

추간판의 변성이 추체의 골다공화를 유도하는가?

*김수택¹, 김영은²

¹ 단국대 대학원 기계공학과, ² 단국대 기계공학과

Does disc degeneration induce Osteoporosis in the vertebral body?

*S. T. Kim¹, Y. E. Kim²

¹ Graduate School, Dankook Univ., ² Dept. of Mech. Eng., Dankook Univ.

Key words : Osteoporosis(골다공증), Bone-remodeling(골재형성), Vertebral body(추체), Permeability(투수능), Void ratio(공극비)

1. 서론

인체의 구조물 중 척추는 33개의 척추골과 그 사이의 섬유 연골 성 추간판(disc)으로 이루어져 있고 두개골로부터 골반골까지 강한 인대와 근육으로 강화되어 신체를 지지하고 평형을 유지하며 척추관(spinal canal) 내의 척수신경을 보호하고 각 척추 신경근이 분지한다. 위쪽으로는 머리를 받치고, 아래쪽으로는 골반(pelvis)과 연결되어 체중을 하지로 전달하면서 인체의 운동이 가능하도록 이루어진 매우 독특한 구조를 가지고 있다. 구조적으로 앞쪽의 추간판(disc)에 의한 큰 관절 하나의 추간관절과 두 개의 후관절(facet joint)에 의해 세 개 관절의 복합체(triple joint complex)를 형성하게 된다. 이러한 세 개의 관절 중 어느 하나에 퇴행성 변화(degeneration)가 생기면 이 변화는 다른 운동분절(motion segment)에 까지 영향을 주게 된다. 인체가 노화되면서 추간판의 변성과 추체의 골다공화와 같은 척추에서의 퇴화가 발생한다. 추간판의 경우 겔 상태의 수핵이 점차 섬유질화되면서 운동 분절의 탄성 영역에서의 강성도는 정상상태보다 증가한다는 사실이 in-vitro 상태의 실험을 통하여 입증되었다.¹ 이와 맞물려 추체에는 점차 골밀도가 감소하여 쉽게 손상되거나 부러질 수 있는 골다공화(osteoporosis)가 발생된다. 특히 추체의 골다공화의 경우는 수직 하중으로 인한 압박골절로 인해 심한 요통의 발생 및 척추의 높이가 감소되는 현상을 유발시킨다. 투수능(permeability)과 간극률(porosity)을 고려한 다공탄성체(poroelastic) 모델²을 이용하여 해석하고자 하였다. 따라서 본 연구에서는 추간판의 변성이 인접한 추체에서의 골다공화에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2. 운동분절모델

CT이미지를 기반으로 요추 세 번째와 네 번째 부위를 이용하여 추간판과 두 개의 추체, 후방요소로 이루어진 3차원 다공성 탄성체 비선형 유한요소 모델을 제작하였다(Fig. 1). 추체 내의 피질골은 쉘요소를 사용하였으며, 후방요소는 8절점 브릭요소를 사용하였다. 추간판과 추체의 해면골은 점성유체로 가득 찬 다공성 구조물의 형태를 보이고 있으므로 해면골과 중판, 추간판은 세분화된 20 절점의 브릭 요소를 사용하였다. 추간판은 윤상인대와 수핵의 두 부분으로 나누어서 모델을 구성하였다. 추체 모델은 실제의 추체를 모사하기 위해 27개의 영역으로 세분화하여 공극비(void ratio)를 달리 하였다. 이와 같은 방법으로 인하여 기존의 실험적 측정 결과 추체내의 위치에 따라 각기 다른 값으로 나타나는 해면골의 강성도 차이를 나타낼 수 있었다.

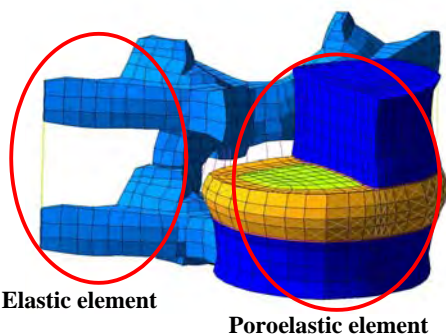


Fig. 1 Vertebra-disc finite element model used for the analysis

윤상인대는 섬유소가 첨가된 복합재 형태의 다공성 물질로 모델링 하였다. 윤상인대의 섬유소들은 수평면에 대하여 평균 30°를 이루면서 서로 교차 되도록 제작되었다. 본 모델에서 사용된 퇴화가 진행되기 전 정상인들의 물성치들은 Table 1과 같다. 변성된 추간판의 물성치는 앞선 연구³의 결과를 적용하였다.

