

프랙탈 분석을 이용한 낭종 적출술 후 결손부 치유 양상에 관한 연구

임헌준¹ · 이승수¹ · 김원기¹ · 온병훈¹ · 최상문¹ · 오세리¹ · 민승기^{1,2} · 이 준^{1,2}

¹원광대학교 치과대학 구강악안면외과학교실, ²원광 골재생 연구소

Abstract (J Korean Assoc Oral Maxillofac Surg 2011;37:477-82)

Study on bone healing process following cyst enucleation using fractal analysis

Hun-Jun Lim¹, Seung-Soo Lee¹, Won-Ki Kim¹, Byung-Hun Ohn¹,
Sang-Moon Choi¹, Se-Ri Oh¹, Seung-Ki Min^{1,2}, Jun Lee^{1,2}

¹Department of Oral and Maxillofacial Surgery, School of Dentistry, Wonkwang University,

²Bone Regeneration Research Institute, Wonkwang University, Daejeon, Korea

Introduction: Bone regeneration of cystic defects of the jaws after a cyst treatment requires lengthy healing periods. Generally, the bony changes are observed periodically through a visual radiographic reading as well as by the clinical opinion and radiographic images (panorama, periapical view), but it is difficult to compare the objective bony changes using only the radiographic density. In addition, it is difficult to observe minute bony changes through a visual radiographic reading, which can lead to a subjective judgment. This study examined the bone density after the enucleation of a jaw cyst by fractal analysis.

Materials and Methods: Eighteen patients with a cystic lesion on the jaw were assessed. Panoramic radiographs were taken preoperatively, immediately postoperatively, and 1, 3, 6 and 12 months after cyst enucleation. The images were analyzed by fractal analysis.

Results: The mean fractal dimensions increased immediately after surgery and 3, 6 and 12 months postoperatively. The postoperative 6 and 12 months fractal dimension was similar to the controls.

Conclusion: Fractal analysis was used to overcome the limit of a subjective reading during an assessment of bone regeneration after cyst enucleation.

Key words: Cyst enucleation, Bone regeneration, Fractal dimension

[paper submitted 2011. 7. 16 / revised 2011. 9. 5 / accepted 2011. 10. 12]

I. 서 론

낭종이란 연조직 혹은 경조직 내에 액체나 반고형 물질을 함유하고 있는 상피성 내막이 덮힌 결합조직으로 둘러싸인 비정상적인 공동을 말한다. 악골에 생긴 낭종의 경우 파노라마 촬영과 치근단 사진으로 충분한 진단학적 가치가 있다. 낭종벽은 일반적으로 방사선 사진상에서 매끄러운 경계를 갖는 흰 선으로 나타나는 것이 보통이나 이차 감염이 있는 경우에는 경계가 불규칙하게 나타나기도 한다. 낭종의 치료는 외과적 적출술로 대부분 완치가 가능하나 낭종의 크기가 큰 경우나 외과적 적출 시 인접한 해부학적 구

조물에 손상이 예상될 때는 기능성, 심미적인 손상을 최소화하기 위해 일차적 낭종 적출술에 앞서 낭종 조대술이나 감압술을 통하여 낭종의 크기를 감소시킨 뒤 이차적 적출술을 시행하는 것이 선호되고 있다¹.

낭종 치료 후에 낭종에 의한 악골의 결손부의 골재생에는 상당한 시일이 요구된다. 보통 임상 소견과 함께 파노라마 사진, 치근단 촬영 등의 방사선 사진의 시각적 판독을 통해 낭종 주변의 골 변화 양상을 주기적으로 관찰하는데, 이때 방사선 사진 판독 시 흑화도는 촬영장치의 종류, 노출시간, 골조직의 두께, 밀도 및 중첩되는 연조직의 두께에 따라 다르기 때문에 단순히 흑화도 만으로는 객관적인 골 변화를 비교하기 어렵다². 또한 시각적 판독은 미세한 골조직의 변화를 감지하기 힘들며 주관적 판단이 개입될 소지가 있다³. 최근에는 디지털 영상 프로세싱에 의한 방사선 영상을 정량적으로 분석하는 방법이 다양하게 연구되어 골소주 질환에 대한 보다 객관적이고 정확한 분석이 가능해졌다^{4,6}.

