

소의 늑골에서 탈회정도와 노출시간에 따른 프랙탈 차원의 변화

부산대학교 치과대학 구강악안면방사선학교실
정연화 · 나경수 · 조봉혜

Change of the fractal dimension according to the decalcification degree and the exposure time in the bovine rib

Yun-Hoa Jung, Kyung-Soo Nah, Bong-Hae Cho

Department of Oral and Maxillofacial Radiology, College of Dentistry, Pusan National University

ABSTRACT

Purpose : We evaluated the fractal dimension changes on bovine rib radiographs according to the decalcification degree and the exposure time in the bovine rib.

Materials and Methods : Twenty 5 mm thick cross-sectional blocks from bovine rib bone were progressively decalcified in 30 mL 0.1 N hydrochloric acid for 5, 30, and 90 minutes. They were radiographed at three exposure time settings (0.22, 0.36, 0.43 mAs) before and after each decalcification stage. We selected 100 × 100 pixel-sized regions of interests (ROIs) on trabecular bone and calculated fractal dimensions by box-counting method.

Results : Repeated measures ANOVA showed that fractal dimensions gradually decreased after acid-induced demineralization and with more exposure ($P < 0.001$).

Conclusion : The fact that fractal dimensions decrease after decalcification might support the hypothesis that patients with osteoporosis have decreased radiographic fractal dimension in trabecular bone in comparison to normal subjects. (*Korean J Oral Maxillofac Radiol* 2006; 36 : 69-72)

KEY WORDS : Fractals; Bone and Bones; Osteoporosis; Radiography

서 론

골강도를 결정하는데 있어서 골량 뿐만 아니라 골구조도 중요한 역할을 한다.^{1,5} 골다공증의 경우에 골소실과 함께 골소주 구조의 변화도 함께 진행된다고 보고되었고,^{6,7} White와 Rudolph⁸는 정상군에 비해 골다공증 환자의 골소주 형태는 복잡성이 감소된다고 하였다. 골소주 구조는 여러 가지 측정방법으로 분석되었고,^{1,7,9-11} 프랙탈 차원도 골소주의 분석에 응용되었다.¹²⁻¹⁶

프랙탈은 자기 닮음(self-similarity)과 소수차원을 그 특성으로 갖는 1975년 Mandelbrot가 소개한 기하학이다. 1980년대에 프랙탈 개념은 수많은 공학 분야에서 받아들여졌고, image pattern의 인식에서부터 치과방사선 영상과

의학영상에 도입되었다.¹⁶⁻²² 프랙탈 분석을 해면질골에 응용한 연구들^{15,23-28}이 보고되었고, 이 방법은 잠재적으로 복잡한 구조물의 특징을 묘사할 수 있으므로 골소주의 방사선형태측정술(radiomorphometry)에 효과적인 접근법으로 이용될 수 있다고 하였다.²⁹

프랙탈 분석의 의미를 이해하는데 기초적으로 고려해야 하는 것은 골밀도와 골구조에 따라 다양하게 나타나는 프랙탈 차원을 어떻게 예상하는지에 관한 것이다. Majumdar 등^{12,24}은 골다공증 환자의 프랙탈 차원이 정상군에 비해 낮다고 보고하였고, Southard 등¹⁵의 보고에서 탈회된 인간 치조골의 프랙탈 차원이 감소하였다. 이와 반대로 Ruttimann 등¹⁶은 탈회시 프랙탈 차원이 증가됨을 보고하였고, Pothuaid 등³⁰은 골다공증군과 대조군의 종골 방사선사진을 비교한 결과 골다공증군의 프랙탈 차원이 높았다. 그러므로 골다공증 환자의 프랙탈 차원을 분석한 연구는 골다공증에서 프랙탈 차원이 감소된다는 보고^{12,24,31,32}와 프랙탈 차원이 증가된다는 연구^{14,16,30}의 상반된 결과로 보고되었다.

