

## 다공탄성체 척추운동분절 유한요소 모델에서 추간판의 변성이 충격 거동에 미치는 영향 해석

김영은#, 박덕용\*

### Analysis of Impact Response in a Poroelastic Spinal Motion Segment FE Model according to the Disc Degeneration

Young Eun Kim<sup>#</sup> and Duk Yong Park<sup>\*</sup>

#### ABSTRACT

To predict changes in biomechanical parameters such as intradiscal pressure, and the shock absorbing mechanism in the spinal motion segment under different impact duration/loading rates, a three dimensional L3/L4 motion segment finite element model was modified to incorporate the poroelastic properties of the motion segment. The results were analyzed under variable impact duration for normal and degenerated discs. For short impact duration and a given maximum compressive force, relatively high cancellous pore pressure was generated as compared with a case of long impact duration, although the amount of impulse was increased. In contrast relatively constant pore pressure was generated in the nucleus. Disc degeneration increased pore pressure in the disc and decreased pore pressure in the cancellous core, which is more vulnerable to compressive fracture compared with intact case.

**Key Words :** Spinal motion segment (척추운동분절), Disc degeneration (추간판변성), Impact loading(충격하중), Impact duration (충격지속시간), Poroelastic model(다공성탄성체모델)

#### 1. 서론

척추의 운동분절(spinal motion segment)은 두개의 추골(vertebra)과 이 사이에 끼인 추간판(disc)으로 이루어지며 이러한 운동분절이 서로 연결되어 인체의 척추를 이루게 된다. 운동 분절의 기본 요소인 추간판은 겔 상태의 수핵(nucleus)이 16-25 겹의 윤상인대들로 둘러 싸여진 형태를 취하고 있다. 이 추간판과 서로 연결된 추체(vertebral body)는 종판(endplate)을 사이에 두고 추

간판과 연결되어 있다. 이 운동분절에 외부 하중이 가해질 경우 추체 해면골 내의 유체와 추간판 특히 수핵 내의 유체는 이동하게 되어 추간판과 추체 내의 응력평형 상태를 이룰 수 있도록 하여 준다. 그러나 외부 하중이 급격하게 가해질 경우, 즉 충격하중의 경우에는 이 유체의 이동에 충분한 시간이 확보되지 못하여 해면골과 수핵 그리고 윤상인대의 간극(pore)내에 갇힌 유체는 정하중 상태 보다 큰 압력을 발생 시키게 된다. 이와 같은 이유 때문에 운동분절의 강성도도 하중속도

접수일: 2002 년 12 월 16 일; 게재승인일: 2003 년 8 월 14 일

# 교신저자: 단국대학교 기계공학과

E-mail: yekim@dankook.ac.kr, Tel: (02) 709-2561

\* 단국대학교 대학원

(loading rate)에 따라 급속히 증가하게 된다. 따라서 대부분의 척추 부상, 특히 수직압박골절은 대부분 충격하중이 가해질 경우 발생되게 된다.

추간판은 인체가 노화됨에 따라 변성(degeneration)이 발생되며 이로 인하여 수핵 내의 유체의 구성비가 줄어들며 겔 상태의 수핵은 점차로 섬유질화 되어 간다. 이에 따라 운동 분절의 정 하중시의 강성도는 정상상태보다 증가하게 되며, 이와 같은 사실은 이미 in-Vitro 상태의 실험<sup>1</sup>을 통하여 입증되었다.

해면골과 추간판 내에 존재하는 유체의 이동은 특히 충격 하중이 가해질 경우 운동분절의 충격흡수에 주된 요소가 된다. 이로 인하여 척추체는 매우 큰 충격하중을 견뎌내게 된다. 지금까지 척추운동 분절내의 유체이동을 고려한 여러 유한요소모델이 개발되었으며 대부분의 모델<sup>2,4</sup>은 운동분절 내의 크릴 현상에 주안점을 두어 해석되었다. 그러나 앞서 언급하였듯이 대부분의 부상은 충격하중 시 발생하고 있어 충격하중에 따른 운동분절 내의 변화를 해석할 필요가 대두된다. 따라서 본 연구에서는 충격 하중에 따른 척추 운동분절의 응답 특성 해석에 사용된 다공성 탄성체 모델<sup>5</sup>을 수정하여 추간판의 변성에 따른 응답특성의 변화를 해석하고자 한다.

