

척추성형술 시술에서 요추의 생체역학적 특성 변화

이준형*, 전성재(고려대 원), 채수원(고려대학교), 이태수(서강대학교),
서중근, 박정율, 김상돈(고대병원), 이관행(광주과학기술원)

Biomechanical Property Change of Vertebral body in Vertebroplasty

J. H. Lee*, S. J. Chun, S. W. Chae(Mech. Eng. Dept., Korea U.), T. S. Lee(Mech. Eng. Dept., So-Gang U.),
J. G. Su, J. Y. Park, S. D. Kim(Medical Center, Korea U.), G. H. Lee(Dept. of Mechatronics, KJIST),

ABSTRACT

The compressed fracture of spine caused by osteoporosis is one of the most frequent diseases in bone fracture. Recently the vertebroplasty has drawn much attention as a medical treatment for the compressed fracture of spine, which strengthens the vertebral body and corrects deformity, and relieves pain in patients by injecting bone cement. The finite element analysis is used to investigate the vertebroplasty quantitatively. Previous works with finite element analysis have drawbacks in their simplified models geometry of vertebral body and with material properties of bone. In this paper the exact geometry of vertebral body has been constructed from medical image data and the biomechanical property changes of vertebral body in vertebroplasty have been investigate by using three dimensional finite element analysis.

Key Words : Vertebroplasty(척추성형술), Osteoporosis(골다공증), Biomechanical study(생체역학적 연구), Finite element analysis(유한요소해석), PMMA(Polymethylmethacrylate), Compression fracture(압박골절), Material properties(재료물성치)

1. 서론

최근 골다공증(osteoporosis)으로 인하여 발생하는 척추 압박골절(vompression fracture)은 구조적으로 척추체(vertebral body)가 압박됨으로 인해 골조직의 부피감소와 변형을 일으킨다. 이로 인하여 척추체의 기능을 상실하게 되며 생체역학적인 변화로 인하여 신경조직등에 대한 압박을 유발하며 신경계의 장애나 심한 통증을 일으키게 된다. 이런 골다공증으로 인한 척추 압박골절은 골 조직의 부피와 내용이 감소하면서 뼈가 가벼운 충격에도 쉽게 골절되는 현상으로 고령환자에게서 흔히 발생하는 질환이다.¹ 요즘 이러한 골다공증의 치료법이 많이 개발되고 있으며, 최근 보편화 된 방법으로 척추체내에 인공 생체물질인 골 강화제(PMMA)를 주입하는 척추성형술(vertebroplasty)이 있다.² 이 척추성형술은 골다공증에 의한 압박된 척추체의 장력 보온과 안정적 구조유도 및 통풍의 완화등을 목적으로 시술되고있다.

본 연구에서는 척추성형술의 역학적 변화를 정

량적으로 연구하기 위하여 CT 이미지로부터 척추체와 척추성형술에 쓰이는 인공 생체 물질인 PMMA (polymethylmethacrylate)를 3 차원 모델로 구성 하였으며, 유한요소해석을 통하여 종판(end plate)³ 과 척추체⁴ 등에 대한 응력분포와 변형을 해석하여 척추성형술의 생체역학적 특성 변화를 연구하였다.

2. 유한요소 모델링

본 연구에서 적용한 유한요소 모델은 여성 골다공증환자의 CT 이미지에서 T10 ~ L2 척추의 단면 영상 정보를 얻었으며, 골다공증 환자에게서 골절이 많이 발생하는 부위인 T12 요추의 데이터를 사용하였다. Fig. 1 에서 보는 바와 같이 T12의 단면 정보를 영상 처리 프로그램인 MEDISURF⁵ 와 IMAGEWARE SURFACER⁶ 를 이용하여 점 데이터로 변환하였으며, 이 변환된 점 데이터를 이용하여 모델을 구성하였다. 또 유한요소 해석은 상용 프로그램인 ABAQUS 6.3⁷ 를 이용하였다.

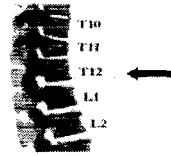


Fig. 1 요추(T12)의 CT 이미지

2.1 요추의 모델링

CT의 영상 데이터로부터 얻어진 점들을 바탕으로 피질골(cortical bone)과 망상골(trabecular bone)을 구별하여 Fig. 2에서 보는 바와 같이 모델링하였다.

