

대퇴 근위부의 골소주 패턴에 대한 복합적인 분석을 통한 골다공증 예측 연구

이 주 환[†] · 박 성 윤^{††} · 정 재 훈^{††} · 김 성 민^{†††}

요 약

본 연구에서는 각기 다른 측정 부위에서 도출된 골밀도와 골소주 패턴 간의 상관관계를 복합적으로 분석하여 측정부위에 따른 평가변수의 골다공증 예측 가능성을 평가하고자 하였다. 실험대상은 40대 이상의 폐경기 이후 여성 40명을 선정하였고, T-Score 분류법에 따라 각각 20명의 정상군 및 골다공증군으로 분류하였다. 실험대상의 골밀도는 이중 에너지 X선 흡수 계측법을 통해 대퇴경부(Femoral Neck), 전자부(Trochanter) 및 워드 삼각부(Ward's Triangle)에서 측정하였다. 또한 각 측정부위에 50x50 픽셀 크기의 관심영역을 지정하고, 기존 연구에서 제안된 영상처리기법을 적용하여 각 영역의 골소주 패턴을 추출하였다. 골다공증을 예측하기 위한 평가변수는 구조적 변수(평균 회색조, 골면적, 골돌레, 골두께, 말단거리), 골격화 변수(골개수, 골길이) 및 프랙탈 차원(fractal dimension)으로 구분되는 총 8가지를 선정하였다. 실험결과, 골면적, 골돌레, 골두께, 말단거리, 골개수, 골길이 및 프랙탈 차원이 골밀도를 유의하게 반영하였고($p < 0.003$), 평가변수의 분석을 통한 골다공증의 높은 예측 가능성을 확인하였다.

키워드 : 골다공증, 골소주 패턴, 골밀도, 프랙탈 차원

Prediction of Osteoporosis using Composite Analysis of Trabecular Patterns on Proximal Femur

Ju-Hwan Lee[†] · Sung-Yun Park^{††} · Jae-Hoon Jeong^{††} · Sung-Min Kim^{†††}

ABSTRACT

The purpose of this study was to determine the evaluation parameters' osteoporosis predictability in accordance with measuring regions by analyzing the correlations between bone mineral density and trabecular patterns derived from different measuring regions. Experimental subjects were a total of 40 female patients after menopause aged over 40 years, and were classified into 20 control and 20 osteoporotic groups according to the T-score. Bone mineral density was measured on femoral neck, trochanter and ward's triangle by DEXA(Dual Energy X-ray Absorptiometry). We designated ROI(Region of Interest) with 50 x 50 pixel size on each measuring regions, and extracted trabecular patterns by using existing image processing method. We also selected a total of eight evaluation parameters that are categorized into structural(mean gray level, area, perimeter, thickness and terminal distance), skeletonized parameters(number, length) and fractal dimension. As a result, it was observed that area, perimeter, thickness, terminal distance, number, length and fractal dimension reflected the bone mineral density with high statistical validity($p < 0.003$). We also confirmed that the evaluation parameters could predict the osteoporosis more efficiently.

Keywords : Osteoporosis, Trabecular Pattern, Bone Mineral Density, Fractal Dimension

1. 서 론

골다공증은 골강도의 약화로 골절 위험이 증가된 질환으로 정의되고, 평균 수명의 증가와 함께 가장 빈번한 노인성

골질환으로 대두되고 있다[1][2][3]. 일반적으로 노화에 따른 칼슘 섭취와 흡수율의 감소는 골량의 감소를 유발하여 골밀도(Bone Mineral Density, BMD)를 크게 감소시킨다. 골량을 결정하는 가장 중요한 요인은 성별로, 여성의 경우 폐경 후 5-10년 동안 골 감소율이 2-4배 가량 증가한다[4]. 이에 따라, 골다공증은 폐경 이후의 여성에게서 가장 빈번하게 발생하는 것으로 알려져 있다[4].

골밀도 측정방법은 이중광자 흡수 측정법(Dual Photon Absorptiometry, DPA), 이중 에너지 X선 흡수 계측법(Dual

† 준 회 원 : 동국대학교 의생명공학과 석박사 통합과정
†† 준 회 원 : 동국대학교 의생명공학과 박사과정
††† 정 회 원 : 동국대학교 의생명공학과 정교수(교신저자)
논문접수 : 2011년 3월 2일
수 정 일 : 1차 2011년 6월 27일, 2차 2011년 9월 8일
심사완료 : 2011년 9월 20일

Energy X-ray Absorptiometry, DEXA) 및 정량적 전산화 단층촬영법(Quantitative Computed Tomography, QCT) 등으로 구분된다[5]. 이 중 DEXA를 통해 요추 및 대퇴부의 골밀도를 측정하여 골다공증 여부를 판단하는 것이 가장 일반화된 진단 방법이다[6]. DEXA는 오차율 3% 이내의 비교적 높은 정확도를 제공하고[7], 측정이 용이하여 골다공증을 판단하기 위한 우수성 모델(Gold Standard)로 간주되어 왔다[8]. 그러나 DEXA를 이용한 골다공증 측정법은 방사선 피폭에 의해 인체에 유해한 영향을 미치는 단점이 있다. 또한 골밀도는 골다공증에 의한 골절 여부를 완벽하게 예측하지 못하고, 인종에 따라 골다공증 예측 정확도가 다르게 나타난다[9][10][11]. 이에 따라, 골밀도 뿐 아니라 골구조(Bone Architecture)의 특성을 이용하여 골다공증을 예측하고자 하는 연구가 진행되었다[12][13]. 특히, 골소주의 형태학적 특성을 정량화하는 연구는 1987년 Parfitt[14] 등에 의해 처음 보고된 이래로 현재까지도 활발하게 이루어지고 있다.