2. 유한요소모델

CT 이미지를 이용하여 개발하였던 L3-4 운동분절의 3 차원 유한요소 모델 중 추체와 추간판의 모델만을 선택하여 모델을 제작하였다. 운동분절이 시상면에 대칭된 형상을 보이므로 오른쪽 반만을 모델링 하였다. 추체내의 피질골(cortical shell)은 쉘 요소를 사용하였다. 추간판과 추체의 해면골은 점성유체로 가득찬 다공성 구조물의 형태를 보이고 있으므로 해면골과 종판(end plate)은 20 절점의 브릭 요소를 사용하였다. 추간판도 역시 세분화된 20 절점의 다공성 탄성체로 모델링 하였으며 Fig. 1 은 개발된 추체-추간판의 모델을 보여주고 있다. 크릴 해석에 사용되었던 기존의 연구들에서와 같이 윤상인대는 섬유소가 첨가된 복합재 형태의 다공성 물질로 모델링 하였다. 윤상인대의 섬유소들은 3-D 케이블(cable) 요소가 연속된 각 층판(lamellae)층에 따라 수직 축으로부

터 각기 70°와 -70°의 방향을 가지고 연속적으로 연결된 형태로 모델링 하였다. Table 1 은 본 모델에서 사용된 물성치를 보이고 있는데, 이와 같은 값들은 이미 여러 연구자들에 의해 추간판의 특성을 잘 나타내고 있음이 확인되었다. 윤상인대 기저물의 공극비(void ratio)에는 3의 값을 대입하였는데 이는 Kraemer 등<sup>6</sup>의 의한 총 윤상인대 무게에 대한 유체 함유량 측정치(65-75%)와 비슷한 71%의 값을 나타내고 있다. 수핵 부분은 정상상태 추간판의 유체 함유량과 비슷하도록 공극비 6을 취하였다. 추간판의 위치에 따른 투수능(permeability)은 기존의 실험적 측정값<sup>7</sup>을 이용토록 하였다. 변성된 모델에서는 수핵의 공극비 및 점유 면적을 변화시켜 모델링 하였다. 윤상인대와 수핵의 윗부분에 위치한 해면골은 정상상태의 경우에는 각기 공극비를 달리 하여 기존의 실험적 측정 결과 각기 다른 값으로 나타나는 해면골의 강성도 차이를 나타내도록 하였다. 한편 변성된 경우에는 해면골 내의 공극비를 모두 5.8로 증가시켜 해면골내 위치에 따른 강성도를 균일화 하도록 하였다. 시상면(sagittal plane)상의 대칭 때문에 시상면에 수직 되는 방향으로의 구속 조건을 가했으며 추간판의 아래 부분도 수직방향으로의 운동을 구속 시켰다. 또한 추간판의 맨 바깥부분에서는 공극압(pore pressure)을 0으로 하였으며 팽윤 압력(swelling pressure)은 해석시 고려하지 않았다. 앞서 수행된 연구 결과<sup>5</sup>에 의하면

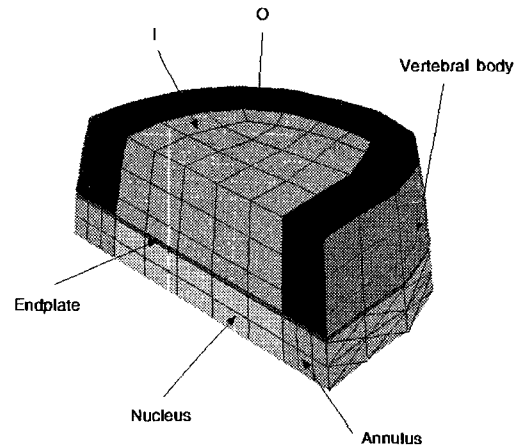


Fig. 1 Vertebra-disc finite element model used for the analysis

Table 1 Material properties

Material		Young's modulus (MPa)	Density (kg/mm <sup>3</sup> )	Poisson's Ratio	Void Ratio	Permeability (m <sup>4</sup> /Ns)		
Cortical bone		10000	1.83E-6	0.25				
Cancellous bone	(N)	100	1.00E-6	0.25	4(I)5.02 (O)		1.0E-10	
	(D)						2.0E-9	
Endplate		10000	1.83E-6	0.25	4		1.0E-10	
Annulus (matrix)	(N)	5	1.20E-6	0.45	3	(A)	(C)	(R)
	(D)				2.3	1.53E-15	1.15E-15	1.92E-15
Nucleus (Solid phase)	(N)	2	1.36E-6	0.49	6		1.62E-15	1.68E-15
	(D)	9		0.45	2.7		1.0E-13	