프랙탈(fractal)이란 일부 작은 조각이 전체와 비슷한 기하학적 형태를 말한다. 이런 특징은 자기 유사성(self-

이 준

302-120 대전시 서구 둔산 2동 1268번지
원광대학교 대전치과병원 구강악안면외과

Jun Lee

Department of Oral and Maxillofacial Surgery,
Daejeon Dental Hospital, Wonkwang University
1268, Doosan 2-dong, Seo-gu, Daejeon 302-120, Korea
TEL: +82-42-366-1146 FAX: +82-42-366-1115
E-mail: omslee@daum.net

*본 연구는 2009년도 원광대학교 교내 연구비 지원에 의해 이루어짐.

similarity)이라고 하며, 자기 유사성을 갖는 기하학적 구조를 프랙탈 구조(fractal structure)라고 한다. 이러한 프랙탈 구조에서 프랙탈 차원 값을 구하는 프랙탈 분석법이 최근 영상 분석에 널리 이용되고 있으며, 치의학 분야에서도 치조골이나 악골의 영상 패턴의 인지를 위해 이용되고 있다.

본 연구의 목적은 디지털 파노라마 방사선 영상을 이용하여 낭종 적출술과 골 이식을 시행한 환자에서, 프랙탈 분석을 이용하여 수술 전과 수술 후 시간 경과에 따른 치유양상에 있어서의 골 변화를 정량적으로 분석하는 것이다.

II. 연구 대상 및 방법

1. 연구 대상

본 연구에서는 2007년 5월부터 2009년 4월까지 원광대학교 대전치과병원 구강악안면외과에서 낭종 적출술 후 자가골 이식을 시행한 환자 중 술 후 12개월까지 경과 관찰을 시행한 18명(남자 13명, 여자 5명)을 연구 대상으로 선정하였다.

2. 이미지 획득

파노라마 방사선은 ProMax (Planmeca, Helsinki, Finland)로 촬영하였으며, 촬영조건은 72 kV, 14 mA, 16 sec이었고 모든 파노라마 방사선 사진은 1 명의 방사선 기사에 의해 촬영되었다. 각 환자의 술 전, 술 후 1일, 술 후 1개월, 3개월, 6개월, 12개월째 파노라마 방사선 사진은 grayscale의 8 bit bitmap image 파일로 변환시켰다(Adobe photoshop CS2, Adobe systems Inc, San Jose, CA, USA).

3. 영상 정합

변환된 각 환자별 파노라마 방사선 사진은 동일한 조건에서 촬영했다 하더라도 구조물의 이미지 상에서의 좌표 값이 다르게 얻어지게 된다. 영상 정합(image registration)은 서로 다른 영상을 변형하여 하나의 좌표계에 나타나게 하는 이미지 처리 과정이고, image subtraction tool program (Sunny, Biomedisys Co. Ltd., Seoul, Korea)을 사용하여 수행하였다.

낭종 병소의 좌표를 동일하게 하기 위해서 낭종과 가까운 구조물(치아, 과두 등)에 4개의 참고점(reference points)을 설정하여 동일한 좌표 값으로 변환하였다.(Fig. 1)

4. 관심 영역 설정

언어진 영상에서 각 환자의 술 전 파노라마 방사선 사진의 병소 부위에 50×50 pixel 크기의 관심 영역(region of interest, ROI)을 선택하였고(Adobe photoshop CS2), 술 후 1일, 1개월, 3개월, 6개월, 12개월째 영상에서 동일 부위에 동일 크기의 ROI를 선택하였다.