Geraets[15] 등은 DPA를 통해 추출된 해면골 영상에 고역 및 저역통과필터를 적용하여 잡음을 제거하고, 분할 알고리즘을 통해 골소주 패턴을 추출하였다. White[16] 등은 DEXA를 통해 획득한 골소주 영상에 영상 처리 기법을 적용하여 골소주의 이원화 영상과 골격화된 영상을 획득하였고, 구조적 변수와 골다공증 간의 유의성을 분석하였다. Matsubara[5] 등은 골소주 영상에 형태학적 필터링 방법을 적용하여 이원화 영상을 획득하고, 이원화 영상의 구조적 특성을 정량화하기 위해 Star Volume 분석을 수행하였다. 또한 파괴시험(Breaking Test)을 통해 골강도를 측정하고, 골소주에서 도출된 평가변수와 상관관계를 분석하였다. 반면, Pothuaud[17] 등은 골소주가 전형적인 프랙탈 구조(Fractal Structure)를 나타내는 것을 이용하여 프랙탈 차원 기법을 통해 골다공증을 예측하고자 하였다. 이와 유사하게 Chappard[18] 등은 골다공증 예측 정확도를 향상시키기 위해 골소주의 구조적 특성과 프랙탈 차원 간의 상관관계를 분석하였다. 이와 같이, 골소주의 특성을 정량화하기 위한 연구는 이원화 영상에 대한 구조적 특성 분석 방법과 골격화 영상을 분석하는 골격화 분석 방법, 그리고 프랙탈 차원 분석 방법으로 구분된다. 본 연구에 대한 선행 연구에서는 이러한 분석 방법을 이용하여 골소주 패턴 및 근위 대퇴부의 형태학적 특성에 대한 상관관계를 분석하였다[19]. 그러나 선행 연구는 각 측정부위에 대한 평가변수 간의 상관성

은 배제하고, 선정된 평가변수에 대한 유의성만을 분석하여 골다공증 예측에 대한 낮은 신뢰도를 나타내었다.

기존 연구에서는 골소주의 특성 분석을 통해 골다공증을 예측하기 위한 가능성을 제시하였다. 그러나 골밀도의 측정 부위에 따른 골소주 특성의 변화 양상과 골밀도 사이의 상관관계에 대한 연구는 활발하게 이루어지지 않고 있다. 일반적으로 대퇴부의 해면골 비율은 대퇴경부(Femoral Neck)에서 25%, 전자부(Trochanter)에서 50%, 워드 삼각부(Ward's Triangle)에서 90%로 나타난다[4][17]. 따라서 해면골과 피질골의 구성 비율이 상이한 부위에 대한 골소주 특성 분석도 반드시 수행되어야 한다. 또한 상당수의 기존 연구들은 구조적 특성 분석과 골격화 특성 분석 및 프랙탈 차원 분석을 각각 독립적으로 수행하고 있다. 각 분석 기법들은 골밀도와 높은 상관관계를 나타내어 골다공증을 예측하기 위한 중요한 판단 기법으로 간주된다. 따라서 각 분석 기법에 대한 복합적인 평가를 통해 골다공증을 예측하기 위한 연구도 수행되어야 한다.

본 연구에서는 각기 다른 측정 부위에서 도출된 골밀도와 골소주 패턴의 상관관계를 복합적으로 분석하여 측정부위에 따른 평가변수의 상관관계와 골다공증 예측 가능성을 평가하고자 한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 실험대상, 골밀도 측정방법 및 영상처리방법 등의 실험방법을 제시하고, 3 장에서는 각 측정부위에 대한 평가변수의 골다공증 예측 결과를 서술한다. 4 장에서는 도출된 결과를 분석하고, 마지막으로 5 장에서는 결론을 제시한다.

2. 본 론

2.1 실험대상

본 연구에서는 요추부의 골밀도 검사를 받은 폐경 이후의 여성 40명을 실험대상으로 선정하였다. 실험대상은 병록 기록지를 통해 척추 및 고관절 골절 등의 과거 병력이 없음을 확인하였다. 총 40명의 실험대상은 세계보건기구(World Health Organization, WHO)의 T-score에 따른 골다공증 분류 기준[20]에 따라 각각 20명의 정상군 및 골다공증군으로 분류되었다. 또한, 방사선 영상에서 화질 저하가 현저하게 나타난 4명의 영상을 제외하고 정상군 18명 및 골다공증군 18명의 총 36명을 최종 실험대상으로 선정하였다. 실험대상의 생리변수는 <표 1>에 나타난 바와 같다.

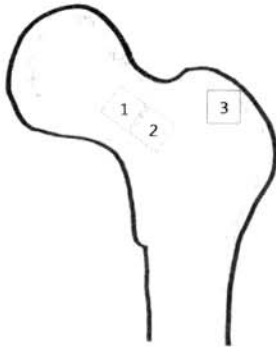
<표 1> 실험대상의 신체 생리 변수

	실험대상(명)	연령(세)	신장(cm)	체중(kg)
정상군	18	52.55±10.27	156.91±4.57	59.55±10.72
골다공증군	18	75.00±7.25	152.47±3.92	52.18±7.86
총계	36	66.18±13.96	154.21±4.66	55.07±9.62

