

# 충격하중 시 추간판과 추체간의 유체 이동에 따른 추체 내 압력분포 변화 분석 Analysis of the Pressure Distribution in the Vertebral Body due to the Fluid Flow between the Disc and Vertebral Body on the Impact Loading Condition

\*한인석<sup>1</sup>, #김영은<sup>2</sup>

\*I. S. Han<sup>1</sup>, #Y. E. Kim(yekim@dku.edu)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 단국대학교 대학원 기계공학과, <sup>2</sup> 단국대학교 기계공학과

Key words : Osteoporosis, Vertebral body, Permeability, Porosity, Trabecular bone

## 1. 서론

요추(Lumbar spine)는 크게 추체와 추간판으로 구성되어 있고, 추체는 해면골(Trabecular bone)과 겉질골(Cortical bone)로 이루어져 있으며, 추간판은 섬유륜(Annulus)과 수핵(Nucleus)로 이루어져 있다. 추체와 추간판 내부에는 골수(Bone marrow)로 채워져 있다.

이러한 요추는 다양한 형태의 하중으로 부터 Spinal cord를 보호하는 역할을 하며 상대적인 운동을 가능하게 하여 몸의 움직임을 유발시키는 중요한 역할을 하는 기관 중의 하나이다. 또한 다양한 하중에 노출이 되어 손상이 발생하는 경우가 많은 부분이기도 하다. 이러한 손상은 동적하중 상태에서 주로 발생되며, 일반인에 비해 골다공화의 진행 정도가 클수록 손상이 심한 것으로 알려져 있다. 이에 대한 연구는 지금까지 많이 진행되어 왔지만 추간판과 추체내부의 유체(골수)이동에 따른 영향까지 고려하지 못한 경우가 대부분이다<sup>1</sup>.

따라서 본 연구에서는 충격하중에 의한 추간판과 추체간의 유체 이동에 따른 추체 변화 메커니즘을 이해하기 위해 서는 추체내부의 해면골을 자세히 구성해 주어야 할 필요가 있다고 판단하여 해면골을 구성하는 섬유주(Trabecular)까지 포함한 상세한 형태의 유한요소 모델을 구성하여 해석을 진행하였다.

## 2. 해석모델

### 2.1 Normal model

추체의 해면골은 매우 복잡한 구조로 이루어져있으며, 추체가 축대칭에 가까운 형태를 보이고 있기 때문에 섬유주 부분을 포함한 2차원 모델을 구성하였다.

정상 상태의 추체로부터 단면 이미지를 추출하여 이를 바탕으로 유한요소 모델을 구성하였다(Fig. 1). 추출된 이미지는 편집을 거쳐 불필요한 부분을 제거하고 보다 이상적인 모습(추체의 말단부에서 중심부로 갈수록 해면골의 밀도가 낮아지도록) 뒤 상용 소프트웨어인 BioNix 3.0를 이용하여 유한요소 모델로 전환시켜 주었다. 이렇게 만들어진 추체 모델에 추간판 모델을 추가하였다. 추체의 겉질골과 섬유주를 제외한 모든 부분은 유체요소로 모델링한 골수로 채워지도록 구성하였으며, 추간판의 섬유륜과 수핵 부분은 다공질(porous)요소로 구성하였다(Fig. 2).

### 2.2 Fluid flow

추간판의 수핵과 섬유륜에 존재하는 골수는 외부의 충격에 의해 30%가량이 섬유륜을 통해 빠져나가게 되고 나머지 70%는 추종판(Endplate)을 통과하여 추체 내부로 흘러들어가게 된다. 추체 내부에 존재하던 혈장은 추간판으로부터 유입되는 혈장에 의해 섬유주 사이사이를 지나 추체로 이어진 혈관을 통해 빠져나가게 된다. 혈장이 섬유주 사이를 지나면서 외부에서 가해진

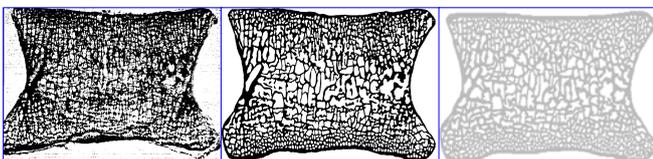


Fig. 1 Modeling Process

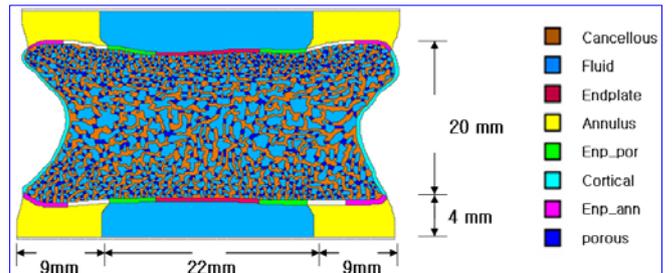


Fig. 2 Normal FE\_model

충격에너지를 흡수하게 되는데, 이를 2차원으로 해석해야 하기 때문에 어느 정도의 가정이 필요하다. 해면골에 존재하는 공극을 통하여 유체(골수)의 흐름이 있어야 하고, 섬유주는 서로 연결이 되어 있어야 외부의 충격에 의해 추체가 무너져버리지 않는다. 이 두 조건은 해면골 내부의 공간과 공간 사이에 존재하는 섬유주의 일정부분을 다공성 물질로 정의함으로써 만족시킬 수 있었다. 추간판 또한 추체의 윗부분과 아랫부분의 절반만을 모델링하여 유체가 각각 위쪽으로 아래쪽으로 나누어 들어갈 수 있도록 하였다.

