

# 연령과 골소주 특성의 골량에 대한 연관관계

원광대학교 치과대학 구강악안면방사선학교실  
최동훈 · 송영한 · 윤영남 · 이 완 · 이병도

## Relationship of bony trabecular characteristics and age to bone mass

Dong-Hoon Choi, Young-Han Song, Young-Nam Yoon, Wan Lee, Byung-Do Lee

Department of Oral & Maxillofacial Radiology, School of Dentistry, Wonkwang University

### ABSTRACT

**Purpose** : Bony strength is dependent on bone mass and bony structure. So this study was designed to investigate the relationship between the bone mass and bony trabecular characteristics.

**Subjects and Methods** : Study subjects were 51 females (average age 68.6 years) and 20 males (average age 66.4 years). Bone mineral density (BMD, grams/cm<sup>2</sup>) of proximal femur was measured by a dual energy X-ray absorptiometry (DEXA). Regions of interest (ROIs) were selected from the digitized radiographs of proximal femur. A customized computer program processed morphologic operations (MO) of ROIs. 44 skeletal variables of MO were calculated from ROIs on the Ward's triangle and greater trochanter of femur. WHO BMD classes were predicted by MO variables of the same ROI. Classification and Regression Tree analysis was used for calculating weighted kappa values, sensitivity and specificity of MO.

**Results** : The discriminating factors of morphologic operation were branch point, branch point [per cm sq]. Age also played important role in distinguishing osteoporotic classes. The sensitivity of MO at Ward's triangle and Greater Trochanter was 91.8%, 65.6%, respectively. The specificity of MO was 100% at Ward's triangle and Greater Trochanter.

**Conclusion** : Bony trabecular characteristics obtained using radiological bone morphometric analysis seem to be related to bone mass. (*Korean J Oral Maxillofac Radiol* 2006; 36 : 95-101)

**KEY WORDS** : Bone; Femur; Osteoporosis

### 서 론

골다공증은 단위 면적당 골량이 감소되고 무기질 소실이 동반되는 골대사성 질환으로, 골강도의 손상으로 골절의 위험이 상존한다.<sup>1</sup>

골절과 관계되는 골강도는 골밀도와 밀접한 관련이 있으며<sup>2,3</sup> 임상에서 주로 이용되는 방사선학적 골밀도 측정방법으로는 이중에너지방사선흡수계측법 (Dual energy X-ray absorptiometry, 이하 DEXA), 정량적 전산화단층촬영법 (Quantitative computed tomography), 정량적 초음파법 (Quantitative ultrasonography) 등이 있는데 이 중 DEXA로 요추와 대퇴골의 골밀도를 측정하여 전신적인 골다공증

여부를 판단하는 것이 일반적인 골밀도 측정법이다.<sup>4-7</sup>

최근의 연구들에 의하면 골강도에 관여하는 요인에는 골밀도 뿐 아니라 골구조 (bony architecture)의 특성 또한 중요하다고 알려져 있다.<sup>2,8</sup> 골소주의 형태학적 특성들을 조직학적으로 분석하여 골강도와 연관시키는 연구들이 진행되었으며,<sup>9-11</sup> 최근에는 디지털 방사선사진상의 골소주의 형태학적 특성들을 정량적으로 분석하는 방법에 대한 연구들이 활발하다.<sup>12-16</sup> 특히 structuring element를 기반으로 한 mathematical morphology operation (MO)법은 골소주의 골격화된 상 (skeletonized image)으로부터 여러 가지 MO 분석항목 (MO variables) 값을 얻을 수 있으며, 이러한 MO 분석항목은 골다공증 환자와 정상인을 분류하는데 기여한다고 보고된 바 있다.<sup>17</sup>

골소주 조직은 방사선 사진에서 대략적 (macroscopic)으로 평가할 수 있지만, 관찰자간에 평가가 상이하거나, 재현성이 좋지 않은 단점이 있다.<sup>18</sup> Watanabe 등<sup>19</sup>에 의하면

접수일 : 2006년 4월 6일; 심사일 : 2006년 4월 7일; 채택일 : 2006년 5월 14일  
Correspondence to : Prof. Byung-Do Lee  
Department of Oral and Maxillofacial Radiology, College of Dentistry, Wonkwang University, 344-2, Shinyong dong, Iksan city, Chonbuk 570-711, Korea  
Tel) 82-63-850-1912, Fax) 82-63-857-4002, E-mail) eeydo@wonkwang.ac.kr

MO법에 기반한 골격화된 상은 방사선 영상의 흑화도나 대조도에 의해 영향을 받지 않고 추출될 수 있는 장점이 있다고 하였다. Sakoda 등<sup>20</sup>은 골소주의 수, 폭 및 골소주간의 간격 등이 골구조의 지표로 사용될 수 있으며 골소주 수나 골소주 폭이 감소되면 골강도 감소를 초래하며<sup>21</sup> 골소주 간격의 증가는 골대사를 민감하게 반영하는 항목이라고 하였다.