*데이터 : 평균±표준편차

2.2 골밀도 측정

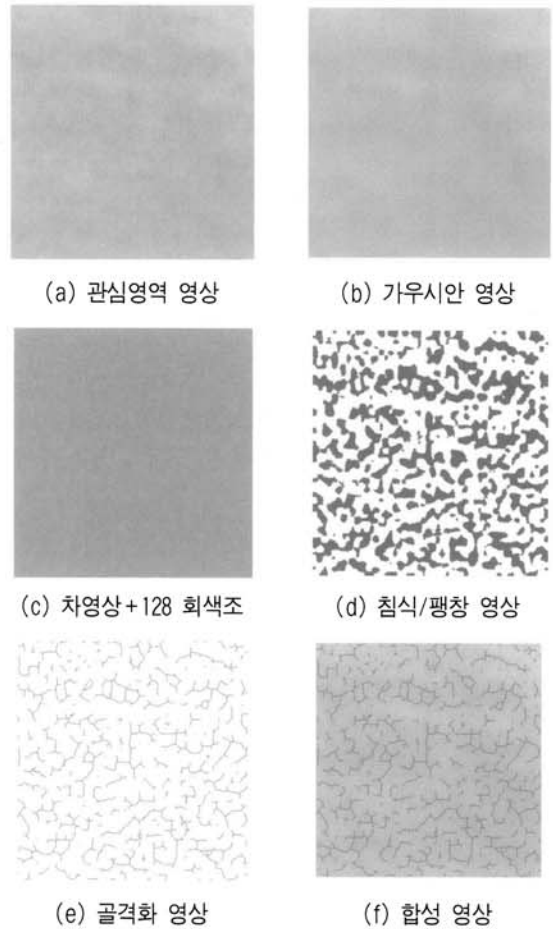
골밀도는 이중 에너지 X선 흡수 계측 장치인 Hologic Delphi W(Hologic, Inc., Waltham, MA, USA)를 이용하여 측정하였다. 또한, 각 측정부위에 따른 평가변수의 통계적 유의성을 검증하기 위해 골밀도를 (그림 1)과 같이 대퇴경부, 전자부 및 위드 삼각부로 구분하여 측정하였다.



(그림 1) 골밀도 측정 부위 (1:대퇴경부, 2:위드 삼각부, 3:전자부)

2.3 영상처리방법

대퇴부 영상에서 골밀도 측정 부위에 대한 골소주 패턴을 추출하기 위해 White 및 Rudolph[16]에 의해 고안된 패턴 추출 기법을 적용하였다. 먼저, 각 측정부위에 50 x 50 픽셀 크기의 관심영역을 설정하고(그림 2(a)), 가우시안 필터(Sigma=10)를 적용하여 (그림 2(b))와 같이 저주파수 특징을 나타내는 잡음이 제거된 흐림 영상을 도출하였다. 다음으로, 영상 내 골소주 패턴의 변화를 효율적으로 반영하기 위해 관심영역 영상과 흐림 영상의 차를 구하였고, 회색조 수준을 표준화하기 위해 도출된 차영상에 128의 회색조[16]를 추가하였다(그림 2(c)). 이를 통해 영상 내 모든 영역의 평균 회색조 값은 원영상에서 나타난 기존의 밝기값을 대신 하여 모두 128로 변환되었다. 변환된 영상은 영상 내 특징 영역과 골소주 패턴을 시각화하기 위해 128의 임계치를 통해 이원화되었다. 또한, 침식(Erosion) 및 팽창(Dilation) 연산을 적용하여 영상에서 독립적으로 나타나는 산탄 잡음(Shot Noise)를 제거하고, 관심영역에 대한 주요 골소주 패턴을 추출하였다(그림 2(d)). 마지막으로, 골소주 패턴의 골격화 영상을 추출하기 위해 픽셀의 중심선이 나타날 때까지 침식연산을 연속적으로 수행하는 골격화 알고리즘을 적용하였다(그림 2(e)). (그림 2(f))는 관심영역 및 골격화 영상의 합성 결과로,



(그림 2) 대퇴경부의 골소주 패턴 추출 영상처리과정

원본 영상의 골소주 패턴을 나타내고 있다. 모든 영상처리과정은 범용 영상처리 프로그램인 Image J 1.42q(National Institutes of Health, USA)를 통해 수행되었다.

2.4 평가변수

평가변수는 다섯 가지의 구조적 변수와 두 가지의 골격화 변수 및 프랙탈 차원의 총 8가지로 구분된다. 먼저, 이원화 영상의 분석을 통해 평균 회색조(Mean Gray Level), 골면적(Area), 골둘레(Perimeter), 골두께(Thickness) 및 말단 거리(Terminal Distance)의 구조적 변수와 프랙탈 차원을 도출하였다. 또한, 골격화 영상에 대한 분석을 통해 골개수(Number) 및 골길이(Length)의 골격화 변수를 도출하였다.

<표 2> 각 실험군에 대한 골밀도 분석 결과

	골밀도(g/cm ²)		
	대퇴경부	전자부	위드 삼각부
정상군	0.866±0.118	0.760±0.121	0.686±0.104
골다공증군	0.475±0.065	0.386±0.078	0.260±0.078
p-value	p<0.001	p<0.001	p<0.001

*데이터 : 평균±표준편차

구조적 변수인 평균 회색조는 (그림 2(a))와 같은 관심영역이 나타내는 평균 회색조 수준으로 영상의 초기 밝기값을 반영한다. 골면적은 이원화 영상 내에 존재하는 검정 픽셀의 평균 개수를 의미하고, 골둘레는 영상 내에서 골소주 영역의 외곽선이 차지하는 픽셀의 평균값을 나타낸다. 또한 골두께는 골소주 영역의 평균 두께를 나타내고, 말단 거리는 임의의 골소주 말단 픽셀과 가장 근접한 골소주 말단 픽셀 사이의 평균 거리를 나타낸다. 골격과 변수인 골개수와 골길이는 각각 골격 영상 내 골격화 요소의 평균 개수와 평균 길이를 의미한다.