대조군으로 사용하기 위하여 술 후 12개월째 파노라마 방사선 사진에서 정상으로 간주하는 반대측 동일 부위에 동일 크기의 관심 영역을 선택하였다.(Fig. 2)

5. 영상 처리

획득된 모든 관심 영역 영상은 White와 Rudolph⁷에 의해 고안된 방법을 이용하여 처리하였다. 우선 가우시안 필터(Gaussian filter=35 pixel)를 적용시켜 미세한 구조를 제거하고 흑화도 차이가 큰 구조만 남도록 하였다. 이렇게 필터

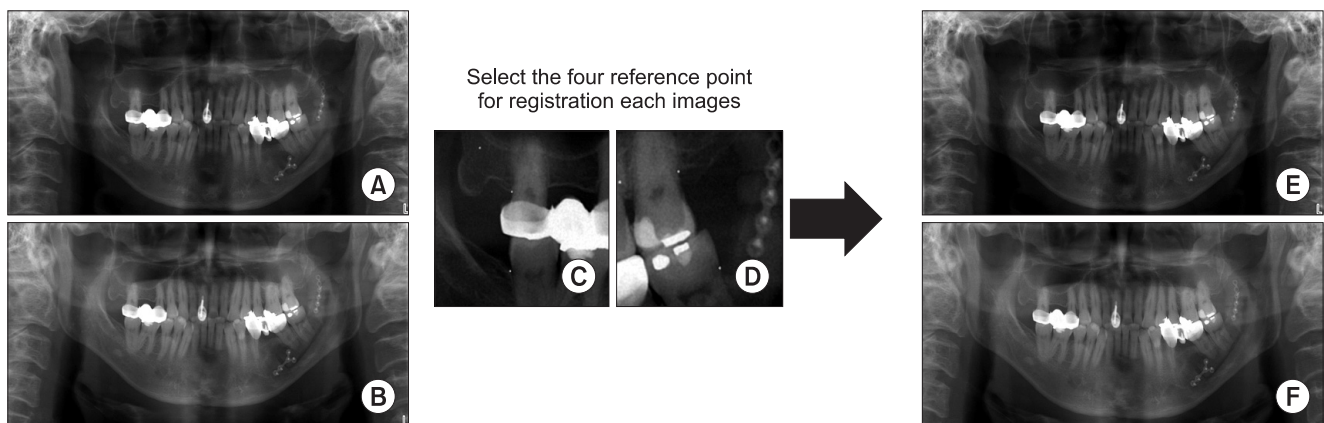


Fig. 1. Image registration processing by image subtraction tool program (Sunny, Biomedisys Co. Ltd., Seoul, Korea). A, B. Before registration. C, D. Reference point selection. E, F. After registration.

Hun-Jun Lim et al: Study on bone healing process following cyst enucleation using fractal analysis. J Korean Assoc Oral Maxillofac Surg 2011



Fig. 2. Selection of region of interest. A. Selection of lesion region of interest (ROI). B. Selection of control ROI.
Hun-Jun Lim et al: Study on bone healing process following cyst enucleation using fractal analysis. J Korean Assoc Oral Maxillofac Surg 2011