N : Normal D : Degenerated A : Axial direction C : Circumferential direction R : Radial direction  
I : Inner layer O : Outer layer

아래쪽 부분만 모델링된 추체 윗부분에서 유체의 출입이 자유로운 개 경계조건(open boundary condition) 이 실제 상황과 유사한 결과를 보이고 있기 때문에 본 연구에서도 동일한 조건을 사용하였다. 추체에 가해진 충격력은 삼각형 형태로 단순화시켜 최고점에서 3kN 이 되도록 가하였으며 충격지속시간( $\Delta t$ )을 변화시켜 가면서 이에 대한 영향을 해석하였다. 계산은 비선형 계산이 용이한 상용 프로그램인 ABAQUS (Hibbit, Karlsson & Sorenson, Inc. Version 5.8)를 이용하였다. 시간 적분에는 음 함수법(implicit method)이 적용되었다.

### 3. 해석 결과

정상 상태와 변성된 추간판 모델을 대상으로 충격시간 변화에 따른 응답특성을 구해 비교하였다. Fig. 2 에서 각 충격 지속시간에 따른 수핵에서의 최대 발생 압력 및 기저물(matrix)의 최대 수직 압축응력을 보여주고 있다. 충격지속시간 변화에도 불구하고 수핵 내 기저물에서 발생하는 압축응력 변화는 정상 및 변성된 추간판 모두에서 변화가 거의 없었다. 다만 정상 상태에서의 압축응력이 변성된 경우보다 다소 크게 발생하였다. 그러나 압력은 변성된 경우가 정상상태보다 크게 나타났으며 충격 지속 시간 변화에 따라 큰 변화를 보이고 있지 않았다. 반면에 정상상태 추간판에서는 충격지속시간이 짧은 경우 상대적으로 큰 압력이 발생하였으며 충격지속시간이 증가됨에 따라 점차로 감소하는 경향을 보이고 있었

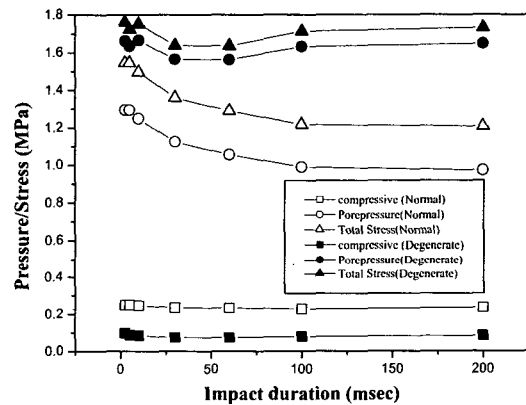


Fig. 2 Variation of average pore pressure, compressive stress in the solid skeleton of nucleus and total compressive stress (sum of two) of nucleus at peak response for different impact duration

다. 윤상인대에서 발생하는 압력은 수핵 내의 압력에 비해 작은 값이 계산 되었으며, 변성된 경우에는 윤상인대의 위치에 관계없이 모두 정상 상태에 비해 상대적으로 큰 압력이 발생되었다. Fig. 3 에서 볼 수 있듯이, 정상 상태나 변성된 경우 모두 추간판의 후방 부분의 윤상인대에서 가장 큰 압력이 계산되었다. 한편 윤상인대 기저물의 압축응력의 변화는 Fig. 4 에서 볼 수 있듯이 충격 지속시간 변화에 따른 변화가 거의 나타나지 않고 있었다. Figs. 5, 6 은 각기 윤상인대의 윗부분에 위치한 추체내(cancellous core; Fig. 1 의 O 부분)에서 발생된 압력과 기저물 즉 해면 골의

수직 압축 응력 변화를 보여주고 있다. 압력은 정상상태의 경우가 변성된 경우보다 거의 2 배 가까운 크기를 보이고 있었다. 발생 압력 변화와는 달리 해면골에 발생하는 압축응력은 추체의 앞부분에서의 응력을 제외하곤 정상상태의 경우가 모두 큰 값을 보이고 있었으며, 충격지속시간 변화에 따른 영향은 크지 않았다. 반면에 Fig. 7 에서 볼 수 있듯이 수핵의 윗부분에 위치한 추체 해면골에서는 윤상인대의 윗부분에 위치한 추체 해면골에서 보다 큰 압력 및 압축응력이 나타났다.