이와 같이 방사선학적으로 골구조를 분석하는 방법은 해당부위 골강도를 예측할 수 있는 가능성 때문에 주목받고 있으며, 골다공증을 진단하는데에도 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

골다공증이 진행될 때 골소주부위와 피질골부위는 골소실 양상이 상이하다고 보고되고 있는데 Riggs 등<sup>22</sup>에 의하면 근위 대퇴골 부위 중에서도 전자부는 50%, Ward's triangle 부위는 약 90%가 해면골로 구성되어 있다고 하였으며 피질골과 수질골 비율이 상이한 경우에도 골밀도와 골소주 특성간의 연관관계가 다양한지에 대해 관심거리라고 생각한다.

본 연구는 골다공증이 의심이 되는 중년이나 노년층 등이 DEXA를 이용하여 요추나 근위 대퇴골 부위의 골밀도를 측정하는 경우가 많고 또한 해당 골조직의 일반 방사선사진이 동시에 촬영된 경우가 많다는 점에 착안하였으며, 골밀도치가 이미 측정되어 있는 근위 대퇴골의 방사선

사진상의 골소주 특성을 정량적으로 분석하여 골밀도와 골소주 특성간의 연관관계를 연구하고자 하였다.

## 대상 및 방법

### 1. 연구대상

원광대학 의과대학 병원에 2001년에 내원하여 골다공증 관련 검사를 받은 환자 중 71명의 대퇴골 방사선사진 및 골밀도 측정치를 후향적으로 조사하였는데 남자 20명, 여자 51명이 연구대상이었으며 평균연령은 남자 66.4세, 여자 68.6세이었다.

위의 연구 대상자들은 이중에너지방사선흡수측정법(DEXA, Hologic, USA)을 사용하여 근위 대퇴골(Proximal femur) 부위의 골밀도( $g/cm^2$ ) 및 T scores가 측정되어 있었으며(Fig. 1), 이 중 대전자부(greater trochanter), Ward's triangle 부위를 각각 관심영역으로 설정하였다. 대퇴골 부위를 이분한 이유는 각 부위의 피질골과 수질골의 성분이 상이하기 때문이었다.

### 2. 모폴로지 기법(Morphologic operation, MO)

근위 대퇴골 대전자부 및 Ward's triangle이 촬영된 일반 방사선사진을 스캐너(Epson GT-9600 scanner, Japan)를 이

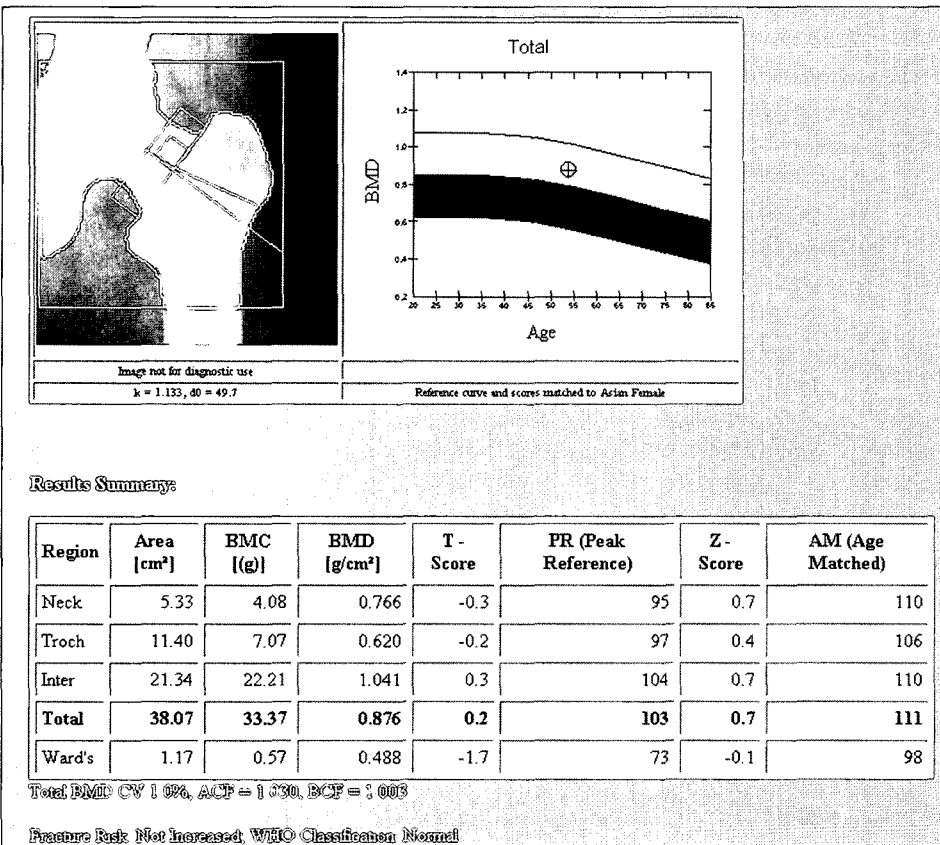
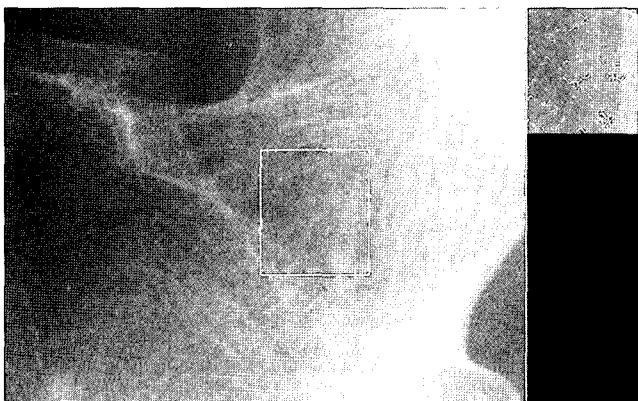