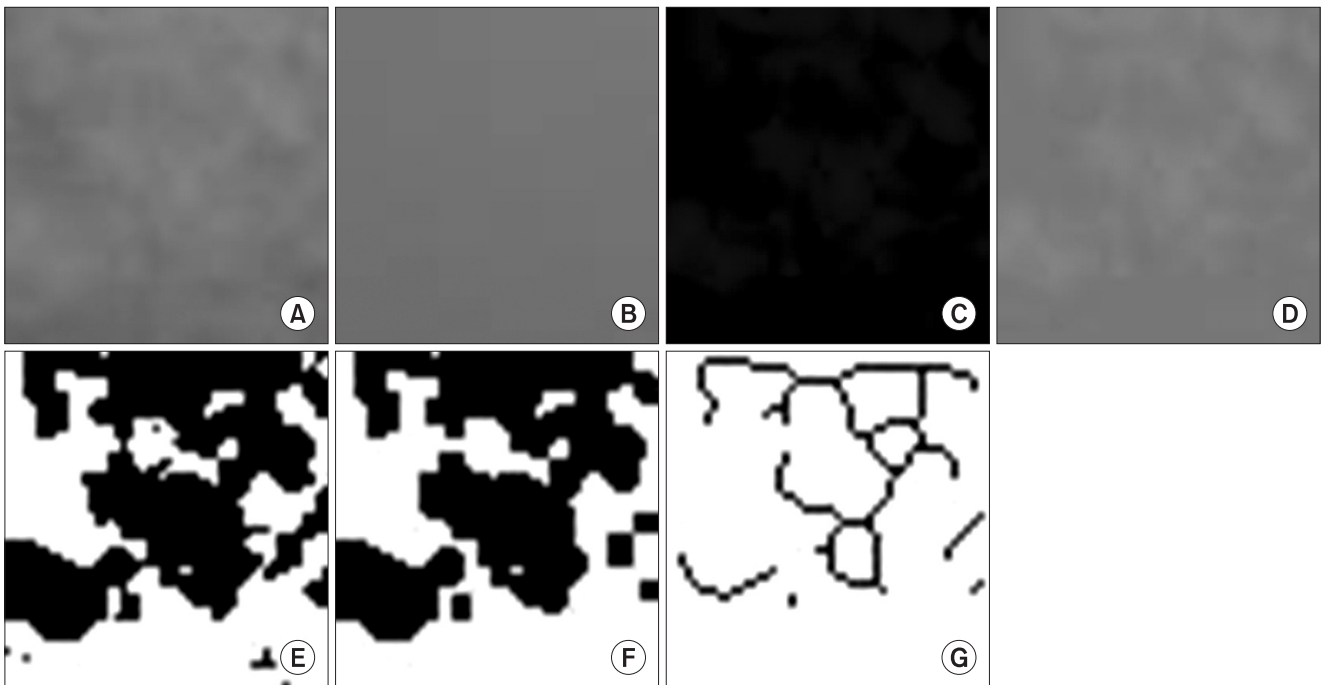


Fig. 3. Image processing. A. Original region of interest image. B. Gaussian blurring. C. Subtract between (A) and (B). D. Add 128. E. Conversion to binary image. F. Erode and dilation. G. Skeletonize.
Hun-Jun Lim et al: Study on bone healing process following cyst enucleation using fractal analysis. J Korean Assoc Oral Maxillofac Surg 2011

를 적용한 이미지를 원래의 영상에서 공제(subtraction)한 후, 128을 가산(add)하였고, 이진화 영상(binary image)으로 만들었다.

이 이진 영상을 침식 연산(erosion)과 팽창 연산(dilation)으로 노이즈(noise)를 감소시켜 복잡한 골소주 분할 영상을 단순화시킨 후 골격선에 불필요하게 가지가 많이 생기는 현상을 피하고자 hit or miss transformation에 의한 골격화 영상(skeletonized image)으로 전환하였다(Image J program ver 1.42q, National Institutes of Health, Bethesda, MD, USA).(Fig. 3)

6. 프랙탈 차원 분석

영상 처리를 통해 얻어진 영상들을 Image J software ver 1.42q (National Institutes of Health)를 이용하여 box-counting method로 프랙탈 차원 값을 계산하였다.

7. 통계 처리

낭종 적출술 전과 후 경과시간에 따른 프랙탈 차원의 차

이는 two-way repeated-measures ANOVA로 분석되었다 (SPSS program ver 17.0, SPSS Inc., Chicago, IL, USA).

III. 결 과

총 18명의 환자를 낭종 적출술 전, 술 후 1일, 1개월, 3개월, 6개월, 12개월째에 촬영한 디지털 파노라마 방사선 사진을 이용하여 분석하였다. 환자 연령은 25-69세(평균 연령 44.2세)였으며, 남자가 13명, 여자가 5명이었다. 18명 중 조직검사로 진단된 진단명은 함치성 낭종 7명, 치근 낭종 9명, 치성 각화낭종 2명이었다. 병소의 부위는 상악 전방부 3명, 하악 전방부 3명, 하악 구치부 12명이었다. 모든 환자는 낭종 적출술 시행 후 자가 입자 망상골 이식을 시행하였다.

