

수직 충격 하중에 따른 요추의 응답특성 - FEM 에 의한 해석

김 영 은 ◦
(단국대학교 기계공학과)

이 춘 기
(서울대학병원 정형외과)

Analysis of Lumbar Vertebrae Response to Vertical Impact Load with FEM

Kim, Young Eun
Dept. of Mechanical Engr.
Dankook University

Lee, Choon Ki
Dept. of Orthopedic Surgery
Seoul National Univ. Hospital

1. 서론

척추는 다양한 형태의 하중상태에서도 spinal cord를 보호하여 줄 뿐만 아니라 복잡한 움직임을 가능케 하는 체인 형태의 구조물이다. 척추 손상의 대부분은 전방 압축 골절, 후방 인장 골절, 그리고 전위 등의 형태로 발생한다. 특히 수직 충격력에 의한 부상은 주로 추체(vertebral body)부위에 골절 형태로 나타난다.

요추 (lumbar spine) 부의 거동에 대한 해석은 주로 실험적 방법과 유한요소 모델을 이용한 수치해석적인 방법이 널리 사용되고 있다. 지금까지 수행된 대부분의 실험적 해석은 주로 정하중 상태에서 이루어졌으며 충격하중에 대한 응답특성은 매우 제한적으로만 수행되어 왔다. 충격하중에 대한 실험적 해석 방법에서는 주로 수직 충격력에 대한 추체의 골절 형태에 대해 연구되었으며, 지금까지 발표된 유한요소 모델에 의한 해석에서는 추간판의 변형등에 대한 해석을 추체와 추간판만을 2-D로 간략화시킨 모델을 이용하여 해석되었을 뿐이다.

본 연구에서는 충격 시간 변화에 따른 추간판의 충격 흡수 현상과, 추체내의 응력변화, 그리고 후관절에서 발생하는 접촉력의 변화등을 3차원 비선형 유한요소 모델을 이용하여 해석 하였다.

2. FEM Modeling

요추를 CT-scan을 한 필름을 이용하여 얻어진 각 단면형상에 대하여 요소(Element)를 분할한 후 각 단면형상을 연결시켜 3차원 모델로 제작하였다. 양측면은 대칭(sagittally symmetric)이라고 가정하여 실제 요추의 반쪽만을 고려하여 모델링 하였다.

2-1. Element type

추체는 Cortical shell과 cancellous bone core로 구성 되었으며 다른 물성치를 주어 분리시켰으며 Cortical shell과 cancellous core의 경계부분을 요소로 경계지었다. 후반부요소 Cortical bone과 Cancellous bone의 분포가 일정치 않아 같은 물성치를 갖는 요소로 간략화 시켜 모델링 하였다. 이와같은 부분은 8절점의 Brick element를 채택하였으며 각 절점은 x, y, z 방향으로의 3개의 자유도를 부여 하였다.

섬유륜(annulus)의 기저물(matrix)은 void ratio가 3인 porous material 형태의 8개 절점의 brick element로 모델링 하였으며, fiber 부분은 인장시에만 힘을 발생시키는 cable 요소로 모델링하였다. Annulus fiber의 평균각도는 디스크의 수평면에 대해 30°를 이루도록 하였으며 각 layer마다 방향을 바꾸어 모델링 하였다. 전체적으로 Fiber는 annulus 체적에 16%를 차지하도록 하였다. Nucleus는 디스크의 단면적의 45%를 점유하도록

하였으며 void ratio가 10 이 되는 porous 물질의 3차원 hybrid brick element로 모델링 하였다. 후관절(Facet joint)에서의 접촉현상은 6개의 3-D gap 요소를 이용하여 모델링 하였다. 후관절에서의 마찰은 없다고 가정하였다. 모델에서 gap 요소의 각도는 평면에서 72°를 이루도록 하였다. 7종류의 인대는 fiber와 같은 cable 요소로 모델링 하였다. 이와같은 방법으로 구성된 모델은 Fig. 1 과 같으며 모두 586개의 절점과 459개의 요소로 구성 되었다.