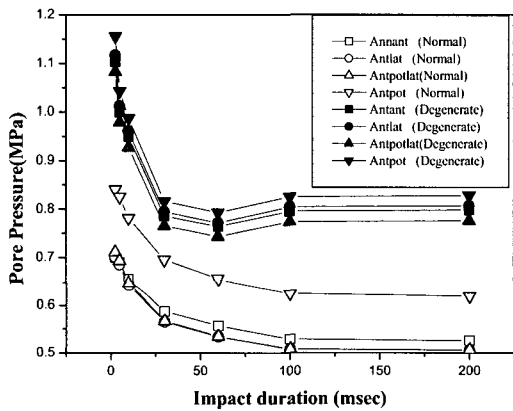


Fig. 3 Variation of average pore pressure at different region of annulus for different impact duration

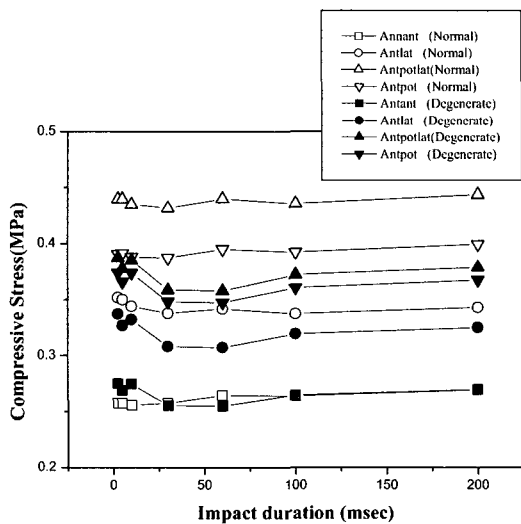


Fig. 4 Compressive stress in the solid skeleton of the annulus for normal and degenerated discs

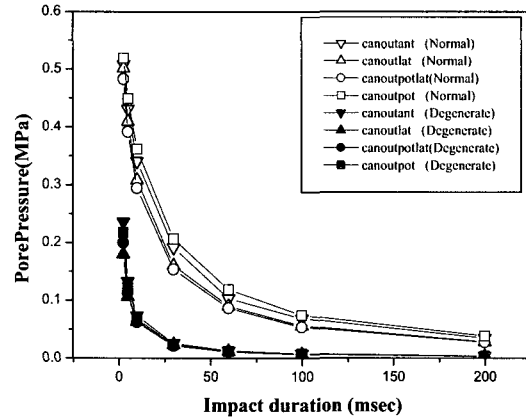


Fig. 5 Pore pressure in the cancellous core in region (O)

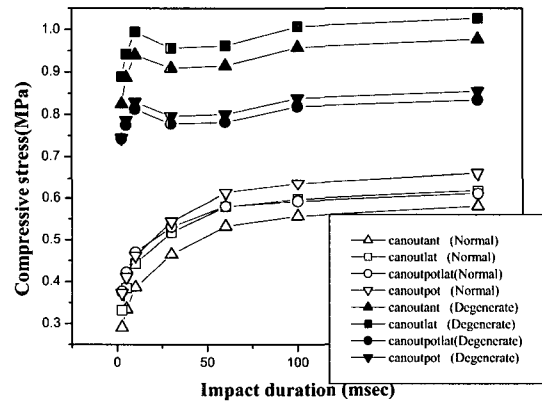


Fig. 6 Compressive stress in the solid skeleton of the cancellous core in region (O)

그리고 충격 지속시간 변화에 따른 응답특성도 정상 상태의 추간판 경우에서 뚜렷하게 차이를 보이고 있는 반면에 변성된 경우는 상대적으로 충격 지속 시간에 따른 영향이 작은 편이었다.