환자들의 수술 전 관심영역의 평균 프랙탈 값은 1.108±0.097였고, 술 후 1일째 증가(1.175±0.139)하였다가, 술 후 1개월째 다시 감소(1.126±0.117)하였고, 그 후 3개월(1.166±0.101), 6개월(1.217±0.108), 12개월(1.259±0.065)째에 증가하는 양상을 보였다. 술 후 12개월째의 프랙탈 값은 대조군인 정상 악골의 관심 영역의 프랙탈 값(1.259±0.055)과 유사하였다.(Table 1)

각 환자별로 술 전 프랙탈 값과 비교하여 술 후 프랙탈 값의 변화를 비교하였을 때, 술 후 1일과 술 전의 프랙탈 값의 차이는 -0.067±0.147이었고, 술 후 1개월은 -0.029±0.150, 술 후 3개월은 -0.067±0.095, 술 후 6개월은 -0.112±0.108, 술 후 12개월은 -0.149±0.092였다. 술 전과 비교하여 술 후 1일째 프랙탈 값이 감소하였다가 술 후 1개월째부터 프랙

Table 1. The change of fractal dimension over time

Time	Average	Standard deviation	95% confidence interval	
			Minimum	Maximum
Pre-operative	1.108	0.097	1.059	1.156
Post 1 day	1.175	0.139	1.106	1.244
Post 1 month	1.126	0.117	1.064	1.188
Post 3 months	1.166	0.101	1.114	1.218
Post 6 months	1.217	0.108	1.157	1.276
Post 12 months	1.259	0.065	1.224	1.293

Hun-Jun Lim et al: Study on bone healing process following cyst enucleation using fractal analysis. J Korean Assoc Oral Maxillofac Surg 2011

Table 2. Comparison with pre-operative fractal dimensions

Time (I)	Time (J)	Average difference (I-J)	Standard deviation	P-value
Pre-operative	Post 1 day	-0.067	0.147	0.070
	Post 1 month	-0.029	0.150	0.456
	Post 3 months	-0.067*	0.095	0.010
	Post 6 months	-0.112*	0.108	0.001
	Post 12 months	-0.149*	0.092	0.000

(*P<0.05)

Hun-Jun Lim et al: Study on bone healing process following cyst enucleation using fractal analysis. J Korean Assoc Oral Maxillofac Surg 2011

탈 값의 차이가 증가하여 술 후 6개월, 12개월째에 유의성 있는 차이를 보였다(P<0.05). (Table 2)

각 환자별로 대조군 프랙탈 값과 비교하여 술 후 프랙탈 값의 변화를 비교하였을 때, 대조군과 술 전의 프랙탈 값의 차이는 0.151±0.106이었고, 술 후 1일은 -0.056±0.157, 술 후 1개월은 0.133±0.139, 술 후 3개월은 0.100±0.103, 술 후 6개월은 0.049±0.115, 술 후 12개월은 -0.006±0.074였다. 대조군과 비교하여 술 후 1일째에 프랙탈 값이 증가하였다가 다시 1개월째 감소하였으며 이후 3, 6, 12개월째 프랙탈 값이 지속적으로 증가하였고 술 후 6, 12개월째의 프랙탈 값이 대조군과 통계학적으로 유의성있게 유사함을 나타냈다 (P>0.05). (Table 3)

IV. 고 찰

골 구조 및 낭종 병소의 치유를 평가하기 위한 방법은 다양하다. 골의 미세 구조는 일반적으로 조직형태학적으로 평가되어야 하나 임상적으로 부적합한 침습적인 골 생검을 시행해야 한다는 단점이 있다. 일반 방사선 사진은 골 조직을 평가하는 데 빠르고 비침습적이어서 유용하면서 저렴한 방법이지만, 방사선 사진으로 골 구조를 평가하기 위해서는 30% 이상의 무기질 소실이 있어야 흑화도 차이를 구분할 수 있다는 문제점이 있다⁸.