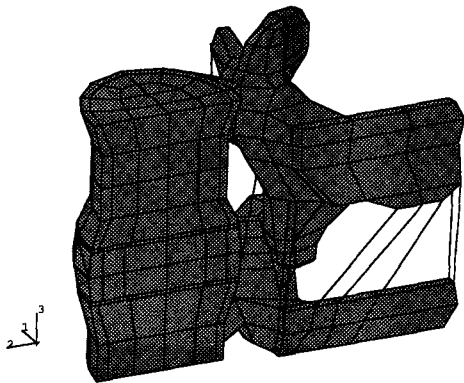


Fig. 1 Constructed FE model

2-2 물성치(Material properties)

본 연구에서 사용한 물성치 값들은 앞서 발표 하였던 정하중 상태에서의 모델링에서 사용한 값과 같은 값을 사용하였으며, 앞서의 연구와 달리 본 연구에서는 추간판의 annulus 와 nucleus 를 porous material 로 모델링 하였다. 정상상태의 경우 nucleus 의 void ratio 를 10 으로 그리고 tensile limit 10 MPa 로 하였으며 annulus 를 각기 3 과 5MPa 으로 하였다. Degeneration 이 있는 경우의 nucleus의 값을 각기 5 와 1.5MPa 로 모델링 하였다.

2-3. 경계조건 및 하중조건

L4의 추체(Vertebral body)와 후반부 요소(Posterior element)의 밑부분의 모든 자유도를

고정시켰다. 모델이 좌우 대칭이므로 대칭면의 모든 절점은 x방향으로 고정시켰다. 압축하중은 Fig. 2 에서와 같이 삼각형 형태의 역적(impulse)을 위쪽 추체면에 균일한 압력을 적용 시키도록 했다. 이 경우 F_{max} 를 2000N 으로 가정하였으며, 시간 Δt 는 0.1342sec 로 하였다. 그리고 Δt 의 값이 각기 다른 경우에 대해 해석 하였다.

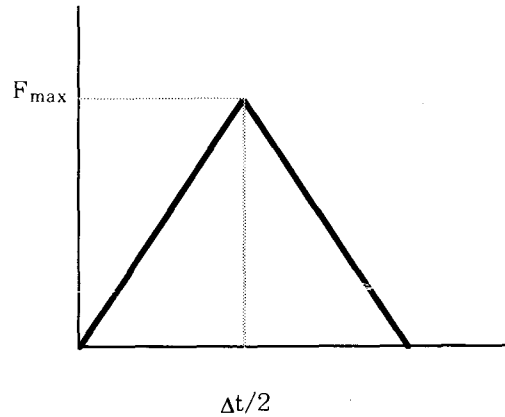


Fig. 2 The impact load profile

3. 결과 및 토의

3-1. 충격하중에 대한 모델의 타당성 검증

충격 하중하에서의 실험 결과로 본 연구에서 수행된 연구 결과와 비교할 수 있는 연구로 Hakim 과 King에 의한 실험을 들 수 가 있다. Hakim 과 King은 충격 하중 상태하에서 추체의 각 부분에서 발생하는 스트레인량을 측정하였다. 따라서 본 연구에서도 이들의 실험에서와 같은 충격형태를 가한 결과 매우 만족할 만한 결과를 얻을수 있었다. 그리고 Hakim 과 King 의 FEM 모델은 추체만을 모델링 하고 추간판을 스프링과 댐핑요소로 간단화 시켰기 때문에 뿐만 아니라 실험에 사용된 시편과 해석에 사용된 모델의 형태가 다르기 때문에 얼마간의 차이가 존재하고 있다.

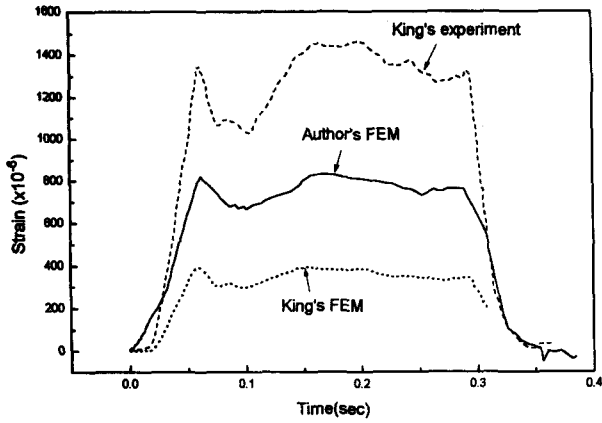


Fig. 3 Predicted and experimentally determined strain variation at superior anterior region of vertebral cortical shell

3-2. 충격 시간에 따른 변화

2000N의 정하중을 받는 경우와 $\Delta t=0.1342$ 초 이고 $F_{max}=2000N$ 의 충격 하중을 받는 경우, 최대 수직방향의 변위량은 각 경우에 대해 각기 1.315mm, 1.6mm 에 달했으며 nucleus의 압력은 2MPa, 1.6MP에 달했다. 그리고 전방향으로의 기울어진 각도는 각기 2.65°, 12.6°에 달했다. 이와같은 차이는 각 후관절에서의 접촉력이 각기 125N, 250N 이기 때문이라 사료된다. Nucleus의 압력차이는 충격이 가해진후 유체성분이 추간판을 빠져나가기 때문이라 여겨진다.

