

척추 골절의 예방적 치료법에 관한 미세 구조해석

김형도* (건국대 대학원 의공학부), 탁계래† (건국대 의공학부),
김한성 (고등기술연구원 기계의용기술센터), 이성재 (인제대 의용공학과)

A Microstructural Analysis for Preventive Treatments of Vertebral Fracture

H. D. Kim* (Dept. Biomedical Eng., Konkuk Univ.), G. R. Tack† (Dept. Biomedical Eng., Konkuk Univ.),
H. S. Kim (Mechanical & Medical Engineering Center, Institute for Advanced Engineering),
S. J. Lee (Dept. Biomedical Eng., Inje Univ.)

ABSTRACT

It is reported that the mechanical properties of vertebral trabecular bone depend on the density and the mass of bones. Osteoporosis is a systemic skeletal disease caused by low bone mass and microstructure deterioration of trabecular bone. Silva and Gibson (1997) studied the treatment of age-related bone loss using drug therapy. Vertebroplasty is a minimally invasive surgery for the treatment of osteoporosis vertebrae. This procedure includes puncturing vertebrae and filling with Polymethylmethacrylate (PMMA). However, the relative effect of drug therapy and bone cement for osteoporosis treatment is not reported yet. In this study, several 2D models of human vertebral trabecular bone are analyzed by finite element method. The mechanical behaviors of the vertebral trabecular bone treated by the drug therapy and the bone cement are compared. This study shows that bone cement treatment is more effective strategy than drug therapy to prevent the degradation of bone strength.

Key Words : Osteoporosis (골다공증), Vertebroplasty (척추성형술), PTH (부갑상선 호르몬), PMMA (골 시멘트), Voronoi Diagram (보로노이 도형), Finite Element Analysis (유한요소 해석), Micro-CT (미세 컴퓨터 단층 촬영)

1. 서론

뼈를 구성하는 대표적인 요소인 교원질 섬유소와 칼슘이 상실되어 골밀도가 낮아진 상태를 골다공증이라고 말한다. 골다공증은 화학적 조성에는 큰 변화가 없으며, 경미한 충격에도 쉽게 골절되는 질환이다. Wasnich (1999)에 의하면 골량은 성장기 동안에 계속해서 자라나지만 30.5 세 이후에 감소하기 시작하고 70 세의 골량은 성인의 약 70% 까지 감소한다는 것을 알 수 있다[1]. 또한 Melton (1995)은 폐경후기에 백인 여성의 30%가 골다공증을 가지고 있으며, 60 세 이상의 대부분의 여성들이 골다공증에 의한 골절 증상을 가지고 있다고 보고하였다[2]. 이처럼 다공성 복합물질로 이루어진 해면골의 미세구조는 나이가 들어가면서 점점 더 골량의

감소를 초래하게 되므로 해면골의 골절을 예방하기 위한 다양한 연구가 필요하게 되었으며 해면골의 기계적 특성은 뼈의 밀도와 뼈의 부피에 의존적인 것은 이미 여러 연구들을 통하여 밝혀진 사실이다.

골다공증 치료에는 여러 가지 방법들이 보고되고 있다. Li et al. (1995)는 부갑상선 호르몬 (PTH) 치료로 골량과 골의 강도를 증가 시킬 수 있다고 보고하였다[3]. 그리고 Silva와 Gibson (1997)은 유한요소 모델을 사용하여 약물 치료의 효과를 역학적으로 설명하였다[4]. Herve Deramond 등 (1984)은 해면골에 Polymethylmethacrylate (PMMA)와 같은 골시멘트를 주입하여 골의 강도를 증가시키는 척추성형술(Vertebroplasty)을 소개하였으며[5], 현재까지 통증완화 및 골의 안정성에 관한 여러 논문이 발표되어 있다. 그러나 골다공증 환자에게 있어 약물

치료와 골 시멘트 주입에 대한 역학적 특성에 관한 비교 연구는 보고되어 있지 않다.