프랙탈 분석이 진단학적 영상에서 골구조를 평가하기 위

*이 논문은 부산대학교병원 연구비를 지원받아 연구되었음.
접수일 : 2006년 3월 15일; 심사일 : 2006년 3월 16일; 채택일 : 2006년 5월 14일
Correspondence to : Prof. Bong-Hae Cho
Department of Oral and Maxillofacial Radiology, College of Dentistry, Pusan National University, Ami-dong, 1-ga, Seo-gu, Busan 602-739, Korea
Tel) 82-51-240-7474, Fax) 82-51-245-8388, E-mail) bhjo@pusan.ac.kr

한 도구로 많이 이용되고 있지만,^{19,26,27} 연산방식이나 측정방법에 따라 다양한 결과를 나타내었다. 몇몇 연구자들²⁶⁻²⁸은 측정방법에 따라 프랙탈 차원의 결과가 다르게 나타남을 지적하였다. 이에 본 연구에서는 표준화된 실험 연구의 필요성에 따라 소의 늑골 탈회 정도에 따라 골소주의 프랙탈 차원의 변화를 평가하고자 하였으며 부가적으로 노출시간에 따른 변화도 조사하였다.

재료 및 방법

1. 연구재료

소의 늑골을 5 mm 두께로 절단하여 20개 표본을 얻었다. 초음파 세척기를 이용하여 각 표본을 증류수에서 세척 후 건조하여, 30 mL 0.1 N hydrochloric acid 용액에서 5분, 30분, 90분 동안 점진적으로 탈회시켰다. 탈회 전과 시간별 탈회 후에 골표본을 증류수에 세척, 건조시킨 후 방사선사진을 촬영하였다.

2. 방사선사진 촬영

각 표본을 탈회 전과 각각의 탈회 후에 3가지 노출조건(0.22, 0.36, 0.43 mAs)으로 방사선사진을 촬영하였다. 촬영기는 7 mA, 60 kVp DC로 고정된 Heliodont-DS (Sirona, Bensheim, Germany)를 사용하였고, CCD 직접 디지털 영상기구인 CDX 2000HQ (Biomedisys Co., Seoul, Korea) 시스템으로 디지털 방사선사진을 촬영하였다. CCD 센서의 active receptor area는 30 mm × 20 mm, pixel matrix는 672 × 448이었으며, 획득된 상은 Window JPEG파일로 저장하였다.

3. 영상처리

Adobe사의 Photoshop 프로그램 (Ver 7.0, Adobe Systems Inc., San Jose, CA, USA)을 이용하여 방사선사진의 해면질 골부위에 100 × 100 픽셀 크기의 관심영역 (Region of interest, ROI)을 선택하여 총 240개의 영상을 얻었다.

모든 ROI 영상을 White와 Rudolph⁸에 의해 고안된 방법을 이용하여 다음과 같이 처리하였다. 우선 Photoshop 프로그램을 이용하여 선택된 각각의 ROI들을 가우시안 필터 (Gaussian filter, sigma=35 pixel)를 적용시켜 미세하거나 중간규모의 구조를 제거하고 흑화도의 차이가 큰 구조만 남도록 blurring시켰다. 그리고 이 blurred image를 원래의 영상에서 공제하여 128을 가산한 후, Scion image software program (Beta 4.0.2, Scion Co., Frederick, MD, USA)을 이용하여 이원영상 (binary image)으로 만들었다. 이 이원영상을 한번씩 erosion과 dilation시켜 noise를 감소시킨 후 골격화 영상 (skeletonized image)으로 전환하였다 (Fig. 1).

4. 프랙탈 차원 분석

영상처리를 통하여 얻어진 240개 골격화 영상에서 Image J software program (1.34s, National Institutes of Health, Bethesda, MD, USA)을 이용하여 box-counting method로 프랙탈 차원 값을 계산하였다. 탈회 후 경과시간과 노출시간별 프랙탈 차원을 각각 계산하였다.