본 연구에서는 골소주 패턴에 대한 구조적 및 골격화 분석에 추가적으로 프랙탈 차원 분석을 수행하였다. 프랙탈 차원은 구조의 복잡성을 상대적으로 분석하기 위한 수단으로, 일반적으로 복잡도가 증가할수록 프랙탈 차원도 증가하는 특징을 나타낸다[21]. 골소주는 전형적인 프랙탈 구조를 나타내기 때문에 골소주 패턴에 대한 프랙탈 분석은 골다공

증을 예측하기 위한 평가지표로 활용이 가능하다[22][23]. 기존 연구를 통해 제안된 프랙탈 차원 계산법은 질량-반지름 계산법(Mass Radius Method), 타일 계산법(Tile Counting Method), 박스 계산법(Box Counting Method) 및 푸리에 변환(Fourier Transformation) 등이 존재한다. 특히, 박스 계산법은 가장 유용한 프랙탈 추출 방법으로 광범위한 연구 분야에서 활용되고 있다[18]. 따라서 본 연구에서는 원영상에서 추출된 이원화 영상에 박스 계산법을 적용하여 골소주 패턴에 대한 프랙탈 차원을 계산하였다.

2.5 통계분석

통계분석은 SPSS(Ver. 12.0 for Windows, Chicago, IL, USA)를 기반으로 대응표본 t 검정(Paired t-test) 및 일원배치 분산분석(One-way ANOVA)을 통해 수행하였다. 모든 통계처리의 유의수준은 95%로 지정하였다.

<표 3> 각 실험군에 대한 평가변수 분석 결과(대퇴경부)

		구조적 변수					골격화 변수		프랙탈 차원
		평균회색조	골면적	골둘레	골두께	말단거리	골개수	골길이	
정상군	평균	160.834	542.115	117.025	9.252	19.398	171.235	108.565	1.6961
	표준편차	12.794	64.624	11.366	0.341	1.403	15.226	13.637	0.0110
골다공증군	평균	163.883	587.922	123.455	9.440	20.158	165.000	116.586	1.7017
	표준편차	23.194	120.488	16.934	0.713	1.919	25.527	18.241	0.0155
p-value		0.681	p<0.001	p<0.001	p<0.001	p<0.003	p<0.001	p<0.001	p<0.002

*골면적, 골둘레, 골두께, 말단거리, 골길이 단위 : 픽셀, 골개수 단위 : 개

<표 4> 각 실험군에 대한 평가변수 분석 결과(전자부)

		구조적 변수					골격화 변수		프랙탈 차원
		평균회색조	골면적	골둘레	골두께	말단거리	골개수	골길이	
정상군	평균	146.085	528.409	114.838	9.188	19.398	171.529	109.960	1.6887
	표준편차	31.291	54.394	8.854	0.424	1.191	14.436	8.796	0.0122
골다공증군	평균	164.152	551.195	119.957	9.157	20.161	169.353	113.326	1.6959
	표준편차	20.645	82.010	13.959	0.366	1.832	17.603	13.902	0.0166
p-value		0.193	p<0.001	p<0.001	0.052	p<0.001	p<0.001	p<0.001	p<0.001

*골면적, 골둘레, 골두께, 말단거리, 골길이 단위 : 픽셀, 골개수 단위 : 개

<표 5> 각 실험군에 대한 평가변수 분석 결과(위드 삼각부)

		구조적 변수					골격화 변수		프랙탈 차원
		평균회색조	골면적	골둘레	골두께	말단거리	골개수	골길이	
정상군	평균	154.354	516.345	115.104	8.953	19.680	178.765	105.630	1.6949
	표준편차	16.559	62.401	10.807	0.362	1.533	16.895	11.122	0.0119
골다공증군	평균	159.281	554.253	120.189	9.169	19.985	174.176	112.785	1.7032
	표준편차	22.501	106.497	18.085	0.421	2.008	26.625	18.768	0.0141
p-value		0.436	p<0.001	p<0.001	p<0.001	p<0.001	p<0.001	p<0.001	p<0.001

*골면적, 골둘레, 골두께, 말단거리, 골길이 단위 : 픽셀, 골개수 단위 : 개

3. 실험결과

3.1 정상군과 골다공증군 간의 골밀도 비교

정상군의 골밀도는 <표 2>에 나타난 바와 같이 대퇴경부에서 $0.866 \pm 0.118 \text{ g/cm}^2$, 전자부에서 $0.760 \pm 0.121 \text{ g/cm}^2$, 워드 삼각부에서 $0.686 \pm 0.104 \text{ g/cm}^2$ 로 나타났다. 반면, 골다공증군의 골밀도는 각 측정부위에 따라 각각 $0.475 \pm 0.065 \text{ g/cm}^2$, $0.386 \pm 0.078 \text{ g/cm}^2$ 및 $0.260 \pm 0.078 \text{ g/cm}^2$ 로 도출되었다. 즉, 정상군과 골다공증군의 골밀도는 모두 대퇴경부, 전자부 및 워드 삼각부 순으로 크게 나타났다($p < 0.001$). 또한 골밀도는 모든 측정부위에 대하여 골다공증군 보다 정상군에서 더욱 크게 도출되었다($p < 0.001$).

3.2 정상군과 골다공증군 간의 평가변수 비교

대퇴경부에서 도출된 구조적 변수들은 평균 회색조를 제외하고 모두 높은 유의성($p < 0.003$)을 보이며 정상군 보다 골다공증군에서 더욱 크게 나타났다<표 3>. 평균 회색조는 다른 구조적 변수들과 마찬가지로 골다공증군에서 더욱 크게 나타났지만, p-value가 매우 크게 도출되어($p = 0.681$), 각 실험군 사이의 증가 경향은 통계적으로 무의미하였다. 대퇴경부에 대한 골격화 변수에서는 골개수가 높은 유의성($p < 0.001$)을 보이며 정상군 보다 골다공증군에서 작게 나타

났고, 골길이는 유의한 차이($p < 0.001$)를 보이며 골다공증군에서 더욱 크게 나타났다. 마지막으로 프랙탈 차원도 정상군 보다 골다공증군에서 더욱 크게 도출되었다($p < 0.002$).