본 연구에서는 Silva와 Gibson이 제안한 방법을 기본으로 Voronoi Diagram을 생성하여 Silva와 Gibson의 약물 치료 방법과 골 시멘트 치료 방법의 상대적 효과를 유한요소 해석을 통해 비교 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 보로노이 도형(Voronoi Diagram)

Voronoi Diagram은 최근에 해면골의 미세구조 모델 즉, cellular solids를 생성하는데 많이 사용되고 있다[6]. 척추 해면골의 2차원 미세구조 유한요소 모델은 다음과 같이 Silva와 Gibson(1997)의 Voronoi Diagram을 변형하여 사용하였다. 즉, 두 점 p 와 q 사이의 Euclidean 거리를 $dist(p,q)$ 라 하고, 한 평면상에 n 개의 cell로 나눈다. p 에 있는 각각의 점에 대해서 만일, $dist(q,p_i) < dist(q,p_j)$ 를 만족하면 q 는 cell에 포함시키고, 평면상의 점들은 p 에 있는 점들 중 가장 가까운 점이 속한 cell에 포함되도록 한다(Fig. 1).

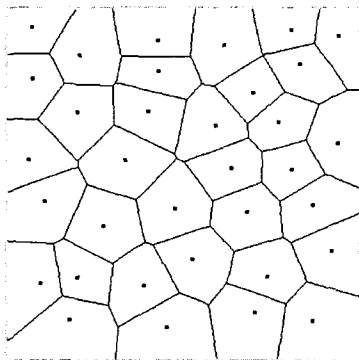


Fig. 1. Construction of Voronoi Diagram

2.2 유한요소 모델

척추골질의 예방적 효과에 대한 Silva와 Gibson의 약물 치료 모델과 본 연구의 골 시멘트 치료 모델의 직접적인 상대 비교를 위하여, Silva와 Gibson가 구성한 3가지 모델(정상, 골다공증 그리고 약물 치료 상태)과 유사한 모델을 구성하였다. 골 시멘트 치료 모델은 본 연구에서 수행한 Micro-CT 영상을 참고로 하여 골 시멘트 치료 상태를 모델링 하였다.

2.2.1 정상 모델

Silva와 Gibson의 모델과 유사한 척추 해면골을 유한요소 모델로 만들기 위해서, 20x20의 nucleation 점들을 생성하여 각 nucleation 점들에 -

0.3~0.3 사이의 난수 값을 더하여 주었다. 실제 인간의 척추 해면골과 같은 모델을 만들기 위해서 가로 방향으로 2.33 배, 세로 방향으로 3.5 배로 스케일 조정하여 동일한 밀도(0.134)의 5가지의 정상 상태의 해면골 모델을 생성하였다(Fig. 2).

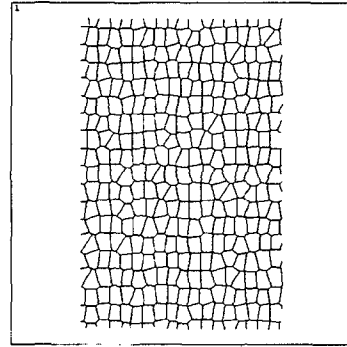


Fig. 2. Finite element mesh of an intact model

2.2.2 골다공증 모델

골다공증 모델(aged model)은 Silva와 Gibson의 모델과 동일한 밀도(0.114)로 구성하기 위하여 임의의 난수를 발생하여 요소들을 제거하여 5개의 정상 해면골 모델을 생성하였다(Fig. 3).

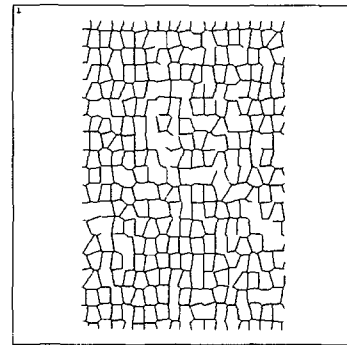


Fig. 3. Finite element mesh of an aged model

2.2.3 호르몬 치료 모델

호르몬 치료에 대한 모델은 Silva와 Gibson의 모델과 동일한 방법으로 생성하였다. 즉, 골소주의 수는 동일하게 유지하고 요소의 두께만 증가시켰다(Table 2).

2.2.4 골 시멘트 치료 모델

골 시멘트 치료 모델은 골다공증 모델을 기본으로 하여 골 시멘트를 주입한 척추 해면골을 Micro-CT로 촬영한 결과(Fig. 4)를 고려하여 골 시멘트를 Sell 요소로 추가하여 모델링 하였다. 골 시멘트 치료 모델 역시 골소주의 수는 골다공증 모델과 동일하다.