Fig. 1. Bone mineral density (BMD) and T score of proximal femur measured by Dual energy X-ray absorptiometry.

**Table 1.** Some examples of morphologic variables used in this study

Variables	Abbreviation
n pixels in bone in ROI / n pixels in ROI	Ar.B/Ar.RI
n Perimeter pixels of bone / sq cm ROI	Pm/Ar.RI
n Perimeter pixels of bone / sq cm bone in ROI	PmB/Ar.RI
mm tot strut len / sq cm ROI	TSL/Ar.RI
mm tot strut len / sq cm bone	TSL/Ar.B
n Nodes / mm tot Skel strut len	N.Nd/TSL
Node: Terminus ratio	N.Nd/N.Tm
tot num Node-Node struts / tot num struts	N.NdNd/TSN
tot no struts/cm sq Bone	TSN/Ar.B

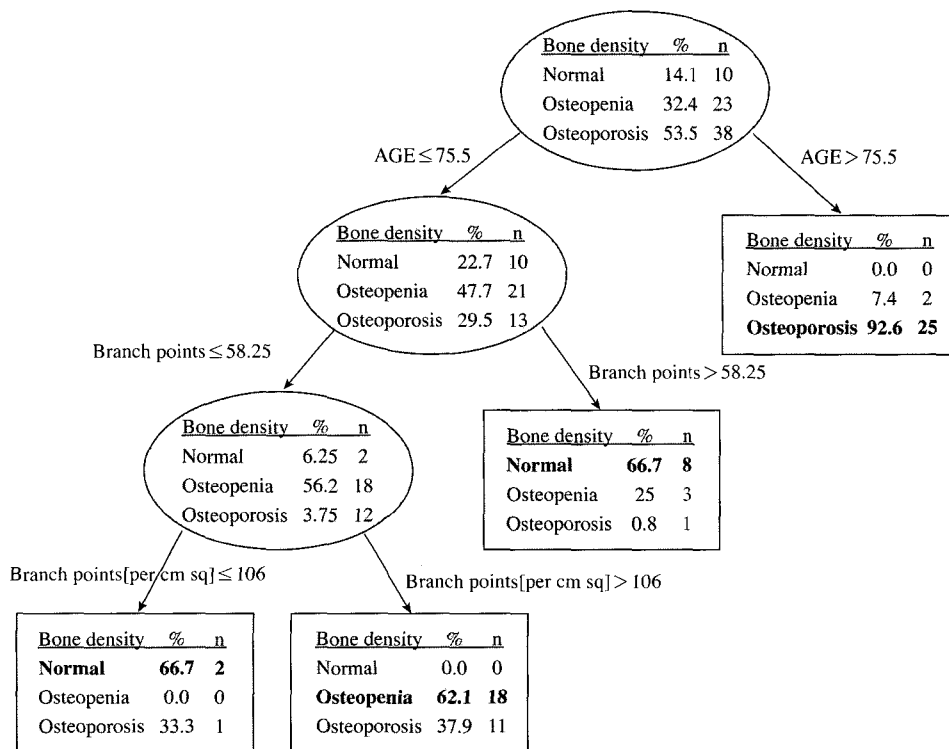


**Fig. 2.** Skeletal images of ROI (region of interest) in the Ward's angle of femur (left: ROI, right: skeletal image of ROI).