아울러 충격시간 Δt 를 0.1342초 로 한 경우와 $3\Delta t$ 그리고 $1/3\Delta t$ 로 각기 달리 하여 충격시간에 따른 효과를 살펴 보았다. Fig. 4와 5는 각기 nucleus의 압력변화와 후관절에서의 접촉력의 변화를 보여주고있다.

이와같은 그림에서 알 수 있듯이 annulus를 통하여 빠져나가는 유체때문에 추간판이 댐퍼 역할을 하고 있음을 알수있다. 또한 그림에서 볼수 있듯이 충격시간이 길어짐에 따라 유체가 빠져나갈수 있는 시간을 상대적으로 길게 확보 할 수 있으므로 nucleus 의 압

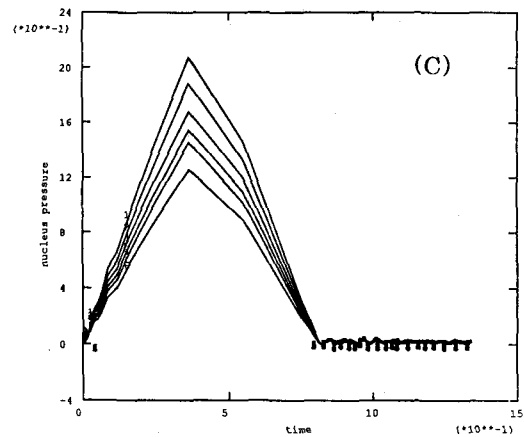
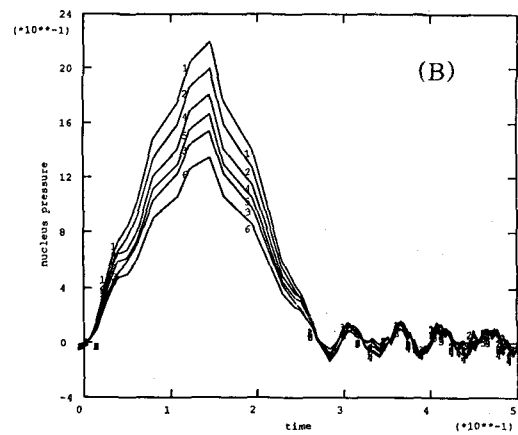
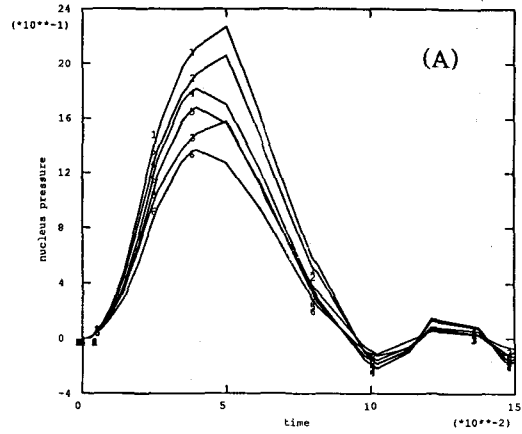


Fig. 4 Nucleus pressure history

(A) $1/3\Delta t$, (B) Δt , (C) $3\Delta t$ cases
 력과 facet contact force 가 상대적으로 작게 발생됨을 볼 수 있다. 한편 cortical shell 및 cancellous core의 응력 분포는 큰 차이를 보이고 있지 않았다.

