

추간판 응력분포에 대한 광탄성 해석

영남대학교 의과대학 정형외과학교실

신현국 · 이재창 · 안면환 · 안종철 · 인주철

서 론

추간판의 생화학적 변화와 기계적 손상 등에 의한 퇴행성 변화로 인하여, 요추 추간판의 기능장애 및 병리적 상태를 초래하게 되고, 이에 따른 생역학적 변화로 말미암아 요통이 야기된다는 것은 이미 잘 알려져 있다.

여러 학자들에 의해서 추간판의 형태학적인 변화, 후관절, 인대, 신경 근육체계의 병리학적인 변화의 관찰을 통해 요통의 병리 생리학적 연구가 진행되어 왔다. 추간판의 구조적인 변화가 요통의 유발인자라는 것이 지배적인 의견이 되고 있으나 정확한 기전은 밝혀내지 못하고 있다.¹⁻³⁾

생역학적 개념의 도입에 따라 여러 학자들에 의해서, 요추의 운동에 따른 추간판의 역학적 분석을 통해 생역학적 요통발생 인자를 구하고, 추간판과 수핵의 퇴행성 변화시 수핵의 하중 흡수능력의 소실과 척추의 운동이 이들의 생역학적 기전에 미치는 변화를 연구하여 요통의 예방 및 치료에 도움을 얻고져 하였다.

저자는 기립 중립위, 굴곡위 및 신전위에서의 정상 추간판과 수핵이 제거된 퇴행성 상태의 추간판을 3차원 Epoxy모형으로 제작하고, 수직하중을 부하하여 추간판의 응력 분포 및 수핵이 추간판의 응력분포에 미치는 영향을 관찰하였다. 특히 추간판의 퇴행성 변화에 따

른 수핵의 소실과 변형에 의한 하중 흡수능력의 변화를 관찰하여 요통환자의 요부교육과 운동요법의 생역학적 의미를 확인하고자 하였다.

대상 및 방법

광탄성 실험을 위한 Epoxy모형 제작을 위하여 요추가 잘 보존된 사체를 대상으로 하였다. 본 연구에서의 기능성 척추단위의 대상으로는 제 4,5 요추 및 추간판을 이용하였다.(Fig. 1)

1. 모형 제작

3차원 광탄성 실험용 추체 및 추간판을 제작하기 위해, 사체에서 획득한 추체와 추간판

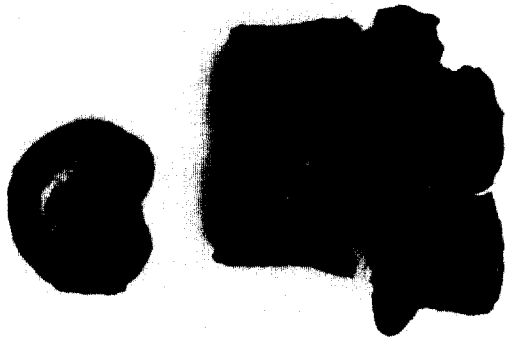


Fig. 1. The fourth and fifth lumbar spine with the disc of the cadaver.

을 각각 분리하고, 주위 근육 및 인대들을 제거하여 건조시킨 후, 주체는 그 상태에서 주형을 제작하였고 추간판에는 지점토를 첨가하여 원통형의 주형용 모형을 제작하였다.

주형용 재료는 공업용 실리콘(TSE 3562 Toshiba Chemical Co.)을 사용하였다. 이들 주체와 주형용 모형을 각각 용기의 밑면에 닿지 않도록 잘 고정한 후에, 실리콘과 경화제를 10 : 1의 비율로 잘 혼합하여 부어넣고, 상온에서 24시간 경화시켰다. 주체와 추간판을 분리시킨 후, 잔존 실리콘 가스를 제거하기 위하여 130°C에서 12시간 정도 재가열하여 건조시킨다. 이때 Epoxy모형 제작시 기포를 발생시키는 잔존가스가 빠져나가고 주형은 처음

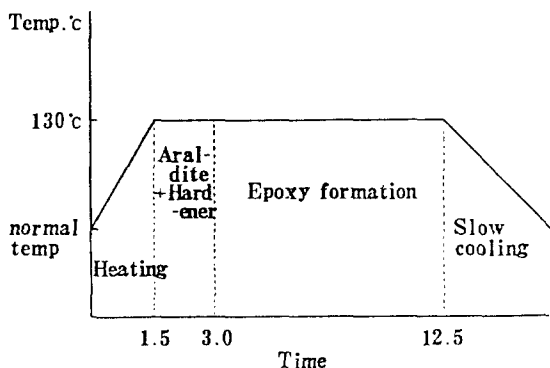


Fig. 2. The curling cycle in the stress freezing furnace.