용하여 디지털화 하였으며 대전자부 및 Ward's triangle 부위의 관심영역을 컴퓨터에 디지털 방사선사진상의 형태 (JPEG)로 저장하였다. 개인이 개발한 MO 관련 컴퓨터 프로그램을 이용하여 디지털 방사선사진상의 관심영역을 blurring시켰으며 이때 Gaussian filter의 sigma값을 10 정도로 설정하였다. 이 customized program은 본래의 상을 blurring시키고 원래의 상에서 blurring된 상을 subtraction 처리하는 과정 및 이진화된 상과 골격화된 상등이 연속적으로 자동화되어 출력되었으며 (Fig. 2), 골격화된 상으로부터 strut특성을 측정 후 골량과 관련성이 있다고 생각되는 44개의 MO 분석항목치 (Variable values) (Table 1) 또한 자동적으로 표시되도록 설계되어 있었다.

### 3. 통계분석

대퇴골의 대전자부, Ward's triangle 부위의 T score (젊은 건강 성인의 골밀도와 비교해서 표현되는 표준편차)를  $T \geq -1.0$  (정상),  $-1.0 < T < -2.5$  (골감소증),  $T \leq -2.5$  (골다공증군)의 3군으로 분류한 다음 MO 시행한 결과 얻어진 골소주 MO 분석항목치와의 관련성을 조사하였다. 이 관련성을 조사하기 위한 분석방법은 순차적으로 모그룹을 소그룹 (successive group)으로 가장 잘 양분해 줄 수 있는 특정 변수값을 생성하는 CART (classification and regression tree) 분석을 시행하였고, MO 분석 방법의 weighted kappa value 및 민감도와 특이도를 계산하였으며 대퇴골의 대전자부, Ward's triangle 부위를 각각 대상으로 하였다 (Fig. 3).



**Fig. 3.** An example of CART analysis. Total populations (71 individuals) were divided into predicted osteoporosis group and non-osteoporosis group, then non-osteoporosis group was subdivided into normal group and osteopenic group. The discriminating variables were age, branch point and branch point [per cm sq].

**Table 2.** CART classification matrix of Ward's triangle

Predicted category	Actual category			Total
	Normal	Osteopenia	Osteoporosis	
Normal	10	3	2	15
Osteopenia	0	18	11	29
Osteoporosis	0	2	25	27
Total	10	23	38	71

The weighted kappa value was 0.600 (CI=0.441, 0.758).

**Table 3.** CART classification matrix of Greater Trochanter

Predicted category	Actual category			Total
	Normal	Osteopenia	Osteoporosis	
Normal	10	12	9	31
Osteopenia	0	9	4	13
Osteoporosis	0	2	25	27
Total	10	23	38	71

The weighted kappa value was 0.437 (CI=0.291, 0.582).

**Table 4.** Comparison of Ward's triangle and Greater Trochanter

Area	Sensitivity	Specificity	Weighted kappa value	Discriminating variables
Ward's triangle	91.8%	100%	0.600 (CI=0.441, 0.758)	age, branch point, branch point [per cm sq].
Greater trochanter	65.6%	100%	0.437 (CI=0.291, 0.582)	age, branch point [per cm sq].

## 결 과

CART기법을 이용하여 골다공증군을 구분하는데 중요한 MO 분석인자를 조사한 결과, Branch point 및 branch point[per cm sq]가 주요인자로 조사되었으며 환자의 연령 또한 중요한 분류인자이었다(Fig. 3)(Table 4). 그리고 골다공증을 분류하는데 사용된 골소주의 MO 분류법의 민감도는 Ward's triangle 91.8%, 대전자부 65.6%로 Ward's triangle 부위가 높게 나타났고 특이도는 공히 100%로 높게 나타났다. 또한 kappa 가중치 계수는 Ward's triangle 0.600, Greater Trochanter 0.437이었다(Table 2, 3, 4).

## 고 찰

골다공증이 진행이 되면 대퇴골, 척추 뿐만 아니라 중수골, 중족골, 요골, 척골, 상완골, 악골 등 다양한 골조직에서 골밀도 변화를 일으키며<sup>23</sup> 각각의 해당부위를 선택적으로 골밀도 측정을 할 수도 있으나 요추와 대퇴골 부위를 대

상으로 골밀도 측정을 하고 이를 토대로 전신적인 골다공증 여부를 판단하는 경우가 많다.