골 구조 평가를 위한 광학 밀도(optical density)나 방사선 사진을 통과하는 투과율(level of light transmittance)을 측정하는 X선미량 밀도측정(microdensitometry)은 민감도가 떨어지는 측정법으로 방사선 기기의 조작에 따라 현저한 차이를 나타낸다⁹.

또한 디지털 영상공제술(digital subtraction radiography)은 시간 경과에 따라 촬영된 방사선 사진을 중첩시켜 흑화도의 상대적 변화를 측정할 수 있으나, 일련의 방사선 사진을 동일하게 촬영하는 특별한 장치가 필요하고 상대적인 변화만을 감지할 수 있다¹⁰. 낮은 선량의 방사선을 골에 직접 조사시켜 통과하는 양을 측정하여 밀도를 계산하는 방법으로 흡수계측법(absorptiometry)이 있다. 그러나 골밀도

Table 3. Comparison with control group fractal dimensions

Time (I)	Time (J)	Average difference (I-J)	Standard deviation	P-value
Control	Pre-operative	0.151	0.106	0.000
	Post 1day	0.088	0.146	0.024
	Post 1 month	0.133	0.139	0.002
	Post 3 months	0.100	0.103	0.001
	Post 6 months	0.049*	0.115	0.132
	Post 12 months	-0.006*	0.074	0.754

(*P>0.05)

Hun-Jun Lim et al: Study on bone healing process following cyst enucleation using fractal analysis. J Korean Assoc Oral Maxillofac Surg 2011

를 측정하는 이 방법은 후향적으로 사용할 수 없고, 공제술처럼 밀도의 상대적인 변화만을 감지할 수 있다.

방사선 사진 영상에서 판독의 정량화 및 객관화를 위해 텔레비전 방사선 평가, 비디오 밀도측정(videodensitometry)에 의해 방사선 사진의 농도를 측정하여 정량화하려는 시도가 있었으나 여러 가지 한계에 부딪혔다^{9,11}.

1983년 Mandelbrot¹²는 골 구조의 자기유사성(self-similarity)을 보이는 구조를 정량화하여 소수차원으로 구하여 이를 통해 구조의 복잡도를 비교하는 수단으로 프랙탈 분석법을 소개하였다. 프랙탈의 수학적 속성은 확대나 축소에 관계없이 동일한 모양의 프랙탈 형태를 나타낼 수 있으며 프랙탈 도형의 특징은 프랙탈 차원을 갖는다는 것이다. 대상의 복잡도가 증가할수록 프랙탈 차원은 더 커지게 된다. Ruttimann 등¹³은 치조골을 탈회시키기 전과 후의 프랙탈 값을 구하여 탈회 후 프랙탈 값이 증가한다고 보고한 이후 골소주의 형태가 프랙탈 구조를 이루고 있음을 주목하게 되었다. 골밀도와 골소주의 방향의 변화는 비선형적이고 무질서한데 프랙탈 기하학은 구조물의 형태가 균일하고 규칙적이지 않더라도 구조물을 기하학적 용어로 정량화하여 특성을 표현할 수 있게 해준다¹⁴.

Lee 등¹⁵은 소의 장골을 탈회시켜 프랙탈 값을 비교한 결과 탈회가 진행됨에 따라 프랙탈 값이 감소한다고 보고하였다. Khosrovi 등¹⁶은 치주질환에 이환된 치조골이 정상 치조골과 비교하여 프랙탈 값이 더 작다고 보고하였다. Tosoni 등¹⁷은 파노라마 방사선 사진에서 정상과 골다공증 가능성이 있는 군의 하악각 부위에서의 프랙탈 값의 비교 연구를 시행하여 골다공증 의심군이 정상 군에 비해 프랙탈 값이 낮음을 보고하였다.