### 2.3 Osteoporotic model

골다공화가 진행된 이미지의 추체 내부의 형태를 보면, 추체의 중심부의 섬유주가 가장 많이 사라져있고, 추체의 모서리 부분 또한 섬유주가 많이 없어진 모습이다. 이러한 형태를 정상 모델의 해면골 중심부와 모서리부의 섬유주를 일정 양 제거하는 방식으로 적용하였다(Fig. 3).

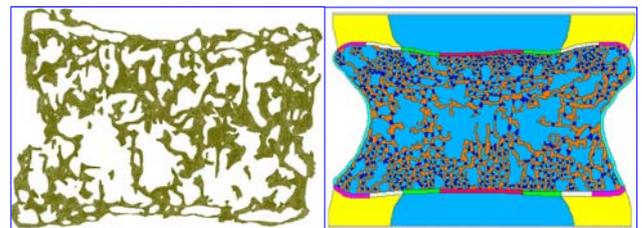


Fig. 3 Osteoporotic FE\_model

## 3. 해석방법

### 3.1 Material

본 연구에 사용된 물성치는 in vitro 실험 결과 자료<sup>2</sup>와 관련논문<sup>3,4</sup>을 참고 하였다. 섬유륜의 물성치는 섬유(Fibers)의 영향까지 고려하여 탄성계수를 기존 자료보다 높은 수치로 입력하였으며, 추종판의 투수능(Permeability)는 4부분으로 나누어 중심부에서 가장 큰 값을 갖도록 각각에 대하여 차등 적용하였다.

### 3.2 하중조건

Solid와 Fluid사이의 상호작용이 추체의 변성에 미치는 영향을 고려하기 위하여 총 240개의 FSI(Fluid Structure Interaction) 경계조건을 각 섬유주에 적용하였으며, 상용 소프트웨어 ADINA8.4 프로그램을 해석에 사용하였다.

하중조건은 0.02초간의 충격하중3000N을 적용하였으며, 1-Step size는 0.002초로 설정하여 총 10-Step동안의 추체의 응력과 추체내부의 압력변화를 살펴보았다.

### 4. 해석결과

충격하중에 의해 추체와 추간판 내의 유체이동 발생하며, 일부 부분은 추간판을 통해 빠져나가기만 대부분의 유체는 추체내부로 밀려들어가 압력을 증가 시키는 것으로 나타났다. 추체 내 압력분포를 살펴보면, 중심 부분에서 가장 높은 압력이 발생됨을 알 수 있고 코너부분은 낮다는 것을 확인할 수 있다. 추중판의 투수능이 가운데 부분이 가장 크고, 섬유륜에 비해 수핵의 공극률이 높아 더 많은 유체를 보관하고 있기 때문에 하중 발생 시 추체의 중심부로 유입되는 유체량이 상대적으로 많아짐에 따라 압력상승이 발생된다(Fig. 4).

정상 추체와 골다공화 추체를 비교한 결과, 추간판의 투수능이 더 낮음에도 불구하고 골다공화 추체가 정상추체보다 내부압력 상승이 더 적은 것으로 나타났다. 정상인 경우 보다 섬유주의 양이 적기 때문에 유체의 이동이 상대적으로 자유로우며, 추체 내 유체가 차지하는 공간도 많아지게 됨으로써 발생하는 현상으로 판단된다. 골다공화가 진행됨에 따라 섬유주 사이의 공간이 넓어지고, 유체와의 접촉 면적도 적어지게 됨으로써 충격하중에 의해 발생된 에너지를 흡수하는 양이 적어지게 된다. 섬유주 소실에 따른 충격에너지 흡수율 저하와 추간판 및 추체내부의 상대적인 압력저하 현상으로 인하여 추체가 받게 되는 하중이 늘어나게 되며, 이렇게 늘어난 하중은 골다공화 추체에 작용하여 뚜렷한 응력 집중현상을 발생시키는 것으로 나타났다(Fig. 5).

Fig. 6은 충격시간 변화에 따른 압력분포 변화를 보여주고 있다.