이러한 골다공증은 일반적으로 estrogen 분비감소로 인한 폐경후 골다공증과 연령증가로 인한 노인성 골다공증, 그 외에 약물 등에 의해 유발되는 특발성 골다공증 등으로 분류될 수 있는데<sup>24</sup> 폐경으로 인한 골다공증은 주로 척추골절과 관련이 있고, 골소주 소실이 균일하지 않은 경향이 있으며, 노인성 골다공증은 수질골 및 피질골의 골소실과 관련이 있으면서, 대퇴골 및 척추 골절과 관계가 깊다고 알려져 있다.<sup>22</sup>

대퇴골 골절은 주로 노년층에 발생하는데, 골절 발생 1년 내에 12-20% 정도 사망하거나 생존하게 되더라도 보행 불편, 골반 동통, 육체적 운동량 감소 등으로 불편을 겪게 된다.<sup>25-27</sup> 이러한 골절은 골밀도와 밀접한 관련이 있으며 이중에너지방사선흡수계측법(DEXA)으로 골밀도 측정시 방사선 조사선량이 적고, 정확도, 편이성 등의 장점이 있다.<sup>28</sup> DEXA 이용 골밀도 측정시 건강 성인의 평균 골밀도치의 편차인 T-scores 혹은 동일 연령의 표준편차인 Z-score를 이용하게 되나<sup>29</sup> 주로 T-score를 이용하는 방법이 선호되고 있으며, 골밀도군을  $T \geq -1.0$  (정상),  $-1.0 < T < -2.5$  (골감소증),  $T \leq -2.5$  (골다공증군)의 3군으로 분류하는 것이 통상적인 방법이다. 그러나 이 분류법은 절대적인 기준을 제시한 것은 아니고, 인종간의 차이나 측정 기계에 의해서도 약간의 오차가 일어날 가능성이 있다고 알려져 있다.<sup>30</sup>

골밀도 측정을 통한 근위 대퇴골의 골량에 대한 연구는 다양하게 보고되어져 왔다. Wahl 등<sup>31</sup>은 dual photon absorptiometry를 사용해 근위 대퇴골 골밀도를 측정하고 결과 Ward's triangle의 골밀도가 greater trochanter, femoral neck 부위의 골밀도와 밀접한 연관성을 보인다고 하였다. Hedlund와 Gallagher<sup>32</sup>는 femoral neck과 Ward's triangle에서는 폐경 전, 후 모두에서 연령증가에 따라 골밀도가 감소하였고, trochanter 부위에서는 폐경 여성에서만 연령증가가 영향을 미쳤다고 하였으며, 또한 폐경 초기에 골밀도 감소가 가장 현저하다고(약 3-10배 저하) 보고한 바 있다.

골구조를 분석하고자 할 때는 피질골보다는 수질골 부위의 골소주 특성을 분석하는 것이 일반적인데 이는 골소주 부위가 빠른 골교체율 덕분에 골소실 정도를 피질골보다 민감하게 표현하는 경향이 있다고 보고되고 있기 때문이며<sup>33</sup> 대퇴골의 여러 부위에서 골밀도 감소율이 다르게 나타나는 것은 이와 관련이 있다고 생각된다. 근래의 골구조 분석법은 골 구조를 관찰하고 정량화하는 방법이 활발하게 연구되고 있으며 특히 MO법을 이용한 분석법이 주목을 끌고 있다.

Fourier,<sup>34</sup> Fractal,<sup>35</sup> Runlength<sup>36</sup> 분석방법 등이 골소주를 정량적으로 분석하는 방법으로 보고되었으나 방사선 영상의 흑화도 재현성에 문제가 있을 수 있고, 이진화 과정(binary processing)에서 임계치 설정과, 노이즈를 제거하는

방법 등이 문제가 될 수 있다. 이에 비해 structural element 를 단위로 MO법에 기반한 골격화된 상은 방사선 영상의 흑화도나 대조도에 영향을 주지 않고 추출될 수 있는 장점이 있다.<sup>19</sup>