이 후 많은 연구들에서 프랙탈 분석이 골 변화를 인지하는데 유용한 방법이라는 것이 입증되었으나 이 분석을 디지털 영상분석의 정확한 정량적 분석방법이라고 하기에는 문제점이 있다¹⁸. 프랙탈 분석방법은 대상의 특성에 따라 다양하여 caliper method, tile counting method, pixel dilation method, box counting method, intensity variance method, hurst method, variation method, blanket method 및 spatial and spectral method 등 많은 방법들이 있다^{19,20}. 이상의 방법들이 연관성이 있기는 하지만 모두 같은 결과를 나타내지 않고, 대상의 이상적인 프랙탈 성질을 가질 때에만 결과가 같게 된다¹⁸. Southard 등²¹은 방사선사진 촬영 시 적은 양의 기하학적 요인도 프랙탈 차원에 영향을 줄 수 있다고 하였고, Shroud 등^{22,23}은 관심 영역의 크기와 모양이 프랙탈 차원의 값에 영향을 미친다고 하였다. 또한 프랙탈 분석 시 관심 영역을 동일한 좌표값에 설정하는 것이 어렵다는 보고도 있다²⁴. Majumdar 등²⁵은 프랙탈 차원값은 해상도가 감소할수록 감소하게 된다고 하였다.

이번 연구에서는, 분석결과 관심영역의 프랙탈 값들이 술 전과 비교하여 술 후 1일째 증가하였다가 술 후 1개월째

다시 감소한 후 지속적으로 증가하여 술 후 6, 12개월째 통계학적으로 유의성 있는 차이를 보였다. 술 후 1일째 프랙탈 값이 일시적으로 증가한 것은 자가 망상골 이식으로 인한 관심 영역의 골소주와 골수강의 구조가 복잡해짐에 의한 것으로 생각되며, 이식된 골의 흡수에 따라 감소하였다가 골 치유가 되어 감에 따라 증가하는 것으로 생각된다. 또한 대조군인 정상 영역과 비교하였을 때, 술 후 6, 12개월째의 프랙탈 값이 대조군과 유사함을 나타내어 골 치유가 정상에 가깝게 이루어졌음을 확인했다.

끝으로, 이번 연구에서는 종전의 시각적 판단에 의한 방사선 사진 판독의 단점을 보완하여, 프랙탈 차원의 값을 계산하여 낭종 적출술 후 골 치유에 대해 정량적으로 분석하여 치유 양상과 프랙탈 분석의 유효성을 검증하였다. 결론적으로 프랙탈 분석으로 낭종 적출술 후의 골 치유에 대한 변화를 정량적으로 인지할 수 있었다. 향후 프랙탈 분석에 사용되는 관심 영역의 정확한 선택 방법에 대한 보완이 이루어진다면 방사선학적 분석에 있어서 유용한 방법으로 확립될 수 있을 것이다.

V. 결 론

악골 낭종 적출술을 시행한 18명의 환자를 대상으로 하여 치료 전과 술 후 1일, 1, 3, 6, 12개월의 디지털 파노라마 방사선 영상을 이용하여 프랙탈 분석법에 의하여 골 치유 양상을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 낭종 적출술 후 술 전과 비교하여 관심 영역의 프랙탈 값은 술 후 6, 12개월에서 유의성 있게 증가하였으며, 이는 프랙탈 값과 골 변화 사이에 상관 관계가 있음을 나타낸다.
2. 대조군과 비교하여 술 후 6, 12개월의 프랙탈 값이 유사함을 보여 골 치유가 정상에 가깝게 이루어졌음이 확인되었다.
3. 프랙탈 분석법은 악골의 골 치유에 대한 방사선학적 변화의 정량적 평가에 있어서 유용한 방법이다.