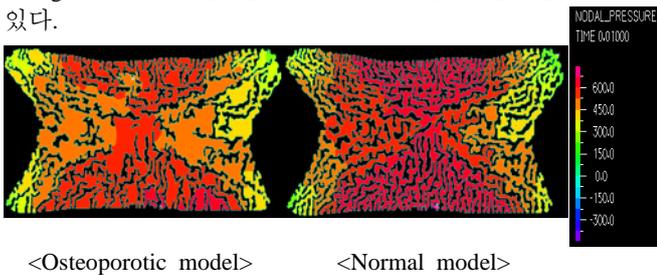


Fig. 4 Pressure distribution at peak compression(t=10ms) in the Vertebral body.

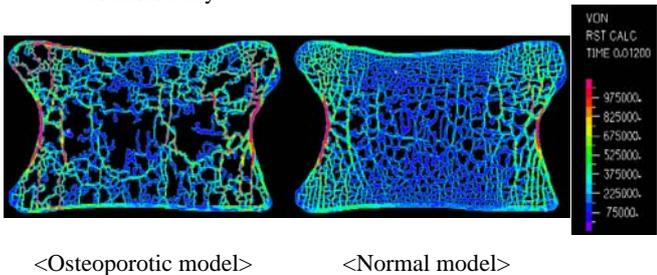


Fig. 5 Von Mises stress distribution in the Vertebral body at t=10ms.

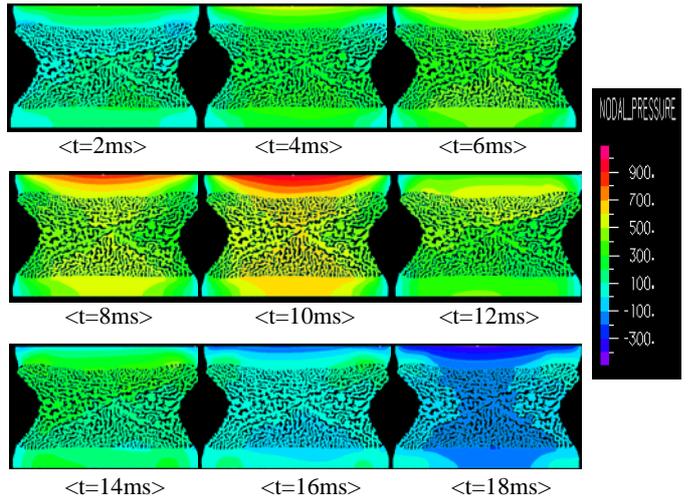
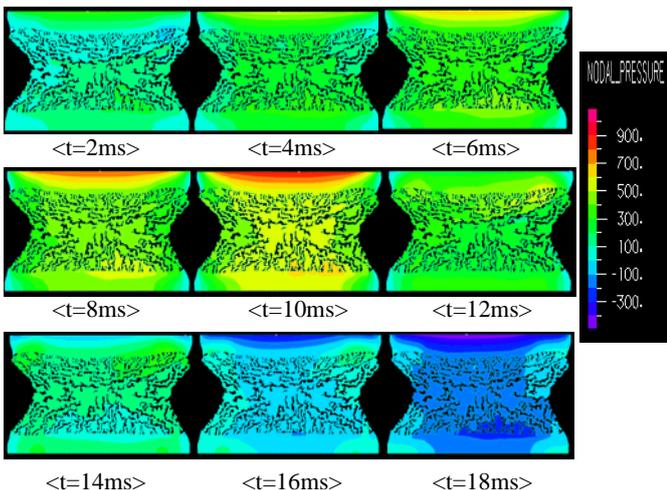


Fig. 6 Variation of pressure distribution

### 결론

해면골을 구성하는 섬유주의 형태와 추체내부의 유체까지를 고려한 유한요소 모델을 구성하여 해석한 결과 기존에 시행되었던 연구에서는 볼 수 없었던 유체이동에 따른 압력발생 및 분포변화 메커니즘을 확인할 수 있었다. 압력분포의 경우 추체내 위치별 관찰이 가능했으며, 하중에 의한 추체와 추간판 간의 유체이동 경향과 그에 따른 영향을 알 수 있었다는 점에서 본 연구의 의의를 찾을 수 있다.

### 참고문헌

1. C.K. Lee, Y. E. Kim, C.S. Lee, et al., "Impact Response of the Intervertebral Disc in a Finite-Element Model," Spine, Vol. 25, pp.2431-2439, 2000.
2. F. A. Pinter, "The Biomechanics of Spinal Elements," Doctoral dissertation, Department of Biomedical Engineering, Marquette University, Milwaukee.
3. J. Kraemer, D. Kolditz, R. Gowin., "Water and Electrolyte Content of Human Intervertebral Discs Under Variable Load," Spine, Vol. 10, pp.69-71, 1985.
4. M. Cari, Whyne, Serena S. Hu, and Jeffery C., Lotz, "Burst Fracture in the Metastatically Involved Spine," Spine, Vol. 28, pp.652-660, 2003.