전자부에 대한 구조적 변수들은 <표 4>에 나타난 바와같이 골두께를 제외하고 모두 정상군 보다 골다공증군에서 크게 나타났다. 평균 회색조는 정상군 보다 골다공증군에서 더욱 크게 나타났지만, 대퇴경부에서와 마찬가지로 매우 낮은 통계적 유의성($p = 0.193$)을 나타내었다. 또한 골두께는 대퇴경부에서와 반대로 골다공증군에서 더 작게 나타났으나, 감소 추이는 통계적으로 유의하지 않았다($p = 0.052$). 반면, 평균 회색조와 골두께를 제외한 모든 구조적 변수는 매우 높은 통계적 유의성($p < 0.001$)을 나타내었다. 전자부에 대한 골격화 변수에서는 골개수가 대퇴경부에서와 마찬가지로 골다공증군에서 더욱 작게 나타났고, 골길이는 정상군 보다 골다공증군에서 더욱 크게 나타났다($p < 0.001$). 마지막으로 프랙탈 차원도 대퇴경부에서와 마찬가지로 정상군 보다 골다공증군에서 유의한 차이($p < 0.001$)를 보이며 더욱 크게 나타났다.

워드 삼각부에서 나타난 구조적 변수들은 평균 회색조를 제외하고 모두 높은 통계적 유의성($p < 0.001$)을 보이며 정상군 보다 골다공증군에서 크게 나타났다<표 5>. 평균 회색조는 다른 구조적 변수들과 동일하게 정상군 보다 골다공증군에서 더욱 크게 나타났지만, 이에 대한 통계적 유의성은 매우 낮게 도출되었다($p = 0.436$). 반면, 골격화 변수인 골개수와 골길이는

<표 6> 정부위에 대한 평가변수 분석 결과(정상군)

		구조적 변수					골격화 변수		프랙탈 차원
		평균회색조	골면적	골둘레	골두께	말단거리	골개수	골길이	
대퇴경부	평균	163.883	587.922	123.455	9.440	20.158	165.000	116.586	1.7017
	표준편차	23.194	120.488	16.934	0.713	1.919	25.527	18.241	0.0155
전자부	평균	164.152	551.195	119.957	9.157	20.161	169.353	113.326	1.6959
	표준편차	20.645	82.010	13.959	0.366	1.832	17.603	13.902	0.0166
워드 삼각부	평균	159.281	554.253	120.189	9.169	19.985	174.176	112.785	1.7032
	표준편차	22.501	106.497	18.085	0.421	2.008	26.625	18.768	0.0141
p-value		0.772	0.527	0.786	0.213	0.954	0.550	0.783	0.354

*골면적, 골둘레, 골두께, 말단거리, 골길이 단위 : 픽셀, 골개수 단위 : 개

<표 7> 측정부위에 대한 평가변수 분석 결과(골다공증군)

		구조적 변수					골격화 변수		프랙탈 차원
		평균회색조	골면적	골둘레	골두께	말단거리	골개수	골길이	
대퇴경부	평균	160.834	542.115	117.025	9.252	19.398	171.235	108.565	1.6961
	표준편차	12.794	64.624	11.366	0.341	1.403	15.226	13.637	0.0110
전자부	평균	146.085	528.409	114.838	9.188	19.398	171.529	109.960	1.6887
	표준편차	31.291	54.394	8.854	0.424	1.191	14.436	8.796	0.0122
워드 삼각부	평균	154.354	516.345	115.104	8.953	19.680	178.765	105.630	1.6949
	표준편차	16.559	62.401	10.807	0.362	1.533	16.895	11.122	0.0119
p-value		0.151	0.469	0.800	0.061	0.791	0.288	0.530	0.157

*골면적, 골둘레, 골두께, 말단거리, 골길이 단위 : 픽셀, 골개수 단위 : 개

대퇴경부 및 전자부의 결과와 마찬가지로 각각 정상군 및 골다공증군에서 더욱 크게 나타났다($p < 0.001$). 마지막으로 프렉탈 차원도 다른 측정 부위에 대한 결과와 동일하게 정상군보다 골다공증군에서 더욱 크게 나타났다($p < 0.001$).

3.3 측정부위에 따른 평가변수 비교

정상군에서는 <표 6>에 나타난 바와 같이 대퇴경부, 전자부 및 워드 삼각부에서 도출된 구조적 변수들 간의 통계적 유의성이 매우 낮게 나타났다($p > 0.05$). 또한 각 측정부위에 따라 도출된 골격화 변수들 간의 유의성도 낮게 도출되었고($p > 0.005$), 프렉탈 차원도 매우 낮은 통계적 유의성($p = 0.354$)을 나타내었다. 골다공증군에서도 <표 7>에 나타난 바와 같이 각 측정부위에서 도출된 구조적 변수들 간의 유의성과 골격화 변수 간의 유의성 및 프렉탈 차원이 모두 낮은 통계적 유의성($p > 0.05$)을 나타내었다.

4. 결과분석

각 실험군 사이의 골밀도 비교를 통해 골밀도가 골다공증군보다 정상군에서 더욱 크게 나타나는 것을 확인하였다. 골다공증은 골강도의 약화로 인해 골량의 감소를 유발하여 정상인에 비해 골밀도를 크게 감소시킨다. 즉, 정상군과 골다공증군에 대한 골밀도의 유의한 차이는 실험군의 선별에 대한 높은 신빙성을 나타낸다. 또한 골밀도는 정상군과 골다공증군에 대하여 대퇴경부에서 가장 크게 나타났고, 워드 삼각부에서 가장 작게 나타났다. 기존 연구에서는 대퇴경부와 전자부의 골밀도가 가장 정확하게 골다공증을 예측할 수 있고, 워드 삼각부는 대사변화를 잘 반영하여 작은 골밀도를 나타낸다고 하였다[1]. 본 논문의 연구 결과는 이러한 기존 연구의 결과와 매우 높은 유사성을 보이며 높은 신뢰성을 나타내었다.