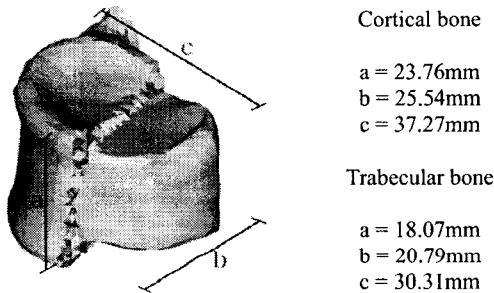


Fig. 2 Cortical bone and trabecular bone

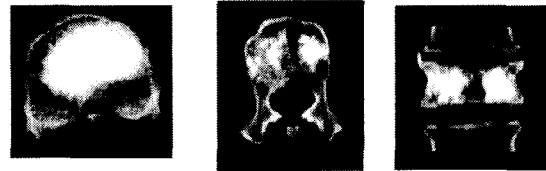
또 요추의 윗부분인 종판(end plate)에 하중조건(loading condition)을 적용하였고, 이 하중조건에는 후방요소들(posterior element)를 고려하여 적용하였으므로 후방요소들인 횡돌기(transverse process)나 상관절돌기(superior articular process), 극돌기(spinous process)등은 모델링에서 제외하였다.

2.2 척추체 삽입물(PMMA)의 모델링

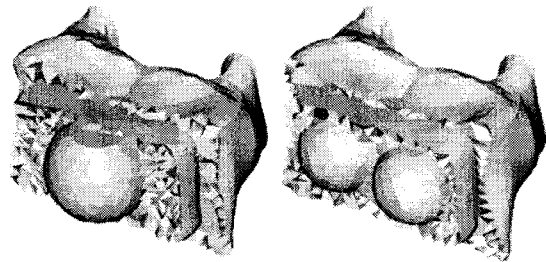
골다공증 환자의 골절 요추에 주입하는 PMMA는 Fig. 3(a)의 CT 이미지에서 보는 바와 같이, PMMA 주입 후 구(sphere)와 유사한 형태로 굳게 된다. 이러한 영상을 바탕으로 요추 내에 주입된 PMMA를 두가지의 형태의 모델로 구성하였다. 가운데 부분에 많은 양이 주입된 형태의 구(PMMA 1)와 양쪽으로 주입한 형태의 구(PMMA 2)로 구분하여 모델링하였으며, PMMA의 주입량은 임상적용시 주로 사용되는 3cc로 각각 유지하였다.

이 모델에서 피질골, 망상골, PMMA는 모두 사면체 선형요소(C3D10M)를 사용하였다. 또한 피질

골과 망상골의 두께를 고려하여 요소(element)의 길이를 1.5mm로 하였고 각 요소의 개수는 Table 1에서 보는 바와 같다.



(a) CT image



(b) PMMA1(patient 2)

(c) PMMA2(patient 3)

Fig. 3 PMMA modeling

Table 1 Number of elements

	Model	Number of elements	Total elements
I	Cortical bone	20551	31956
	Trabecular bone	11405	
II	Cortical bone	20338	32876
	Trabecular bone	10102	
	PMMA I(Sphere1)	2436	
III	Cortical bone	16761	24955
	Trabecular bone	5781	
	PMMA2 (Sphere2)	2413	

2.3 하중조건 (Loading condition)

해석에 사용된 하중조건은 70kg의 사람이 양손에 20kg의 물체를 들고 서 있을 때 요추에 상부에 미치는 측정값을 사용하였다. 이 값은 기존의 임상 실험을 통하여 검증된 값이며⁸, 이때 요추 T12에 미치는 힘은 1500 N이다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 요추에 미치는 힘은 역학적으로 분포하중으로 나타나게 되며 본 연구에서는 요추의 전방부와 후방부 사이에 7 : 3의 비율을 적용하였다. 또 요추의 밑부분과 뒷부분의 절점을 고정하였다.

각 요소(element)들의 물성치(material properties)는

기존의 연구와 임상 실험을 바탕으로 적용하였다.

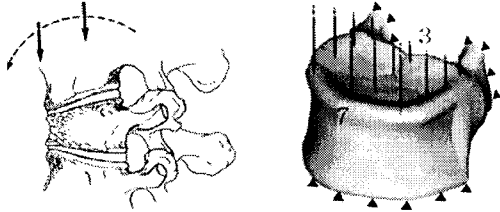


Fig. 4 Loading conditions

임상 실험을 통해 얻어진 30 세의 정상 여성과 60 세의 골다공증환자의 골밀도(bone mineral density)를 비교해 보면 피질골의 경우 환자는 정상인의 30%, 망상골의 경우 환자는 정상인의 50% 정도 골밀도가 감소하였다.⁹ 여기서 얻어진 골밀도의 변화를 영률(young's modulus)과 골밀도와의 관계식에 적용하여 Table 2 에서 보는바와 같이 각 요소별 영률을 얻었다.¹⁰ 포아송의 비(poisson's ratio)는 기존의 연구를 바탕으로 적용하였다.¹¹