MO법을 이용한 골구조에 대한 연구는 근래에 여러 학자들에 의해 구체적으로 진행되고 있다. Watanabe 등<sup>19</sup>은 실험적으로 절단한 골조직을 2mm 단위로 두께 변화에 따라 시편을 준비한 다음 방사선 사진 촬영한 후 morphometric analysis를 시행한 결과 분석 variable과 골두께 사이에는 0.9 이상의 높은 상관관계를 보인다고 하였다. Sakoda 등<sup>20</sup>은 bone morphometric analysis, star volume analysis, node-strut analysis는 골소주의 변화를 잘 반영한다고 하였으며 Kumasaka 등<sup>37</sup>은 MO 분석요인이 두꺼운 골조직에서는 추출이 제대로 되지 않는다고 하였다. 이들의 연구에서는 골소주 두께, 수 및 connectivity 정도를 분석하는 것이 중요 관점들이었으며, 이외에도 골부피, 골소주와 골수강의 비율 등도 주요 관심거리였다. 따라서 본 연구에서는 골밀도를 측정된 근위 대퇴골의 일정 부위를 MO 이용, 골구조 분석하여 골량과 골구조간의 상호 연관성을 조사하는 것이 중요한 연구 목적 중의 하나이었으며 Table 1과 같은 MO 분석요인 44개를 사용하였다. 분석 결과 연령이 골밀도군을 분류하는데 중요한 역할을 하고 있었으며, branch point 또한 효과적인 morphologic variables으로 조사되었다. 골밀도군을 분류하는데 MO 인자의 기여정도를 평가한 선학들의 연구를 살펴보면, Lee와 White<sup>38</sup>의 연구에서는 node: terminus ratio, number of node-terminus struts per mm total strut length 등이 중요인자로 연구된 바 있으며 White와 Rudolph<sup>17</sup>는 24가지 morphologic features를 이용하여 골다공증 환자를 분석한 결과 terminal points 수가 주요 인자라 하였고, sickle cell anemia 환자군에는 skeletal branch points per square centiment가 정상군에 비해 적게 나타난다고 보고한 바 있다.<sup>39</sup> Furuya 등<sup>40</sup>은 node 관련 분석항목치(parameter values)가 커질 수록 connectivity가 증가된다는 것을 의미하고, N.Nd/T.Ar, N.Nd/TSL이 감소되면서 TmTm/T.Ar, TmTm/TSL이 증가된다는 것은 terminal points간의 거리가 증가하여 connectivity가 감소한다는 것을 의미한다고 한 바 있다. 만약 이러한 MO 분석항목이 골수질 구조의 복잡성(complexity)을 대변하는 것이라면 Gowin 등<sup>41</sup>의 연구결과와 부분적으로 일치되는 면이 있으며 앞으로 이에 대한 많은 연구가 진행되는 것이 바람직하다고 사료된다.

골다공증과 연령과는 밀접한 관련성을 보이는 걸로 확인되고 있다. Noble 등<sup>42</sup>은 연령이 증가할수록 골수강 확대율이 감소하고 이는 연령의 증가에 따른 대퇴골 협부에서의 골수강 너비의 확장에 기인한다고 하였으며 60세 이후에 이러한 골수강의 확장이 두드러지게 나타난다고 하였고, Lee와 White<sup>38</sup>의 연구에서도 연령이 가장 중요한 골밀

도 분류요인으로 작용하였다.

연령증가에 따른 골질의 위험성에 대한 연구<sup>40</sup>를 살펴보면, 동일한 골밀도임에도 불구하고 나이가 들에 따라 골질의 위험은 유의하게 증가함을 보였다고 하였으며, Black 등<sup>43</sup>은 연령증가, 체중 감소 등이 골질의 위험성을 증가시킨다고 하였다. 우리 신체는 20-30대에 골밀도가 증가되면서 최대 골밀도를 이루는데 Ortman 등<sup>44</sup>은 대략 35세 정도에 최대 골밀도를 이루며 그 이후에는 점진적인 골소실이 유발된다고 한 바 있다. 또한 여성의 경우에는 폐경에 따른 골소실량이 많으므로 남성에 비해 중년 이후에는 골밀도 유지가 불리한 상황이다. 앞으로 남, 녀로 구분된 연령군을 세분하여 한국인 골밀도를 광범위하게 연구하는 것은 필요한 일이라 하겠다.

신체 부위별로 이러한 분석방법이 유사한 결과를 가져오는가에 대해 연구하기 위해 대퇴골의 대퇴골전자부, Ward's triangle 등을 대상으로 하였는데 이는 수질골의 분포양상이 다르게 조사되고 있기 때문이다. Riggs 등<sup>22</sup>은 해면골과 치밀골의 구성비율이 대퇴골 경부는 약 25:75의 비율로 치밀골의 비율이 높으며, 대퇴골전자부는 50:50, Ward's triangle 부위는 약 90%가 해면골로 구성되어 있다고 한 바 있다. 본 연구에서는 Ward's triangle 부위가 대퇴골 대전자부위보다 민감도 및 Weighted Kappa value가 높게 계산되었으며, 중요인자(discriminating variables)는 유사한 결과를 보였다. 따라서 연구대상 부위가 수질골과 피질골의 구성비율이 다를 경우 골다공증의 예측력은 상이할 수 있다고 생각된다.