정상군과 골다공증 간의 평가변수를 비교한 결과, 골개수를 제외한 모든 평가변수가 골다공증군에서 더욱 크게 나타나는 것을 확인하였다. 구조적 변수의 평균 회색조는 모든 골밀도 측정부위에 대하여 정상군보다 골다공증군에서 더욱 크게 나타났으나, 통계적 유의성은 매우 낮게 나타났다. 평균 회색조는 관심영역이 나타내는 평균 밝기 수준으로 실험군의 신체조건과 방사선 영상의 대조도 등에 의해 오차가 발생할 수 있다[24]. 이를 방지하기 위해, 기존 연구에서는 스텝웨지를 사용하여 방사선 영상의 회색조를 표준화시키고 선형 보정(Linear Calibration)을 거쳐 결과를 도출하였다[25]. 그러나 본 연구에서는 관심영역이 나타내는 밝기값을 최대한 반영하기 위해 원영상에서 직접 평균 회색조를 도출하였다. 이에 따라, 평균 회색조에 대한 유의성이 낮게 나타난 것으로 판단된다.

평균 회색조를 제외한 모든 구조적 변수와 골격화 변수는 각 측정부위에 대하여 매우 높은 통계적 유의성($p < 0.003$)을 나타내었다. 또한 각 평가변수의 증가 및 감소 경향도 기존 연구에서 나타난 결과와 유사하게 나타났다[12][17][26]. 다만, 전자부에서 도출된 골두께는 다른 측정부위와 달리 골다공증

군에서 오히려 작게 나타났지만, 이에 대한 통계적 유의성은 매우 낮게 도출되었다. 이를 통해, 구조적 변수인 골면적, 골둘레, 골두께, 말단 거리와 골격화 변수인 골길이는 골밀도가 감소할수록 증가하는 것을 확인하였다. 또한 골격화 변수인 골개수는 골밀도가 감소함에 따라 동일하게 감소하는 것을 확인하였다. 이는 선행연구[19]에서 제시된 연구결과와 비교하여 더욱 높은 통계적 유의성을 나타낸다. 선행연구에서는 대퇴경부의 골면적과 전자부의 골면적, 평균 회색조 및 골둘레만이 골밀도가 감소함에 따라 유의하게 증가한다고 하였다. 또한 대퇴경부와 전자부에서 모두 유의한 차이를 나타낸 평가변수는 골면적이 유일하였다. 그러나 본 연구에서는 대부분의 평가변수가 측정부위에 관계없이 골다공증 예측에 대한 높은 유의성을 나타내었다. 반면, White[16] 등은 상악골과 하악골의 골소주 패턴을 분석한 기존 연구를 통해, 골면적, 골둘레 및 골길이 등의 구조적 변수가 측정부위에 따라 통계적 유의성이 상이하게 나타난다고 보고하였다. 또한 Sakoda[26] 등은 하악골에 대한 골소주 패턴 분석을 통해, 골면적, 골둘레 및 골두께는 골밀도가 감소함에 따라 동일하게 감소한다고 보고하였다. 이처럼, 아직까지는 측정변수에 대하여 상반된 연구결과가 일부 보고되고 있어, 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

프렉탈 차원은 모든 측정부위에 대하여 높은 통계적 유의성을 보이며 골밀도가 감소함에 따라 증가하는 특징을 나타내었다. 선행연구[19]에서는 각 측정부위에 대한 프렉탈 차원의 변화가 매우 낮은 통계적 유의성을 나타내었지만, 본 연구에서는 이와 정반대의 결과가 도출되었다. 이는 Pothuau[17] 등에 의해 언급된 바와 같이 골밀도가 감소함에 따라 영상 표면의 거칠기(Roughness)가 증가하였기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 프렉탈 차원에 대한 통계적 유의성이 높게 나타났음에도 불구하고, 변화량이 상대적으로 매우 작기 때문에 임상에 적용하기에는 한계가 있다고 판단된다. 또한 프렉탈 차원도 구조적 변수 및 골격화 변수와 마찬가지로 골밀도가 감소함에 따라 증가하거나[21][27] 감소한다는[22][28] 상반된 연구결과가 보고되고 있다. 이러한 한계점을 해결하기 위해 광범위한 실험군을 대상으로 프렉탈 차원에 대한 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

마지막으로 선정된 평가변수들이 개별적으로는 골밀도를 유의하게 반영하여 골다공증에 대한 높은 예측 가능성을 나타내었지만, 각 측정부위에 대한 평가변수들 간의 상관관계는 매우 낮게 도출되었다. 일반적으로 각기 다른 부위에서 측정된 골밀도는 높은 상관관계를 나타낸다[29]. 그러나 연령이 증가하고, 골밀도가 감소함에 따라, 각 부위에서 나타나는 골밀도의 감소율은 상이하게 나타난다[29]. 또한 골다공증 환자군에서는 각 측정부위에 따른 골밀도 간의 상관관계가 급격하게 감소하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 선정된 실험대상은 40대 이상의 폐경기 이후 여성으로 연령이 높고, 골밀도도 정상인과 비교하여 현저하게 감소한 상태이다. 따라서 실험대상의 골밀도 감소율은 각 측정부위에 따라 상이하게 나타난 것으로 판단되고, 각 측정부위에 대한 평가변수 간의 통계적 유의성이 낮게 나타난 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 각기 다른 측정 부위에서 도출된 골밀도와 골소주 패턴의 상관관계를 복합적으로 분석하여 측정부위에 따른 평가변수의 상관관계와 골다공증 예측 가능성을 평가하고자 하였다. 골밀도의 측정부위는 대퇴경부, 전자부 및 워드 삼각부로 구분하였고, 평가변수는 구조적 변수, 골격화 변수 등으로 구분되는 총 8가지를 선정하였다. 실험결과를 통해 평균 회색조를 제외한 모든 평가변수들이 측정부위에 관계없이 골밀도의 변화를 유의하게 반영하는 것을 확인하였다. 이를 통해, 선정된 평가변수들에 대한 골다공증 진단의 높은 예측 가능성을 확인하였다.