Table 1 Material properties (Normal disc)

Material	Young's modulus (Mpa)	Density (kg/mm ³)	Poisson's ratio	Void ratio
Cortical bone	10000	1.83E-6	0.25	
Cancellous bone	100	1.00E-6	0.25	
Endplate	10000	1.83E-6	0.25	4
Annulus	5	1.20E-6	0.45	3
Nucleus	2	1.36E-6	0.49	6

3. 해석방법

추체의 골다공화는 변성된 추간판과 정상 추간판 모델에서 구해진 추체 각 요소에서의 응력값을 비교하여 구하였다. 상부의 추체(1332개의 요소), 하부의 추체(888개의 요소) 총 2220개의 각 요소에서 발생하는 응력변화를 비교 분석한다. 정상 모델에 비해 응력이 감소한 요소는 감소율을 반영하여 공극비를 증가시키며, 증가한 요소는 증가율만큼 공극비를 감소시켰다. 이때 변화된 공극비를 적용하여 투수능을 Li 등⁴의 식을 참고하여 본 연구에서 새롭게 제시된 식 (1)을 이용하여 계산하였다. 이와 같은 방법으로 정상모델과 변성모델간의 각 요소에 작용하는 응력을 각각 비교하여 공극비를 변화시키고 변화된 공극비를 적용하여 투수능을 구하였다. 이렇게 변화된 공극비와 투수능을 사용하여 다음단계의 반복계산을 수행하였으며 일정 범위내로 수렴하면 계산을 종료하도록 하였다. 추체에 가해진 하중은 보행 주기를 기준으로 상체무게의 3배의 수직 하중인 1200N이며 계산은 상용 소프트웨어인 ABAQUS 6.4 (Hibbit, Karlsson & Sorenson, Inc) 프로그램을 이용하였다.

$$k_{i+1} = k_i \exp\left(M \frac{e_{i+1} - e_i}{1 + e_i}\right) \quad \text{where } e_{i+1} = e_0 + e_i \times \Delta \quad (1)$$

$$\Delta = \frac{\sigma_i - \sigma_{i+1}}{\sigma_i}$$

윗 식에서 $k(m^4/Ns)$ 는 투수능을 e 는 공극비를 나타내며 하첨자의 i 와 $i+1$ 은 반복 단계를 0은 초기값을 의미한다. 반복단계별 공극비를 구하는 식에서 Δ 는 각 요소에서의 응력(σ)의 변화율을 나타내며 응력이 감소할 경우 양(+)⁴의 값을 증가할 경우에는 음(-)의 값이 얻어진다. Fig. 2는 본 연구에서 사용한 추체의 골다공화 해석방법의 순서도를 나타내고 있다.

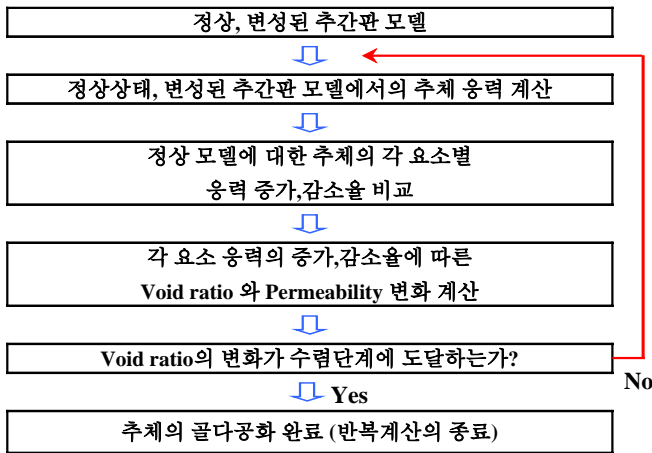


Fig. 2 Algorithm for the vertebral body osteoporosis

4. 해석결과

추간판의 퇴행성 변화는 추체 내의 응력분포 변화를 야기시키며 이로 인해 골다공화 과정이 진행되었다. 이에 따른 해석을 위해 골재형성의 기본 개념을 적용시켜 골다공화 과정을 분석하여 보았다. 식 (1)에 따른 추체 내의 공극비 분포의 변화는 Fig. 3와 같이 얻어졌다. 추간판의 변성에 따라 추체의 중심부분과 모서리 부위에서 골다공화가 심하게 발생되며 전체적으로 공극비가 증가함을 볼 수 있었다(Fig. 4). 이러한 골다공화는 일종의 골 재형성 과정으로 추체내의 변화된 응력분포를 정상상태와 유사한 방향으로 유도하고 있었다(Fig. 5).