5. 통계분석

Repeated measures ANOVA를 이용하여 탈회 후 경과시간과 노출시간에 따라 방사선사진상에서 프랙탈 차원의

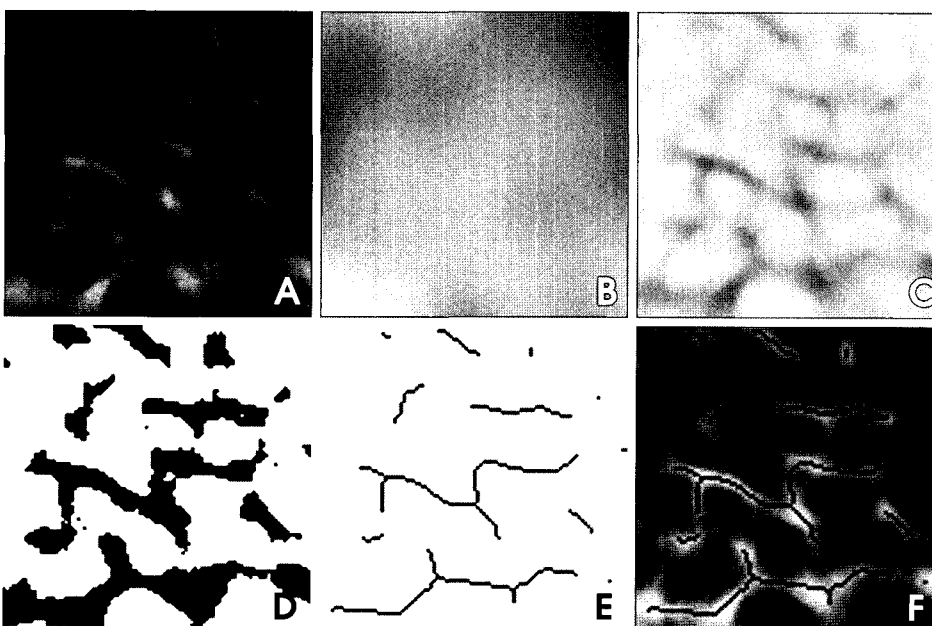


Fig. 1. Steps used in image processing. A. The region of interest of trabecular bone, B. Blurred image using a Gaussian filter, C. Filtered image subtracted from the original image, D. Binary image made of C, E. Skeletonized image made of D, F. Skeletonized image overlaying original image.

Table 1. Fractal dimensions for each stage of decalcification (n=60)

Decalcification stage	Mean	SD
before decalcification	1.156	0.071
5 minutes after decalcification	1.137	0.072
30 minutes after decalcification	1.107	0.075
90 minutes after decalcification	1.063	0.161

The fractal dimension gradually decreased according to decalcification degree (Repeated measures ANOVA, $P < 0.001$).

Table 2. Comparison of radiographic fractal dimensions at three time settings (n=80)

Exposure time	Mean	SD
0.22 mAs	1.156	0.062
0.36 mAs	1.122	0.074
0.43 mAs	1.069	0.147

The fractal dimension gradually decreased with more exposure time (Repeated measures ANOVA, $P < 0.001$).

차이가 있는지 분석하였다. 모든 통계과정은 SPSS(Ver 10.0 for windows, Chicago, IL, USA) 프로그램을 이용하였다.

결 과

탈회가 진행될수록 프랙탈 차원은 통계학적으로 유의성 있게 감소하였고 ($P < 0.001$, Table 1), 노출시간이 증가할수록 프랙탈 차원이 감소하였다 ($P < 0.001$, Table 2).

고 찰

해면질골은 두께와 방향이 다양한 골소주가 복잡하게 서로 연결되어 있다.³³ 본 연구에서는 이러한 골구조를 비침습적으로 평가하기 위해 방사선사진을 촬영하여 프랙탈 차원을 분석 도구로 사용하였고, 탈회 후 경과시간과 노출시간에 따른 골표본의 프랙탈 차원의 변화를 관찰하여 골다공증환자의 방사선사진에 응용하고자 하였다. 골을 산으로 탈회시킨 골다공증 모의실험은 골다공증에 대한 좋은 모델은 아니지만 실험하기 쉬운 장점이 있고 시간이 지나면서 구조적 변화에 대한 연구를 할 수 있게 해주었다.¹⁸

프랙탈 분석은 골구조를 민감하게 표현해줄 수 있고 골소주의 구조를 객관적으로 표현해주는 진단 방법이 될 수 있다고 보고되었다.²⁸ 골소주의 흡수와 비박화는 골다공증이나 치주질환에서 일어나고 프랙탈 차원의 변화를 가져올 수 있다고 하였다.²⁰ Shrout 등²⁸은 치조골의 해면질골 부분은 수학적 프랙탈 패턴에 적용될 수 있도록 만드는 하부구조의 기하학적 규칙성을 가지는 상호 연결된 골소

주 기둥으로 구성되어 있다는 전제를 기초로, 프랙탈 기하학을 사용하여 골소주의 특징을 나타내어 주고, 골질을 측정해 줄 수 있다는 가능성을 구체적으로 설명해주었다.