일반적으로 침식 및 팽창 연산은 원영상의 특징 정보를 손실시키는 단점이 있다. 본 연구에서는 골소주의 주요 패턴을 통해 골다공증의 예측 가능성을 분석하였기 때문에, 미세 골소주 영역은 패턴 추출에서 제외할 수 있었다. 또한 DEXA를 통해 획득된 영상은 제조사 및 사용자 등에 의해 회색조 수준이 상이하게 나타나기 때문에, 일반적으로 원영상에 대한 표준화 작업을 수행한다. 그러나 본 연구에서는 원영상의 회색조 정보를 최대한 반영하기 위해 표준화 과정을 수행하지 않았다.

추후 연구에서는 미세 골소주 영역까지도 분석이 가능하도록 영상의 회색조 수준을 표준화하고 개별적인 임계값 조건을 적용하여 골다공증에 대한 예측 정확도를 평가하고자 한다. 또한 선정된 평가변수들에 대한 임상적 유효성을 확보하기 위해, 광범위한 연령층 및 성별에 따른 골소주 패턴 분석을 수행하고자 한다. 마지막으로 프랙탈 차원에 대한 임상적 활용 가능성을 평가하기 위해 다수의 실험군을 대상으로 추가 연구를 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

[1] J. C. Lin, S. Grampp, T. Link, M. Kothari, D. C. Newitt, D. Felsenberg, S. Majumdar, "Fractal Analysis of Proximal Femur Radiographs : Correlation with Biomechanical Properties and Bone Mineral Density", *Osteoporosis International*, Vol.9, No.6, pp.516-524, 1999.

[2] Consensus Development Conference : Prophylaxis and Treatment of Osteoporosis, *American Journal of Medicine*, Vol.90, No.1, pp.107-110, 1991.

[3] J. A. Kanis, "Diagnosis of Osteoporosis and Assessment of Fracture Risk", *Lancet*, Vol.359, No.9321, pp.1929-1936, 2002.

[4] B. L. Riggs, L. J. Melton, "Evidence for Two Distinct Syndromes of Involutional Osteoporosis", *American Journal of Medicine*, Vol.75, No.6, pp.899-901, 1983.

[5] M. Matsubara, S. Morita, K. Shinomiya, R. Kawamata, K. Nakamura, "Structuring Parameters for Assessment of Bone Quality using a Morphological Filter and Star Volume Analysis : Structuring Property in the Cancellous Bone of the

Human Femoral Head", *Journal of Bone and Mineral Metabolism*, Vol.23, No.1, pp.48-56, 2003.

[6] Y. Hasegawa, K. Kushida, K. Yamazaki, T. Inoue, "Volumetric Bone Mineral Density using Peripheral Quantitative Computed Tomography in Japanese Women", *Osteoporosis International*, Vol.7, No.3, pp.195-199, 1997.

[7] T. Kawashima, H. K. Uthoff, "Pattern of Bone Loss of the Proximal Femur : A Radiologic, Densitometric, and Histomorphometric Study", *Journal of Orthopaedic Research*, Vol.9, No 5, pp.634-640, 1991.

[8] D. J. Sartoris, "Clinical Value of Bone Densitometry", *American Journal of Roentgenology*, Vol.163, No.1, pp.133-135, 1994.

[9] D. W. Dempster, M. W. Ferguson-Pell, R. W. E. Mellish, G. V. B. Cochran, F. Xie, C. Fey, W. Horbert, M. Parisien, R. Lindsay, "Relationships between Bone Structure in the Iliac Crest and Bone Structure and Strength in the Lumbar Spine", *Osteoporosis International*, Vol.3, No.2, pp.90-96, 1993.

[10] M. Dalstra, R. Huiskes, A. Odgaard, L. van Erning, "Mechanical and Textural Properties of Pelvic Trabecular Bone", *Journal of Biomechanics*, Vol.26, No.4-5, pp.523-535, 1993.

[11] S. A. Goldstein, R. Goulet, D. McCubbrey, "Measurement and Significance of Three-Dimensional Architecture to the Mechanical Integrity of Trabecular Bone", *Calcified Tissue International*, Vol.53, No.1, pp.127-132, 1993.

[12] A. Koyama, S. Kumasaka, I. Kashima, "Relationship between Bone Mineral Density and 2D and 3D Structural Parameters of Bone Trabeculae", *Oral Radiology*, Vol.21, No.2, pp. 62-68, 2005.

[13] M. K. Shrout, C. F. Hildebolt, B. J. Potter, T. K. Brunsten, T. K. Pilgram, M. Dotson, N. Yokoyama-Crothers, J. Hauser, S. Cohen, E. Kardaris, R. Civitelli, P. Hanes, "Comparison of Morphological Measurements Extracted from Digitized Dental Radiographs with Lumbar and Femoral Bone Mineral Density Measurements in Postmenopausal Women", *Journal of Periodontology*, Vol.71, No.3, pp.335-340, 2000.