#### 4. 토의

충격 하중 조건에서의 척추 운동분절의 응답 특성을 다공성 탄성체 3-D FE 모델을 통하여 해석하였다. 추간판에 가해진 충격력으로 인하여 발생된 압력, 변위 등은 시간이 지남에 따라 점차적으로 평형을 이루게 된다. 발생된 수핵의 간극 압력은 짧은 충격 시간에서는 유체가 빠져나갈 시간이 충분하지 않아 상대적으로 비교적 높은 간극 압력이 발생되며 이 압력이 초기의 외부

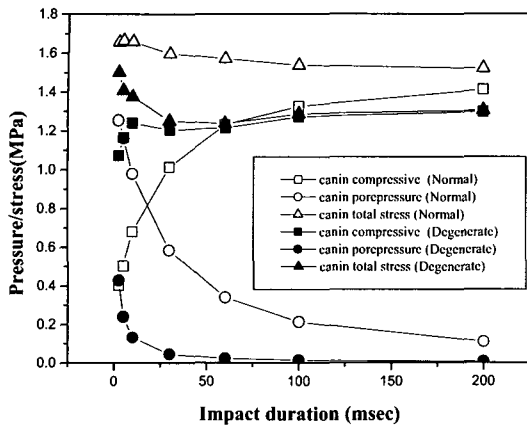


Fig. 7 Variation in the average pressure, compressive stress, and total compressive stress in the solid skeleton of cancellous core in region (I) at peak response

하중을 지탱하는데 중요한 역할을 하게 된다. 추간판이 변성 되었을 경우 정상상태의 추간판에서 보다 상대적으로 유체의 점유율이 작아 같은 충격력에서 큰 간극 압력이 생성 되게 된다. 따라서 이 두 가지 값을 합한 총 압축력은 변성된 수핵에서 큰 값이 나타나게 되며 충격 지속 시간에 따른 영향도 비교적 적게 받게 된다. 윤상인대에서의 간극 압력도 수핵에서와 마찬가지로 변성된 추간판에서 상대적으로 작은 공극비 때문에 정상 상태와 비교하여 큰 압력이 발생되고 있다. 반면에 기저물에 수직 압축력은 상대적으로 작은 값이 계산되어 작은 수직 변형량을 예측할 수가 있다. 본 연구에서는 추간판의 변성이 심하게 일어나지 않은 상태를 대상으로 추간판내의 공극비만 변화 시켜 계산되었으나, 추간판의 변성이 심하게 되어 윤상인대의 화이버(fiber)의 인장 강도가 약화 된다면 본 연구에서의 계산 결과보다 훨씬 큰 수직 압축응력이 예상되고 있다. 이와 같은 결과는 기존의 실험적 연구에서 볼 수 있듯이 추간판의 변성은 상대적으로 추간판의 강성도를 증가시킨다는 연구 결과<sup>1</sup>와도 잘 일치하고 있다. Willen 등,<sup>8</sup> Oxland 와 Panjabi<sup>9</sup>에 의하면, 전형적으로 압축충격에 의한 외상은 6-8ms 에서 발생된다고 한다. Figs. 3 과 5 에서 볼 수 있듯이 변성된 추간판의 경우에는 윤상인대와 추체 해면골의 압력 차이가 정상 상태보다 크게 나타나고 있다. 이와 같은 해석 결과는 이 두 물질 사이에

위치한 종판의 파단이 변성된 추간판에서 쉽게 발생 할 수 있음을 예측하게 된다. 이와 같은 계산 결과는 수핵의 바로 윗부분에 위치한 해면골에서도 같이 나타나고 있어 변성된 추간판에서 종판의 파단이 일어날 확률이 정상상태의 경우보다 훨씬 큼을 예상케 하여 주고 있다. 종판의 파단 예측은 응력 해석으로 판단되어야 하나 본 모델의 경우 종판을 한 층으로 모델링한 관계로 정확한 응력 분포 예측이 어려워 인접한 요소 내의 발생 압력으로 판단토록 하였다. 기존의 연구에 의하면 종판에서의 응력은 추체 피질골의 부분보다도 훨씬 크며, 이런 이유로 수직 압축력으로 종판의 파괴가 일어난다. 이러한 결과는 Brown 과 Roaf 의 실험<sup>10</sup>에 의하여서도 증명되었다. 그들은 사체에서 두 개의 추체와 하나의 추간판으로 구성된 요추의 운동분절을 취하여 수직 압축하중을 작용한 후 표본은 여러 개의 시상면으로 얇게 나누어 병리학적과 방사선적인 실험으로 여러 가지로 미소파괴와 크랙을 밝혀내었다. 수핵의 윗부분에 위치한 종판과 해면골은 정하중과 축 진동하중에서의 수직방향에서 제일 약한 부분이고, 이것은 정상상태의 추간판에서 쉬모르노드(Schmorl's node)가 빈번히 일어나는 현상으로도 설명될 수가 있다. 본 연구를 통하여 정상상태의 추간판에서는 추체 해면골에 가해지는 초기 충격력은 발생압력에 의해 주로 지지 되고 충격 지속 시간이 길어 짐에 따라 해면골에 의해 지지되고 있음을 보이고있다. 그러나 변성된 추간판의 경우에는는 압력 보다는 주로 해면골 자체에 의해 지지 되고 있음을 알 수 있었다.