이전의 연구에서 골소주의 프랙탈 차원에 대해 일관성 있는 결과를 제시해주지 못하였고, 대부분의 연구에서 골밀도가 감소되면 프랙탈 차원이 감소된다고 보고한 반면,^{12,15,24,25,31,32} 증가된다는 연구결과도 있었다.^{14,16,30} 이렇게 명백한 모순의 이유는 분명하게 밝혀지지 않고 있지만 다음과 같이 생각해 볼 수 있다고 하였다.²⁸ 골밀도의 감소가 미세한 골소주 구조를 제거하여 복잡성을 증가시키고 산만하게 갑작스러운 골밀도의 변화를 증가시켜 프랙탈 차원을 증가시킬 수도 있고, 반대로 골소주간을 연결시켜주는 지주가 제거되어 골소주의 복잡성을 감소시켜 프랙탈 차원을 감소시킬 수 있다고 하였다.²⁸ 본 연구에서는 탈회 후 프랙탈 차원이 통계학적으로 유의성 있게 감소되는 것으로 나타나 골밀도의 감소가 골소주의 복잡성을 감소시켜 프랙탈 차원을 감소시킬 수 있다는 Majumdar 등²⁴의 의견을 지지해주었다. Shrout 등²⁸은 실험에 사용된 상의 픽셀 크기와 연구표본 처리과정에 따라 상반된 양쪽 의견이 옳을 수 있다고 하였다. 방사선학적 프랙탈 차원의 연구를 비교하는데 있어서 잠재적인 한계는 픽셀 크기이며 픽셀 크기가 감소되면 noise가 일반적으로 증가되고, 상이 더 복잡하게 되어 프랙탈 차원이 증가될 수 있다고 하였다.²⁸ 또한 프랙탈 차원은 상을 처리하는 과정에 생기는 noise에 의해서도 영향을 받는 것으로 보고되었다.¹⁸

Shrout 등²⁶의 연구에서 프랙탈 차원은 방사선 노출 정도에 영향을 받지 않는다고 하였으나, 본 연구에서는 안 등³⁴의 연구에서와 같이 노출시간이 증가할수록 프랙탈 차원이 감소하였다. 임상에서 실제로 사용되는 노출시간의 범위가 프랙탈 차원에 미치는 영향에 관한 연구가 더 진행되어야 할 것으로 고려되어진다.

본 연구 자료는 해면질골의 방사선학사진의 프랙탈 차원은 탈회가 진행될수록 감소되는 것으로 보아 골다공증 환자는 정상군에 비해 프랙탈 차원이 감소된다는 것을 지지해주었고, 노출시간이 증가할수록 프랙탈 차원이 감소되는 결과를 보여 노출조건에 따라 프랙탈 차원이 영향을 받지 않는다는 이전의 연구^{26,28}와 다른 결과를 보여주어 유사한 노출조건으로 촬영된 방사선사진의 프랙탈 차원을 비교하는 것이 필요한 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Parfitt AM. Trabecular bone architecture in the pathogenesis and prevention of fracture. *Am J Med* 1987; 82 : 68-72.
2. Martin RB. Determinants of the mechanical properties of bones. *J Biomech* 1991; 24(suppl 1) : 79-88.
3. Goldstein SA, Goulet R, McCubbrey D. Measurement and significance of three-dimensional architecture to the mechanical integrity of