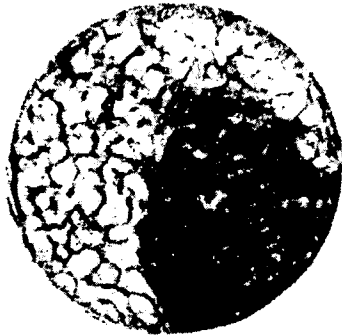


Fig. 4. 2D Micro-CT image of trabecular bone specimen

2.3 유한요소 해석

Silva 와 Gibson 의 약물 치료 모델과 본 연구의 골 시멘트 치료 모델을 비교하기 위하여, Silva 와 Gibson 의 유한요소 해석에 사용한 동일한 물성치를 사용 하였다. 즉, 정상, 골다공증, 호르몬과 골 시멘트를 이용한 치료에 대하여 Table 1 과 같은 물성치를 적용하여 해석을 실행하였다. 경우 A 는 Silva 와 Gibson 이 사용한 물성치(단, 골 시멘트의 값은 Bone 의 A/B 의 축소 비율을 고려하여 물성치를 가정하였다)이며, 경우 B 는 실제 물성치를 적용한 경우이다. 본 연구에서는 Silva 와 Gibson 의 약물 치료와 비교를 위해 경우 A 의 물성치를 사용하였다. A 의 물성치의 타당성 검증을 위하여 실제 물성치 B 를 적용한 모델도 해석을 수행한 결과 경우 A 와 유사한 결과를 보여주었다. 모델의 해석의 경계조건은 미세구조의 하단부를 수직 방향으로 고정하였으며, 상단부에 압축변위(1%변형)를 적용하였다. 비선형 정적 해석은 ANSYS Ver. 5.7 을 이용하여 수행하였다.

Table 1. Material properties of trabecular bone and bone cement

Case	Material	Elastic Modulus	Poisson's Ratio	Yield Strength
A	Bone	1.0MPa	0.3	10KPa
	Bone cement	0.183Mpa	0.3	4.8KPa
B	Bone	12GPa	0.3	120.5MPa
	Bone cement	2.2GPa	0.3	58MPa

3. 결과

골다공증 해면골의 미세구조를 유한요소 해석을 통해 분석을 하였다. 본 연구에서 호르몬 치료의 결과는 Silva 와 Gibson 의 결과와 상당히 유사함을 확인할 수 있었다. 또한 골다공증 해면골의 미세구조를 유한요소 해석을 통해 분석하였으며, 미세 유한요소 해석을 통해 척추골절 예방에 대한 각 모델의 효과를 비교하였다.

Table 2. Microstructural parameters for simulation of aging, drug treatment and bone cement treatment in a 2D model of vertebral trabecular bone

Case	(Tb.Th) _L (mm)	(Tb.Th) _T (mm)	# of longitudinal trabeculae	# of transverse trabeculae
Intact	0.213	0.153	563	380
Aged	0.207	0.134	502	338
Treated (Hormone)	0.225	0.190	502	338
Treated (Bone cement)	0.207	0.134	502	338

본 연구의 결과로부터 척추 해면골의 척추 골절의 거동을 분석할 수 있었으며, 골절 가능 부위 (Fig. 6-9) 및 각 치료법들의 상대적 효과를 예측할 수 있었다. Fig. 5 는 골다공증 모델은 정상에 비하여 modulus 와 strength 가 약 20%까지 감소하고 Silva 와 Gibson 의 약물 치료모델의 경우는 정상인의 약 30%까지 회복되나 골 시멘트 치료모델은 약 60%까지 회복된다는 것을 보여주고 있다(Fig. 5).