본 연구와 유사한 연구가 앞으로 많이 진행되어 만약 골구조의 특징들이 골량의 변화를 비교적 정확하게 예측할 수 있다면, 간단히 방사선 사진을 촬영을 하고 이를 분석함으로써 골다공증의 이환 가능성을 예측할 수 있을 것으로 생각하며 만약 치근단 방사선사진을 이용한 MO 기법이 골량을 정량화 하는데 도움을 주어 골량을 비교 분석하는데 유효하다면 일반 치과 의원에서 전신적인 초기 골다공증을 진단하는데 기여할 것으로 예상된다.

결론적으로 MO 기법을 이용한 본 연구에서 근위 대퇴골 골소주 분석방법은 골밀도 단계군을 분류하는데 높은 민감도와 특이도를 보였으며, 골량과 MO법에 의해 추출된 골소주 특징들간에는 연관관계가 있는 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. NIH Consensus Development Panel on Osteoporosis Prevention, Diagnosis, and Therapy, March 7-29, 2000: highlights of the conference. South Med J 2001; 94 : 569-73.
2. Smith CB, Smith DA. Relations between age, mineral density and mechanical properties of human femoral compacta. Acta Orthop Scand 1976; 47 : 496-502.
3. Genant HK, Engelke K, Fuerst T, Gluer CC, Grampp S, Harris ST, et al. Noninvasive assessment of bone mineral and structure: state of the

