1983.
 19. Ruttimann UE, Webber RL, Hazelrig JB. Fractal dimension from radiographs of peridental alveolar bone. A possible diagnostic indicator of osteoporosis. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1992; 74 : 98-110.
 20. Southard TE, Southard KA, Jakobsen JR, Hillis SL, Najim CA. Fractal dimension in radiographic analysis of alveolar process bone. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 1996; 82 : 569-76.
 21. Geraets WG, van der Stelt PF. Fractal properties of bone. *Dentomaxillofac Radiol* 2000; 29 : 144-53.
 22. Lenchik L, Sartoris DJ. Current concepts in osteoporosis. *AJR Am J Roentgenol* 1997; 168 : 905-11.
 23. Parfitt AM. Age-related structural changes in trabecular and cortical bone : cellular mechanisms and biomechanical consequences. *Calcif Tissue Int* 1984 : 36(suppl 1) : S123-8.
 24. Parfitt AM. Bone histomorphometry : proposed system for standardization of nomenclature, symbols, and units. *Calcif Tissue Int* 1988 : 42 : 284-6.
 25. Martin RB, Papamichos T, Dannucci GA. Linear calibration of radiographic mineral density using video-digitizing methods. *Calcif Tissue Int* 1990; 47 : 82-91.
 26. Bender IB, Seltzer S. Roentgenographic and direct observation of experimental lesion in bone. *J Am Dent Assoc* 1961; 62 : 152-60.
 27. Cavalcanti MG, Ruprecht A, Johnson WT, Southard TE, Jakobsen J. Radiologic interpretation of bone striae: an experimental study in vitro. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 1999; 88 : 353-7.
 28. Ruegsegger P, Koller B, Muller R. A microtomographic system for the nondestructive evaluation of bone architecture. *Calcif Tissue Int* 1996; 58 : 24-9.
 29. Mawatari T, Miura H, Higaki H, Kurata K, Moro-oka T, Murakami T, et al. Quantitative analysis of three-dimensional complexity and connectivity changes in trabecular microarchitecture in relation to aging, menopause, and inflammation. *J Orthop Sci* 1999; 4 : 431-8.