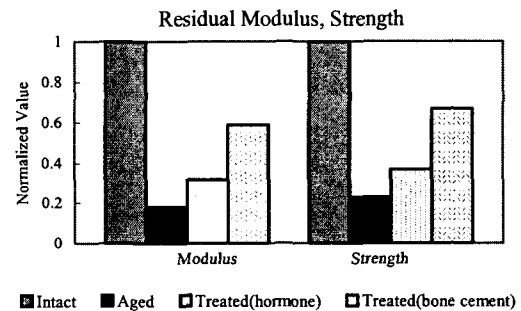


Fig. 5. Modulus and strength for several 2D models

본 연구는 2 차원해석 모델이므로 정량적으로 정확한 값은 아니지만 척추 해면골의 골절 예방에 호르몬 치료법보다는 골 시멘트 주입 치료법이 더 효과적이라는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

척추 해면골 골절의 예방적 치료법들에 대한 기초 연구로서 2 차원 미세구조해석을 수행하였다. 골다공증이 일어났을 때의 치료로 약물 치료보다는 골 시멘트의 치료가 더 효과적이라는 것을 해석적 분석을 통해 알 수 있었다. 향후 연구로서 골다공증 해면골의 물성치에 관한 연구가 계속 되어져야 할 것이다.

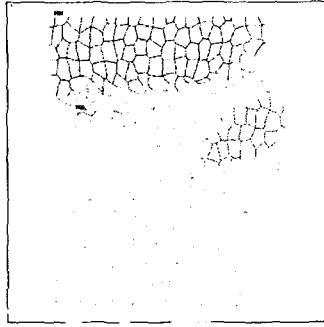


Fig. 6. Deformed state of an intact model

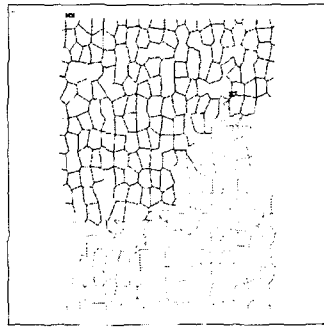


Fig. 7. Deformed state of an aged model

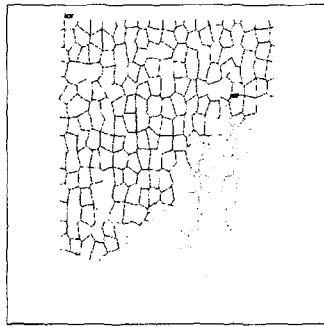


Fig. 8. Deformed state of a treated (Hormone) model

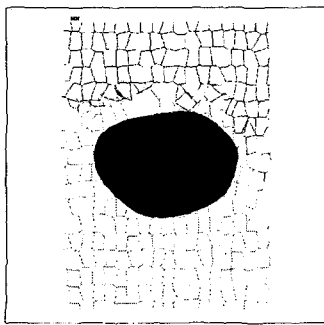


Fig. 9. Deformed state of a treated (Bone cement) model

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2001-00500)지원으로 수행되었음.

※ 통신저자: † 탁계래, (380-701) 충북 충주시 단월동 322 번지 건국대학교 의과대학 의학공학부
E-mail: grtack@kku.ac.kr
Tel. (043) 840-3762, Fax. (043) 851-0620

참고문헌

1. Wasnich, R. D., "Epidemiology of osteoporosis, in Primer on the Metabolic Bone Diseases and Disorders of Mineral Metabolism", 4th ed., Favus, M. J., Ed., Lippincott/Williams & Wilkins, chap. 46, 1999
2. Melton L. J. III, "How many women have osteoporosis now?", J. Bone Miner Res, Vol 10, pp 175-177, 1995
3. M. Li, Li. Mosekilde, C. H. Søgaard, J. S. Thomsen and T. J. Wronski, "Parathyroid Hormone Monotherapy and Cotherapy with Antiresorptive Agents Restore Vertebral Bone Mass and Strength in Aged Ovariectomized Rats", Bone, Vol. 16, pp. 626 - 635, 1995.
4. M. J. Silva, L. J. Gibson, "Modeling the Mechanical Behavior of Vertebral Trabecular Bone: Effects of Age-Related Changes in Microstructure", Bone, Vol. 21, pp. 191 - 199, 1997.
5. H. Deramond, C. Depriester, P. Galibert, and D. Le Gars, "Percutaneous vertebroplasty with PMMA polymethylmethacrylate - technique, indications and results," Radiol. Clinics of N. America, 36, No. 3, pp. 533-546, 1998
6. M. J. Silva, L. J. Gibson, "The effects of non-periodic microstructure and defects on the compressive strength of two-dimensional cellular solids", Int. J. Mech., Vol. 39, pp. 549-563, 1997
7. L. J. Gibson, M. F. Ashby, Cellular solids: structure & properties, second edition. Cambridge University Press, Cambridge, 1997