- art. *J Bone Miner Res* 1996; 11 : 707-30.
4. Kin K, Kushida K, Yamazaki K, Okamoto S, Inoue T. Bone mineral density of the spine in normal Japanese subjects using dual-energy X-ray absorptiometry: effect of obesity and menopausal status. *Calcif Tissue Int* 1991; 49 : 101-6.
  5. Leszczynski P, Lacki JK, Mackiewicz SH. [Osteoporosis in ankylosing spondylitis: comparison of dual-energy X-ray absorptiometry (DXA) and quantitative ultrasonography (QUS)]. *Przegl Lek* 2003; 60 : 562-4.
  6. Taguchi A, Tanimoto K, Ogawa M, Sunayashiki T, Wada T. Effect of size of region of interest on precision of bone mineral measurements of the mandible by quantitative computed tomography. *Dentomaxillofac Radiol* 1991; 20 : 25-9.
  7. Hasegawa Y, Kushida K, Yamazaki K, Inoue T. Volumetric bone mineral density using peripheral quantitative computed tomography in Japanese women. *Osteoporos Int* 1997; 7 : 195-9.
  8. Consensus development conference: diagnosis, prophylaxis, and treatment of osteoporosis. *Am J Med* 1993; 94 : 646-50.
  9. 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(Pt 3) : 341-9.
  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. *J Bone Miner Res* 1996; 11 : 955-61.
  11. Chappard D, Legrand E, Pascaretti C, Basle MF, Audran M. Comparison of eight histomorphometric methods for measuring trabecular bone architecture by image analysis on histological sections. *Microsc Res Tech* 1999; 45 : 303-12.
  12. 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.
  13. Kashima I. Computed radiography with photostimulable phosphor in oral and maxillofacial radiology. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 1995; 80 : 577-98.
  14. Korstjens CM, Mosekilde L, Spruijt RJ, Geraets WG, van der Stelt PF. Relations between radiographic trabecular pattern and biomechanical characteristics of human vertebrae. *Acta Radiol* 1996; 37 : 618-24.
  15. Shrout MK, Hildebolt CF, Potter BJ, Brunsten TK, Pilgram TK, Dotson M, et al. Comparison of morphological measurements extracted from digitized dental radiographs with lumbar and femoral bone mineral density measurements in postmenopausal women. *J Periodontol* 2000; 71 : 335-40.
  16. Shrout MK, Jett S, Mailhot JM, Potter BJ, Borke JL, Hildebolt CF. Digital image analysis of cadaver mandibular trabecular bone patterns. *J Periodontol* 2003; 74 : 1342-7.
  17. 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.
  18. Kawashima T, Uthoff HK. Pattern of bone loss of the proximal femur: a radiologic, densitometric, and histomorphometric study. *J Orthop Res* 1991; 9 : 634-40.
  19. Watanabe A, Sakurai T, Kumasaka S, Kashima I. Quantitative analysis of bone trabecular structural change using X-ray bone morphometric analysis: a correlation between structural change and structural parameters. *Oral Radiol* 2004; 20 : 49-56.
  20. Sakoda S, Kawamata R, Kaneda T, Kashima I. Application of the digital radiographic bone trabecular structure analysis to the mandible using morphological filter. *Oral Sci Int* 2004; 1 : 45-53.
  21. 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.
  22. Riggs BL, Wahner HW, Seeman E, Offord KP, Dunn WL, Mazess RB, et al. Changes in bone mineral density of the proximal femur and spine with aging. Differences between the postmenopausal and senile osteoporosis syndromes. *J Clin Invest* 1982; 70 : 716-23.
  23. Jensen GF, Christiansen C, Boesen J, Hegedus V, Transbol I. Epidemiology of postmenopausal spinal and long bone fractures. A unifying approach to postmenopausal osteoporosis. *Clin Orthop Relat Res* 1982; 75-81.
  24. Young EA. Nutrition, aging, and the aged. *Med Clin North Am* 1983; 67 : 295-313.
  25. Cumming RG, Nevitt MC, Cummings SR. Epidemiology of hip fractures. *Epidemiol Rev* 1997; 19 : 244-57.
  26. Lofthus CM, Osnes EK, Falch JA, Kaastad TS, Kristiansen IS, Nordsletten L, et al. Epidemiology of hip fractures in Oslo, Norway. *Bone* 2001; 29 : 413-8.
  27. Cummings SR, Kelsey JL, Nevitt MC, O'Dowd KJ. Epidemiology of osteoporosis and osteoporotic fractures. *Epidemiol Rev* 1985; 7 : 178-208.
  28. Lenchik L, Sartoris DJ. Current concepts in osteoporosis. *AJR Am J Roentgenol* 1997; 168 : 905-11.
  29. Cummings SR, Bates D, Black DM. Clinical use of bone densitometry: scientific review. *J Am Med Assoc* 2002; 288 : 1889-97.
  30. Looker AC, Orwoll ES, Johnston CC, Jr., Lindsay RL, Wahner HW, Dunn WL, et al. Prevalence of low femoral bone density in older U.S. adults from NHANES III. *J Bone Miner Res* 1997; 12 : 1761-8.
  31. Wahl RL, Waldmann S, Shapiro B. Dual-photon bone mineral density in the proximal femur: correlation by site. *Nucl Med Commun* 1988; 9 : 53-8.
  32. Hedlund LR, Gallagher JC. The effect of age and menopause on bone mineral density of the proximal femur. *J Bone Miner Res* 1989; 4 : 639-42.
  33. Kumasaka S, Kawamata R, Okada T, Miyake M, Kashima I. Relationship between bone mineral density and bone stiffness in bone fracture. *Oral Radiol* 2005; 21 : 38-40.
  34. Caligiuri P, Giger ML, Favus MJ, Jia H, Doi K, Dixon LB. Computerized radiographic analysis of osteoporosis: preliminary evaluation. *Radiology* 1993; 186 : 471-4.
  35. Chung HW, Chu CC, Underweiser M, Wehrli FW. On the fractal nature of trabecular structure. *Med Phys* 1994; 21 : 1535-40.
  36. 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.
  37. Kumasaka S, Kiyohara S, Takahashi T, Asai H, Kashima I. Morphologically extracted trabecular skeleton superimposed upon digital radiograph structure. *J Bone Miner Metab* 2000; 18 : 208-11.
  38. Lee BD, White SC. Age and trabecular features of alveolar bone associated with osteoporosis. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2005; 100 : 92-8.
  39. 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.
  40. Furuya NN, K. Kashima, I. Morphometric analysis of digital radiographic bone images for trabecular bone structure. *Oral Radiol* 2002; 18 : 81-93.
  41. Gowin W, Saporin PI, Kurths J, Felsenberg D. Measures of complex-

- ity for cancellous bone. Technol Health Care 1998; 6 : 373-90.
42. Noble PC, Box GG, Kamaric E, Fink MJ, Alexander JW, Tullos HS. The effect of aging on the shape of the proximal femur. Clin Orthop Relat Res 1995; 31-44.
43. Black DM, Steinbuch M, Palermo L, Dargent-Molina P, Lindsay R, Hoseyni MS, et al. An assessment tool for predicting fracture risk in postmenopausal women. Osteoporos Int 2001; 12 : 519-28.
44. Ortman LF, Hausmann E, Dunford RG. Skeletal osteopenia and residual ridge resorption. J Prosthet Dent 1989; 61 : 321-5.