- trabecular bone. *Calcif Tissue Int* 1993; 53(suppl 1): S127-32 (discussion S32-3).
4. Goldstein SA. The mechanical properties of trabecular bone: dependence on anatomic location and function. *J Biomech* 1987; 20 : 1055-61.
 5. Gibson LJ. The mechanical behaviour of cancellous bone. *J Biomech* 1985; 18 : 317-28.
 6. Kleerekoper M, Villanueva AR, Stanciu J, Rao DS, Parfitt AM. The role of three-dimensional trabecular microstructure in the pathogenesis of vertebral compression fractures. *Calcif Tissue Int* 1985; 37 : 594-7.
 7. Croucher PI, Garrahan NJ, Compston JE. Structural mechanisms of trabecular bone loss in primary osteoporosis: specific disease mechanism or early ageing? *Bone Miner* 1994; 25 : 111-21.
 8. 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.
 9. Caligiuri P, Giger ML, Favus MJ, Jia He, Doi K, Dixon LB. Computerized radiographic analysis of osteoporosis: preliminary evaluation. *Radiology* 1993; 186 : 471-4.
 10. Croucher PI, Garrahan NJ, Compston JE. Assessment of cancellous bone structure: comparison of strut analysis, trabecular bone pattern factor, and marrow space star volume. *Bone Miner Res* 1996; 11 : 955-61.
 11. Ito M, Ohki M, Hayashi K, Yamada M, Uetani M, Nakamura T. Trabecular texture analysis of CT images in the relationship with spinal fracture. *Radiology* 1995; 194 : 55-9.
 12. Majumdar S, Genant HK, Grampp S, Newitt DC, Truong VH, Lin JC, et al. Correlation of trabecular bone structure with age, bone mineral density, and osteoporotic status: in vivo studies in the distal radius using high resolution magnetic resonance imaging. *J Bone Miner Res* 1997; 12 : 111-8.
 13. Haidekker MA, Andresen R, Evertsz CJ, Banzer D, Peitgen HO. Assessing the degree of osteoporosis in the axial skeleton using the dependence of the fractal dimension on the grey level threshold. *Br J Radiol* 1997; 70 : 586-93.
 14. Law AN, Bollen AM, Chen SK. Detecting osteoporosis using dental radiographs: a comparison of four methods. *J Am Dent Assoc* 1996; 127 : 1734-42.
 15. 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.
 16. 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.
 17. Buckland-Wright JC, Lynch JA, Rymer J, Fogelman I. Fractal signature analysis of macroradiographs measures trabecular organization in lumbar vertebrae of postmenopausal women. *Calcif Tissue Int* 1994; 54 : 106-12.
 18. Geraets WGM, van der Stelt PF. Fractal properties of bone. *Dentomaxillofac Radiol* 2000; 29 : 144-53.
 19. Lynch JA, Hawkes DJ, Buckland-Wright JC. Analysis of texture in macroradiographs of osteoarthritic knees using the fractal signature. *Phys Med Biol* 1991; 36 : 709-22.
 20. Lynch JA, Hawkes DJ, Buckland-Wright JC. A robust and accurate method for calculating fractal signature of texture in macroradiographs of osteoarthritic knees. *Med Inform* 1991; 16 : 241-51.
 21. Cha SY, Han WJ, Kim EK. Usefulness of fractal analysis for the diagnosis of periodontitis. *Korean J Oral Maxillofac Radiol* 2001; 31 : 35-42.
 22. Lee JM, Park H, Jeong HG, Kim KD, Park CS. Bony change of apical lesion healing process using fractal analysis. *Korean J Oral Maxillofac Radiol* 2005; 35 : 91-6.
 23. Fazzalari NL, Parkinson IH. Fractal properties of cancellous bone of the iliac crest in vertebral crush fracture. *Bone* 1998; 23 : 53-7.
 24. Majumdar S, Weinstein RS, Prasad RR. Application of fractal geometry techniques to the study of trabecular bone. *Med Phys* 1993; 20 : 1611-9.
 25. Caligiuri P, Giger ML, Favus M. Multifractal radiographic analysis of osteoporosis. *Med Phys* 1994; 21 : 503-8.
 26. ShROUT MK, Potter BJ, Hildebolt CF. The effect of image variations on fractal dimension calculations. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 1997; 84 : 96-100.
 27. ShROUT MK, Hildebolt CF, Potter BJ. The effect of varying the region of interest on calculations of fractal index. *Dentomaxillofac Radiol* 1997; 26 : 295-8.
 28. ShROUT MK, Roberson B, Potter BJ, Mailhot JM, Hildebolt CF. A comparison of 2 patient populations using fractal analysis. *J Periodontol* 1998; 69 : 9-13.
 29. Lee KI, Choi SC, Park TW, You DS. Fractal dimension calculated from two types of region of interest. *Dentomaxillofac Radiol* 1999; 28 : 284-9.
 30. Pothuau L, Lespessailles E, Harba R, Jennane R, Royant V, Eynard E, et al. Fractal analysis of trabecular bone texture on radiographs: Discriminant value in postmenopausal osteoporosis. *Osteoporos Int* 1998; 8 : 618-25.
 31. Weinstein RS, Majumdar S. Fractal geometry and vertebral compression fractures. *Bone Mineral Res* 1994; 9 : 1797-802.
 32. Southard TE, Southard KA, Krizan KE, Hillis SL, Haller JW, Keller J, et al. Mandibular bone density and fractal dimension in rabbits with induced osteoporosis. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2000; 89 : 244-9.
 33. Bollen AM, Taguchi A, Hujoel PP, Hollender LG. Fractal dimension on dental radiographs. *Dentomaxillofac Radiol* 2001; 30 : 270-5.
 34. An BM, Heo MS, Lee SP, Lee SS, Choi SC, Park TW, et al. Effect of exposure time and image resolution on fractal dimension. *Korean J Oral Maxillofac Radiol* 2002 ; 32 : 75-9.