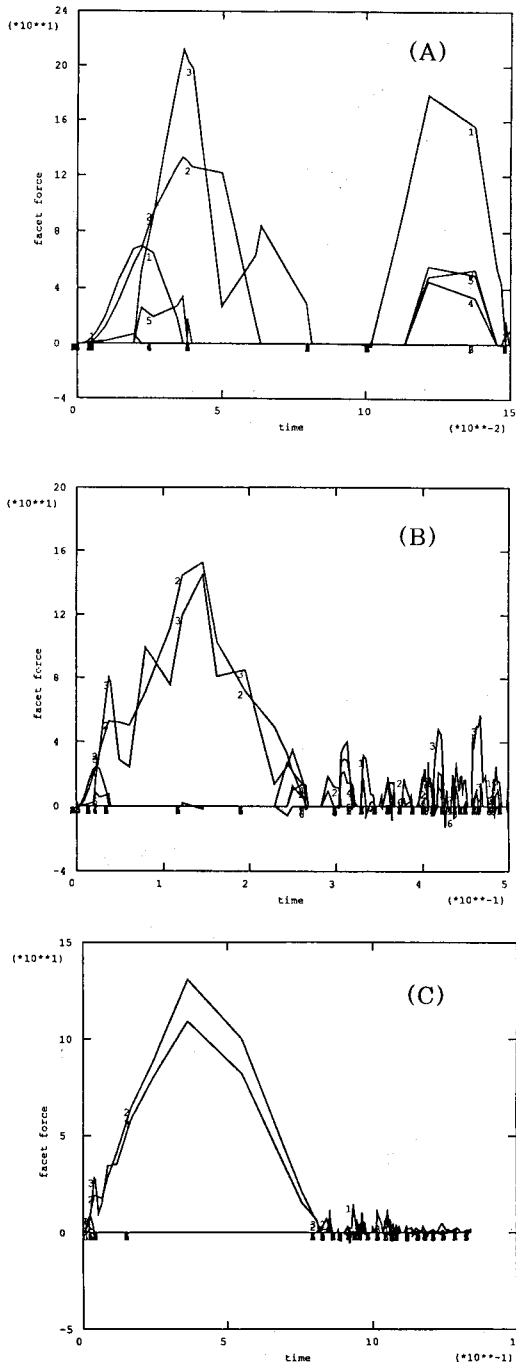


Fig. 5 Facet contact history
(A) $1/3\Delta t$, (B) Δt , (C) $3\Delta t$ cases

3.3 Degeneration 의 영향

추간판의 퇴행이 발생됨에 따라 정하중 상태에서 서와 마찬가지로 충격하중을 받는 경우도 추체의 변위량이 증대되고 따라서 후관절의 접촉력도 증대하게 된다. 이 경우 후관절의 접촉력은 약 20배 증가 하게 되는데 정하중 상태에서 denucleation의 경우 후관절

의 접촉력이 약 2배 증가 하는 것과 비교하면 충격하중에서 추간판의 충격흡수의 역할을 예측할 수가 있다. Fig. 6은 degeneration이 된 경우의 nucleus의 압력 변화와 후관절에서의 접촉력을 보이고 있다. 아울러 이와같이 이유 때문에 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 추체에서는 상대적으로 작은 응력 분포를 보이고 있다.

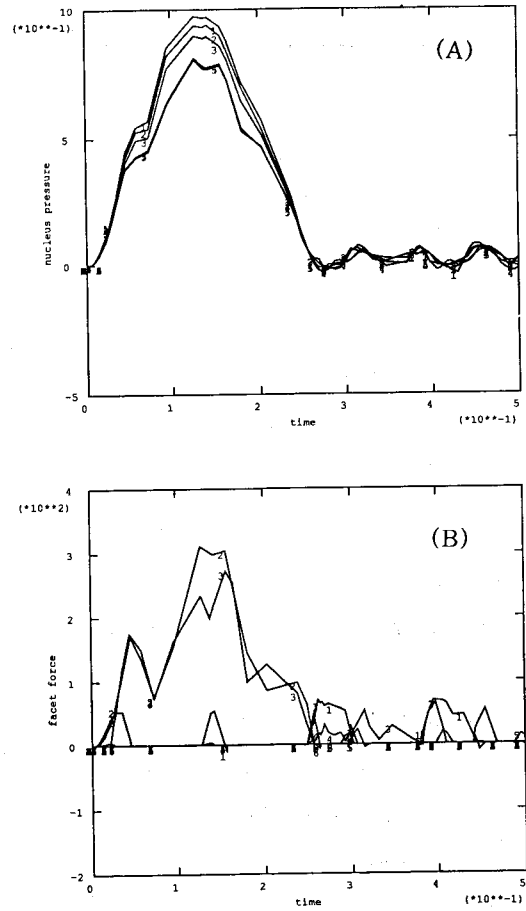


Fig. 6 Nucleus pressure(A) and facet joint contact force(B) history for degenerated disk case

4. 결론

3차원 비선형 모델을 이용하여 충격하중시 요추의 각부분에서 발생하는 반력 및 응력분포를 충격하중이 가해지는 시간을 달리하여 해석하였다. 아울러 추간판의 퇴행이 이루어진 경우 이에 대한 영향을 해석하였다. 이와같은 해석 결과 추간판의 충격 흡수 현상을 추정 할 수 있었다.