### 5. 결론

수직 충격력이 가해질 경우 요추 분절에 대한 다공성 탄성체 3 차원 유한요소 해석 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 수직 충격이 가해지는 경우 짧은 충격시간동안 발생하는 상대적으로 큰 압력 생성은 충격하중에 대한 추간판의 초기 안정성을 증가시키며, 충격지속시간이 증가됨에 따라 증대되는 추간판에서의 충격 에너지 흡수현상은 척추 운동분절의 안정성을 보장하게 된다. 그러나 추간판의 변성이 발생됨에 따라 추간판과 추체 해면골 사이의 발생 압력 차이로 인하여 상대적으로 압박골절의 부상 가능성이 높아

짐을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 특히 짧은 시간대의 충격하중이 가해질 경우 더 큰 부상 가능성을 보이고 있다. 본 연구에서는 초기 상태의 추간판의 변형을 대상으로 하여 계산을 수행 하였으나 심한 변성 상태에서는 다른 계산 결과를 예측할 수 가 있다. 따라서 이와 같은 경우에 대한 추가적 해석이 요구되고 있다.

### 후 기

이 연구는 2001 학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

### 참고문헌

1. Umehara, S., Tadano, S., Abumi, K., Katagiri, K., Kaneda, K., Ukai, T., "Effect of Degeneration on the Elastic Modulus Distribution in the Lumbar Intervertebral Disc," *Spine*, Vol. 21, pp. 811-820, 1996.
2. Argoubi, M. and Shirazi-Adl, A., "Poroelastic Creep Response Analysis of a Lumbar Motion Segment in Compression," *J. of Biomech.*, Vol. 29, pp. 1331-1339, 1996.
3. Laible, J. P., Pflaster, D. S., Krag, M. H., Simon, B. R., Haugh, L. D., "A Poroelastic-Swelling Finite Element Model with Application to the Intervertebral Disc," *Spine*, Vol. 18, pp. 659-670, 1993.
4. Wu, J. S. S. and Chen, J. H., "Clarification of the Mechanical Behavior of Spinal Motion Segments through a Three-Dimensional Poroelastic Mixed Finite Element Model," *Med Eng Phys*. Vol. 18, pp. 215-224, 1996.
5. Lee, C. K., Kim, Y. E., Lee, C. S., Hong, Y. M., Jung, J. M., Goel, V. K., "Impact Response of the Intervertebral Disc in a Finite Element Model," *Spine*, Vol. 25, pp. 2431-2439, 2000.
6. Kraemer, J. D., Kolditz, M., Gowin, R., "Water and Electrolyte Content of Human Intervertebral Discs under Variable Load," *Spine*, Vol. 10, pp. 69-71, 1985.
7. Klisch, S. M. and Lotz, J. C., "A Special Theory of Biphase Mixture and Experimental Results for Human Annulus Fibrosus Tested in Confined Compression," *J. of Biomech. Eng.*, Vol. 22, pp. 180-188, 2000.
8. Willen, J., Lindah, S., Irstam, L., Aldman, B., Nordwall, A., "The Thoracolumbar Crush Fracture. An Experimental Study on Instant Axial Dynamic Loading: The Resulting Fracture Type and its Stability," *Spine*, Vol. 9, pp. 624-631, 1984.
9. Oxland, T. R. and Panjabi, M. M., "The Onset and Progression of Spinal Injury: A Demonstration of Neutral Zone Sensitivity," *J. of Biomech.*, Vol. 25, pp. 1165-1172, 1992.
10. Brown, T., Hansen, R. J., Yorra, A. J., "Some Mechanical Tests on the Lumbosacral Spine with Particular Reference to the Intervertebral Discs," *J Bone Joint Surg[Am]*, Vol. 39, pp. 1135-1164, 1957.