[14] A. M. Parfitt, M. K. Drezner, F. H. Glorieux, J. A. Kanis, H. Malluche, P. J. Meunier, S. M. Ott, R. R. Recker, "Bone Histomorphometry : Standardization of Nomenclature, Symbols, and Units", *Journal of Bone and Mineral Research*, Vol.2, No.6, pp.595-610, 1987.

[15] W. G. M. Geraets, P. F. van der Stelt, C. J. Netelenbos, P. J. M. Elders, "A New Method for Automatic Recognition of the Radiographic Trabecular Pattern", *Journal of Bone and Mineral Research*, Vol.5, No.3, pp.227-233, 1990.

[16] S. C. White, D. J. Rudolph, "Alterations of the Trabecular Pattern of the Jaws in Patients with Osteoporosis", *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontics*, Vol.88, No.5, 1999.

[17] L. Pothuau, E. Lespessailles, R. Harba, R. Jennane, V. Royant, E. Eynard, C. L. Benhamou, "Fractal Analysis of

Trabecular Bone Texture on Radiographs : Discriminant Value in Postmenopausal Osteoporosis”, Osteoporosis International, Vol.8, No.6, pp.618-625, 1998.

[18] D. Chappard, E. Legrand, B. Haettich, G. Chales, B. Auvinet, J. P. Eschard, J. P. Hamelin, M. F. Basle, M. Audran, “Fractal Dimension of Trabecular Bone : Comparison of Three Histomorphometric Computed Techniques for Measuring the Architectural Two-Dimensional Complexity”, Journal of Pathology, Vol.195, No.4, pp.515-521, 2001.

[19] 김성민, 노승규, 노용만, “대퇴부 방사선영상에서 대퇴골 근위부의 형태학적 측정과 골소주의 특성을 이용한 골다공증 예측에 관한 연구”, 대한전기학회논문지, Vol.59, No.4, pp. 823-830, 2010.

[20] World Health Organization Study Group, “WHO Technical Report Series, Assessment of Fracture Risk and Its Application to Screening for Postmenopausal Osteoporosis”, World Health Organization, Geneva, Vol.4, No.6, pp.368-381, 1994.

[21] H. O. Peitgen, H. Jurgens, D. Saupe, “Fractals for the Classroom Part 1 : Introduction to Fractals and Chaos”, New York : Springer-Verlag, 1992.

[22] A. M. Bollen, A. Taguchi, P. P. Hujoel, L. G. Hollender, “Fractal Dimension on Dental Radiographs”, Dentomaxillo facial Radiology, Vol.30, No.5, pp.270-275, 2001.

[23] M. S. Heo, K. S. Park, S. S. Lee, S. C. Choi, J. Y. Koak, S. J. Heo, C. H. Han, J. D. Kim, “Fractal Analysis of Mandibular Bony Healing After Orthognathic Surgery”, Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathodology, Oral Radiology, and Endodontics, Vol.94, No.6, pp.763-767, 2002.

[24] J. B. Payne, R. A. Reinhardt, P. V. Nummikoski, K. D. Patil, “Longitudinal Alveolar Bone Loss in Postmenopausal Osteoporotic/Osteopenic Women”, Osteoporosis International, Vol.10, No.1, pp.34-40, 1999.

[25] R. B. Martin, T. Papamichos, G. A. Dannucci, “Linear Calibration of Radiographic Mineral Density using Video-Digitizing Methods”, Calcified Tissue International, Vol.47, No.2, pp.82-91, 1990.

[26] S. Sakoda, R. Kawamata, T. Kaneda, I. Kashima, “Application of the Digital Radiographic Bone Trabecular Structure Analysis to the Mandible using Morphological Filter”, Oral Science International, Vol.1, No.1, pp.45-53, 2004.

[27] S. K. Chen, C. M. Chen, “The Effects of Projection Geometry and Trabecular Texture on Estimated Fractal Dimensions in Two Alveolar Bone Models”, Dentomaxillo facial Radiology, Vol.27, No.5, pp.270-274, 1998.

[28] K. I. Lee, S. C. Choi, T. W. Park, D. S. You, “Fractal Dimension Calculated from Two Types of Region of Interest”, Dentomaxillo facial Radiology, Vol.28, No.5, pp.284-289, 1999.

[29] J. A. Kanis, L. J. Melton, C. Christiansen, C. C. Johnston, N. Khaltav, “The Diagnosis of Osteoporosis”, Journal of Bone and Mineral Research, Vol.9, No.8, pp.1137-1141, 1994.



이 주 환

e-mail : tupac1969@gmail.com
 2009년 건국대학교 의공학부(학사)
 2009년~현 재 동국대학교 의생명공학과
 석박사 통합과정
 관심분야: 의공학, 영상처리, 신호처리



박 성 윤

e-mail : bmepark@gmail.com
 2005년 건국대학교 의공학부(학사)
 2007년 건국대학교 의공학과(공학석사)
 2010년~현 재 동국대학교 의생명공학과
 박사과정
 관심분야: 의공학, Neural Network,
 생체신호처리



정 재 훈

e-mail : bfsl.jeong@gmail.com
 2008년 건국대학교 의공학부(학사)
 2011년 동국대학교 의생명공학과
 (공학석사)
 2011년~현 재 동국대학교 의생명공학과
 박사과정
 관심분야: 의공학, 재활공학, 신호처리



김 성 민

e-mail : smkim@dongguk.edu
 1985년 연세대학교 전자공학과(학사)
 1987년 연세대학교 전자공학과(공학석사)
 1995년 아이오와대학교 의용공학과
 (공학박사)
 2009년~현 재 동국대학교 의생명공학과
 정교수

관심분야: 의공학, 생체역학, 영상처리, 재활공학