프랙탈 분석을 이용한 디지털 파노라마 영상의 분석은 시각적 판독의 주관적 판단의 개입과 흑화도 만으로 평가하는 방법의 단점을 보완하여 골 치유 양상을 정량적으로 보여준다. 향후 프랙탈 분석이 좀 더 객관적이고 신뢰할 만한 결과를 얻기 위해 관심 영역의 정확한 설정을 위한 방법 연구 및 프랙탈 값에 영향을 주는 변수에 대한 연구가 더 필요할 것이고, 복잡한 이미지 처리를 단순화해 주는 프로그램의 개발이 이루어진다면 방사선학적 영상 분석에 있어서 가장 좋은 방법 중 하나가 될 것이다.

References

1. Peterson LJ. Contemporary oral and maxillofacial surgery. 4th ed.

- St. Louis: Mosby; 2003:489-91.
- Goaz PW, White SC. Origin of dental radiology. *Oral Radiology: Principals and Interpretations*. 2nd ed. St. Louis: Mosby; 1987:86-9.
 - Nicopolou-Karayianni K, Bragger U, Patrikiou A, Stassinakis A, Lang NP. Image processing for enhanced observer agreement in the evaluation of periapical bone changes. *Int Endod J* 2002;35:615-22.
 - Orstavik D. Radiographic evaluation of apical periodontitis and endodontic treatment results: a computer approach. *Int Dent J* 1991;41:89-98.
 - Kerosuo E, Orstavik D. Application of computerised image analysis to monitoring endodontic therapy: reproducibility and comparison with visual assessment. *Dentomaxillofac Radiol* 1997;26:79-84.
 - Jorge EG, Tanomaru-Filho M, Gonçalves M, Tanomaru JM. Detection of periapical lesion development by conventional radiography or computed tomography. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2008;106:e56-61.
 - 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.
 - Brynmolf I. Radiography of the periapical region as a diagnostic aid. II. Diagnosis of pulp-related changes. *Dent Radiogr Photogr* 1979;52:25-47.
 - Kälebo P, Strid KG. Radiographic videodensitometry for quantitative monitoring of experimental bone healing. *Br J Radiol* 1989;62:883-9.
 - Kim EK. Contrast and geometric correction of non-standardized radiographs in digital subtraction radiography. *J Korean Periodontol* 1998;28:797-809.
 - Kasle MJ, Klein AI. Television radiographic evaluation of periapical osseous radiolucencies. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1976;41:789-96.
 - Mandelbrot BB. *The fractal geometry of nature*. 2nd ed. New York: W. H. Freeman; 1983.
 - 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.
 - Weibel ER. Fractal geometry: a design principle for living organisms. *Am J Physiol* 1991;261:L361-9.
 - Lee KI, Choi SC, Park TW, You DS. Fractal dimension calculated from two types of region of interest. *Dentomaxillofac Radiol* 1999;28:284-9.
 - Khosrovi PM, Kahn AJ, Majumdar HK, Genant CA. Fractal analysis of dental radiograph to assess trabecular bone structure. *J Dent Res* 1994;73:173.
 - Tosoni GM, Lurie AG, Cowan AE, Burleson JA. Pixel intensity and fractal analyses: detecting osteoporosis in perimenopausal and postmenopausal women by using digital panoramic images. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2006;102:235-41.
 - Lee JM, Park H, Jeong HG, Kim KD, Park CS. Bony change of apical lesion healing process using fractal analysis. *J Korean Oral Maxillofac Radiol* 2005;35:91-6.
 - Geraets WG, van der Stelt PF. Fractal properties of bone. *Dentomaxillofac Radiol* 2000;29:144-53.
 - Cha SY, Han WJ, Kim EK. Usefulness of fractal analysis for the diagnosis of periodontitis. *Korean J Oral Maxillofac Radiol* 2001;31:35-42.
 - 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.
 - 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.
 - 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.
 - Baek JW, Seok M, Lee ES, Jang HS, Rim JS. Radiologic assessment of bone healing by fractal analysis after the treatment of jaw bone cyst by decompression. *J Korean Oral Maxillofac Surg* 2007;33:494-8.
 - Majumdar S, Weinstein RS, Prasad RR. Application of fractal geometry techniques to the study of trabecular bone. *Med Phys* 1993;20:1611-9.