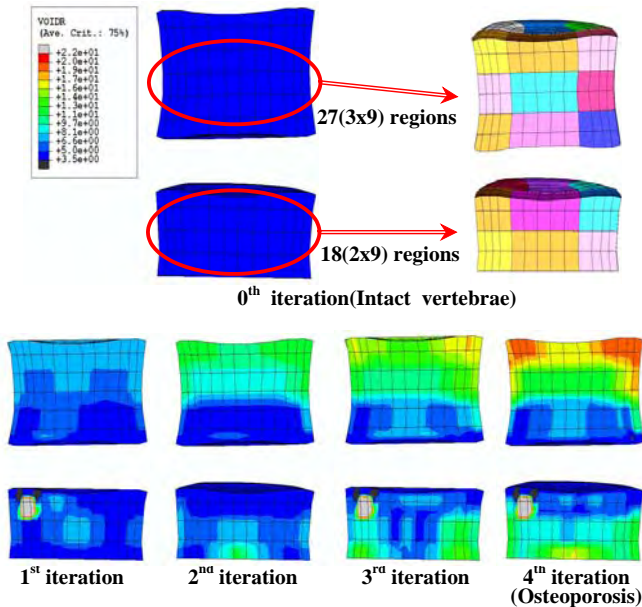


Fig. 3 Void ratio change in the vertebral body

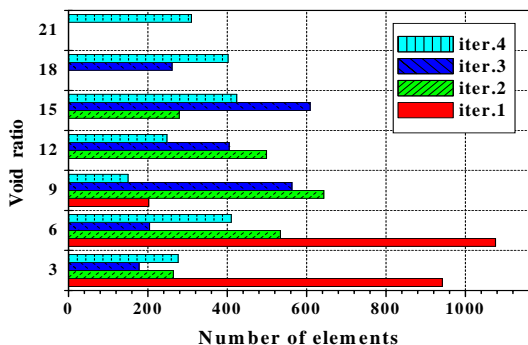


Fig. 4 Void ratio distribution in the vertebral body

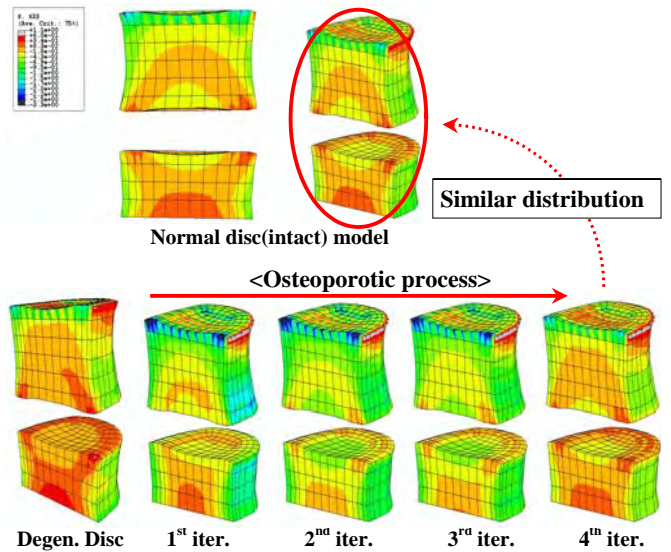


Fig. 5 Von Mises stress changes according to Osteoporotic process in the vertebral body

5. 결론

추간판의 퇴행성 변화에 따른 3차원 다공탄성체 모델을 이용하여 추체 내의 골다공화 과정을 골재형성 이론을 적용하여 해석하였다. 계산 결과는 in-vivo 상태의 관찰 결과와도 잘 일치되는 매우 의미있는 결과를 보이고 있었다.

후기

본 연구는 산업자원부 "실버의료기기 핵심 기술개발 사업"으로 지원되었음.

참고문헌

1. Umehara, S., Tadano, S., Abumi, K., Katagiri, K., Kanera, K., Ukai, T., "Effect of Degeneration on the Elastic Modulus Distribution in the Lumbar Intervertebral Disc," Spine, Vol. 21, pp. 811-820, 1996.
2. Natarajan, N., Williams, R., Andersson B.J., "Recent Advances in Analytical Modeling of Lumbar Disc Degeneration," Spine, Vol. 29, pp. 2733-2741, 2004.
3. 우대곤, 김영은, "다공탄성체 척추운동분절 유한요소 모델을 이용한 추간판의 퇴화과정 분석," 한국 정밀공학회 추계학술대회논문집, pp. 70, 2005.
4. Li, L.P., Soulhat, J., Buschmann, M.D., Shirazi-Adl A., "Nonlinear analysis of cartilage in unconfined ramp compression using a fibril reinforced poroelastic model," Clinical Biomechanics, Vol. 14, pp. 673-682, 1999.