Table 2 Material properties

		Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio
Normal Person	Cortical bone	17583	0.3
	Trabecular bone	264	0.2
Patient	Cortical bone	6495	0.3
	Trabecular bone	88	0.2
PMMA		540	0.3

또 PMMA 의 물성은 PMMA 가 요추내에 삽입되어 망상골과 석여 있을때의 물성치를 적용하였다.¹² 이때 PMMA 는 MMA 와 polymer powder 의 비율이 1.5 g/ml 인 상태로 주입되었으며 실험치의 평균 값을 적용하였다.

유한요소해석은 네가지 모델로 구분하여 해석하였다. 첫째 정상인 사람의 물성치를 대입, 둘째 골다공증 환자의 물성치를 대입, 셋째 척추성형술을 시술한 환자 1(PMMA1 가운데 부분에 주입), 넷째 척추성형술을 시술한 환자 2(PMMA2 양쪽 부분에 주입)

3. 해석 결과

정상인, 환자, 척추성형술 시술환자 1, 2 의 요추부 해석결과를 비교해 보았다.

먼저 요추 윗부분인 종판(end plate)의 변위차를 보면 Fig. 5 에서 보는 바와 같이 골다공증 환자의 경우 종판의 중앙부위의 변위가 약 0.33 mm 였으나

PMMA 주입후 0.15 ~ 0.24 mm 로 변위차가 감소함을 알 수 있었다. 이것은 요추내에 주입된 PMMA 가 골다공증으로 골밀도가 감소한 요추에 미치는 힘을 분산하여 요추의 과도한 변형이나 골절을 방지해주는 것으로 나타났다.

또 PMMA 의 주입 형태상으로는 가운데 부분에 많은 양이 주입된 Patient 3 (PMMA 1)의 변위가 0.15mm 이고 양쪽에 주입된 Patient 2 (PMMA 2) 의 변위가 0.24mm 로 요추의 중앙부분에서의 변위차는 Patient 3 의 형태로 주입하였을 때 비교적 적은 변위차를 보였다.

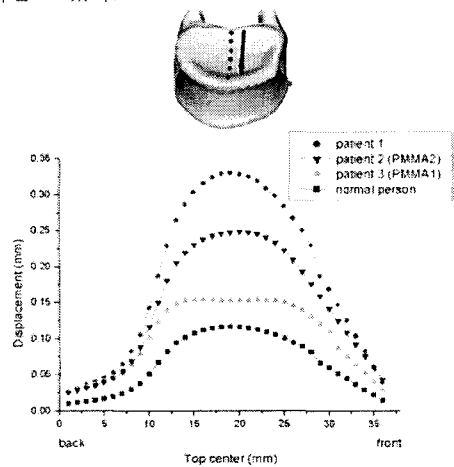


Fig. 5 Displacements of end plate

다음은 요추에서 골절이 많이 일어나는 앞부분의 응력 변화(stress distribution)를 알아 보았다. 환자(patient)의 경우는 요추 앞부분의 응력이 커짐에 따라 골절(fracture)이 일어 날 것으로 예상되며, 피질골의 골절이 시작되는 항복응력(yield stress)에 관한 다른 연구들이 없는 관계로 비교대상에서 제외시켰다.

Fig.6 에서는 정상인의 요추와 PMMA 주입한 후 요추 앞부분의 압축응력을 보여주고 있다. 피질골과 망상골의 두께가 얇은 b 지점에서 모두 10 MPa 이상의 압축응력(compressive stress)을 보여 응력이 크게 작용하는 것으로 나타났다. 또한 요추의 골절이 일어 날 것으로 예상되는 a 지점에서 모두가 가장 큰 응력을 나타냈다. 골절이 예상되거나 골절이 발생한 환자의 요추에 PMMA 를 주입 한 경우 정상인보다 낮은 응력분포를 보이고 있다.

이는 척추성형술 시술후 요추내 주입된 PMMA 가 요추 길부분인 피질골의 응력집중을 분산하여 요추의 골절을 예방할수 있으며, 이미 골절이 진행된 환자의 경우에도 요추부에 미치는 압축력을 견딜 수 있도록 요추의 보완역할을 충분히 해내고 있음을 알 수 있다.

PMMA 주입형태 상으로는 가운데 부분에 Patient 3 (PMMA 1)을 주입한 경우가 양쪽에 주입한 경우보다 요추 앞쪽의 응력이 비교적 적게 분포함을 알 수 있다.