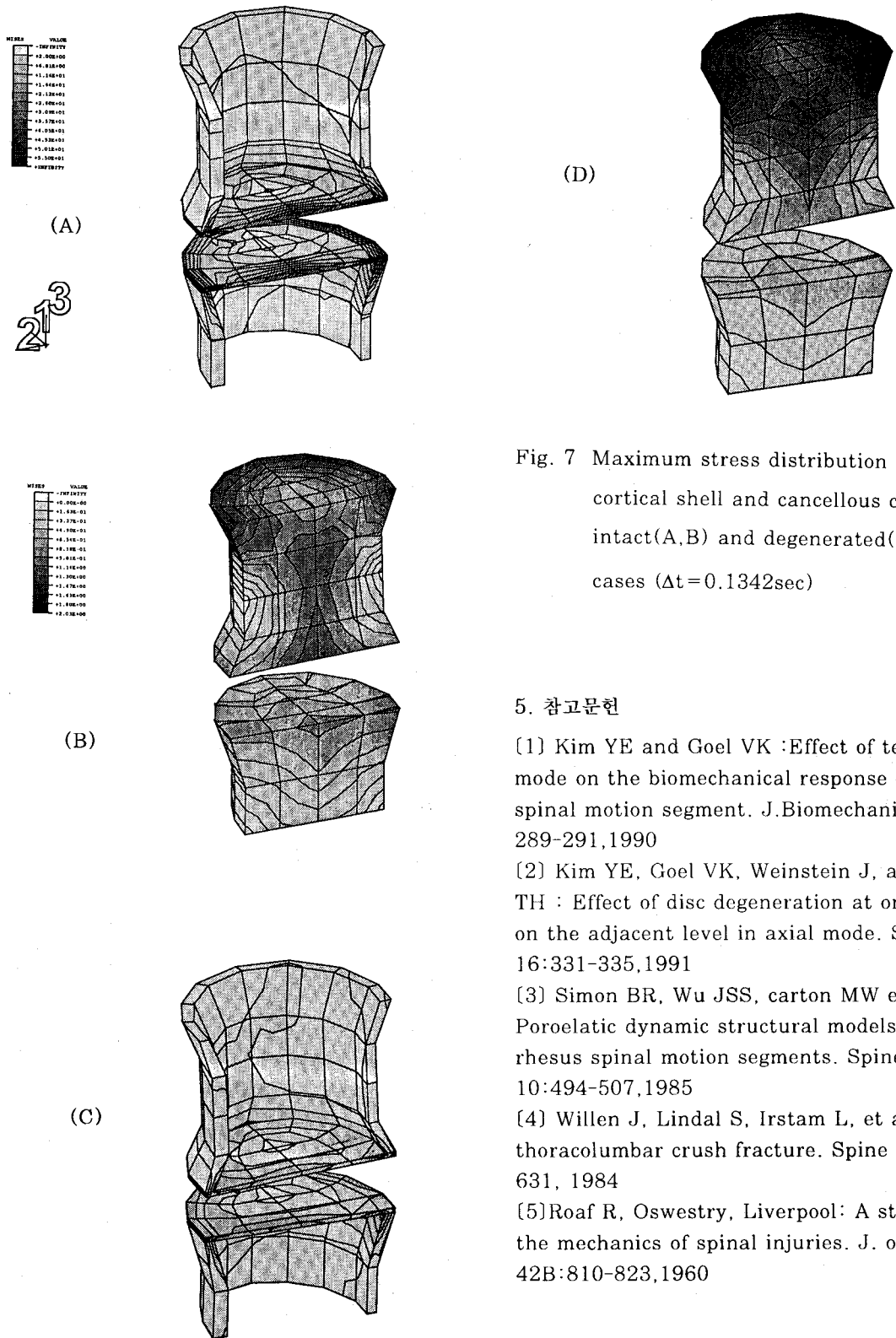


Fig. 7 Maximum stress distribution at cortical shell and cancellous core for intact(A,B) and degenerated(C,D) cases ($\Delta t=0.1342\text{sec}$)

5. 참고문헌

- [1] Kim YE and Goel VK :Effect of tesing mode on the biomechanical response of a spinal motion segment. J.Biomechanics 112: 289-291,1990
- [2] Kim YE, Goel VK, Weinstein J, and Lim TH : Effect of disc degeneration at one level on the adjacent level in axial mode. Spine 16:331-335,1991
- [3] Simon BR, Wu JSS, carton MW et al: Poroelatic dynamic structural models of rhesus spinal motion segments. Spine 10:494-507,1985
- [4] Willen J, Lindal S, Irstam L, et al: The thoracolumbar crush fracture. Spine 9:624-631, 1984
- [5]Roaf R, Oswestry, Liverpool: A study of the mechanics of spinal injuries. J. of BJS 42B:810-823,1960