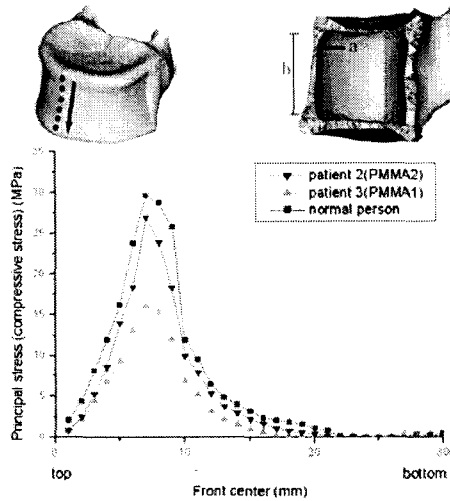


Fig. 6 Principal stress of vertebral body on front

4. 결론

본 연구에서는 CT 이미지로부터 요추와 PMMA의 3 차원 모델을 제시하였다. 또한 실제 인체 모델과 유사하도록 요추 상부에 분포하중을 적용하였다. 이는 기존의 단편적인 정 하중 하에서의 요추 해석에서 벗어나 좀더 인체 모델에 가깝게 접근하므로써 보다 정확한 해석결과를 얻을 수 있었다.

또한 결과에서 나타난 바와 같이 골다공증 환자에게 주입된 PMMA는 요추의 응력을 분산하여 요추의 골결을 예방하고, 이미 골결이 진행된 환자들에게는 정상적인 생활을 할 수 있도록 요추의 역할을 보완해준다.

이러한 정량적인 연구결과는 의료진으로 하여금 척추성형술 시술시 PMMA 주입위치, 주입량을 사전에 확인하는데 필요하다 할 수 있다.

지속적인 연구를 통하여 더 쉽고, 빠르고, 정확한 모델생성과 분석 방법을 개발함으로써 차후 실제 임상에 적용할 수 있을 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구과제(R01-2001-00374)에 의해 수행된 것이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- Jensen M. E, Evans A. J, Mathis J. M, et al, "Percutaneous polymethylmethacrylate vertebroplasty in the treatment of osteoporotic vertebral body compression fractures", Technical aspects AJNR Am J Neuroradiol Vol. 18, pp.1897-1904,1997.
- Cotten A, Boutry N, Cortet B, et al, "Percutaneous vertebroplasty. state of the art", RadioGraphics, Vol. 18, pp. 311-320, 1998.
- Shirazi-Adl SA, Shrivastava SC, Ahmed AM, "Stress analysis of the lumbar disc-body unit in compression. a three-dimensional nonlinear finite element study", SPINE. Vol. 9, pp. 120-134, 1984.
- Oxland TR, Onat Et: Thoracolumbar burst fracture mechanism: the effect of disc degeneration using a non-linear finite element analysis. In: Transactions of the 39th Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society, San Francisco, CA, February 15-18, 1993.
- Jaе Hun Ryu, Hyun Soo Kim and Kwan H. Lee, "Contour based algorithms for generating 3D medical models," Scanning Congress 2001: Numerization 3D session, Paris, France, April 4-5, 2001.
- Imageware Surfacер Manual
- Abaqus 6.3 User's Manual
- Katsuhiko Sato, Shinnichi Kikuch and Takumi Yonezawa, "In Vivo Intradiscal Pressure Measurement in Health Individuals and In Patients with Ongoing Healthy Individuals and In Patients with Ongoing Back Problems", SPINE, Vol. 24, No. 23, pp 2468-2474, 1999.
- 송상호, 심창구, 서현, "연령에 따른 여성의 척추 곡률도 변화", 대한정형학회지, Vol. 35, No. 2, pp 277-282, 2000.
- Pieter Christian Wirtz, Norbert Schiffers, Thomas Pandorf, Klaus Radermacher, Dieter Weichert, Raimund Forst, "Critical evaluation of know bone material properties to realize anisotropic FE-simulation of the proximal femur", Journal of Biomechanics, Vol. 33, pp 1325-1330, 2000.
- Gye-Rae Tack, Sung-Jae Lee, Jung-Woog Shin, et al, "Prediction of Cement Volume for Vertebroplasty Based on Imaging and Biomechanical Results" KSME International Journal, Vol. 15, pp1041~1050, 2001
- 이중희, 2002, "PMMA 주입시 망상골의 골밀도와 영음의 상관 관계에 대한 연구", 서강대학교 학위논문, 2002.