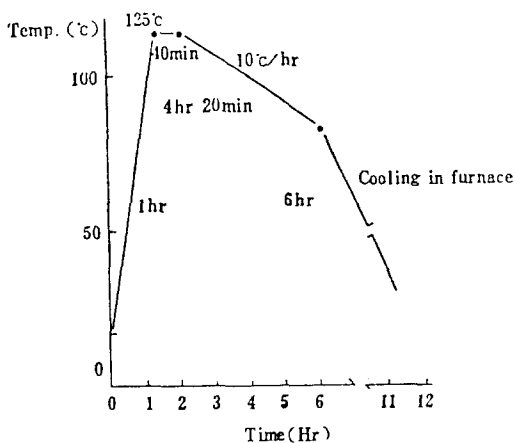


Fig. 3. The annealing cycle of the epoxy.

건조때보다 강도가 강하다. 이 주형을 결합하여 노(furnace)안에 넣고 Araldite(CT-200, Cyba Geigy Ltd.)와 경화제(HT 901, Cyba Geigy Ltd.)를 중량비 10 : 3으로 계량하고, 먼저 Araldite를 130°C에서 충분히 녹인 후에 경화제를 혼합하고, 액이 투명하게 된 이후에 주형용에 서서히 주입하였다. 그리고 Epoxy의 curling cycle(Fig. 2)에 따라 130°C에서 10시간 정도 유지시킨 후, 노냉하여 상온에 도달하면 Epoxy모형을 분리시켰다. 상기 제작한 모형에서 발생할 수 있는 잔류응력을 확인하기 위하여 편광기를 통하여 검사하며 잔류응력이 발생한 것은 소둔 cycle(Fig. 3)에 따라 열처리한 후에 시험편으로 사용하였다. 기립 중립위, 굴곡위, 최대 신전위의 모형을 설정하기 위해서는 문헌고찰과 10명의 정상성인의 각각의 위치의 측방사진을 분석하여, 최대 굴곡위 5도, 중립 기립위는 -15도, 최대 신전위는 -20도로 설정하였다.(Fig. 4)

그리고 수핵의 생역학적 기능을 관찰하기 위하여, 상기 3가지 체위에서 정상 수핵의 추간판 모형은 섬유유과 수핵을 합한 체적을 2등분한 후, 홈을 파고, 실리콘(TSE 3562)을 홈에 부어넣고, 상온에서 건조시켰으며, 퇴행성 수핵은 실리콘을 제거한 상태에서 추간판

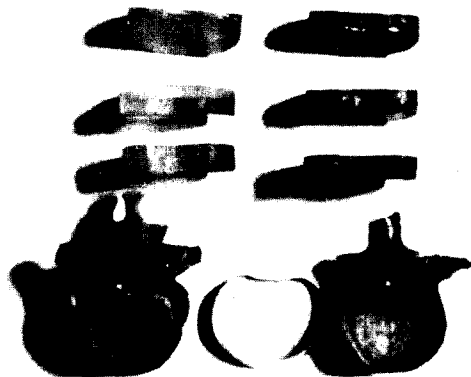


Fig. 4. Epoxy models of the L4-L5 segment (erect neutral, maximal flexed, maximal extended posture)

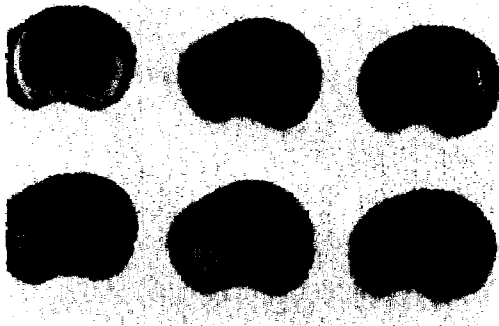


Fig. 5. 3 kinds of the disc models with and without silicon rubber in their centers.

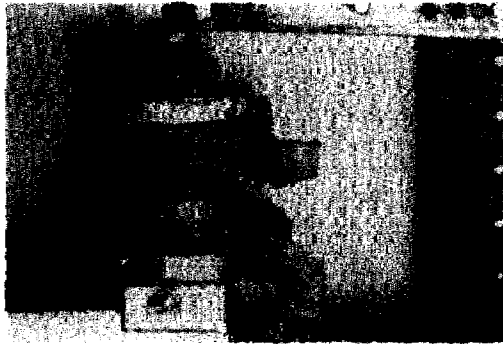


Fig. 6. 3 dimensional epoxy model in erect neutral posture in the loading device in the stress freezing furnace.

P 는 실제 인체에서 발생하는 최대하중이고, ah 는 응력 동결온도에서의 Epoxy수지의 광탄성 감도이고, ar 은 상온에서의 광탄성 감도이다. 문헌고찰²³⁾에 의하면, 정상인의 추간판에 1KN(102KG)의 수직하중을 부하하면 추간판의 압축량은 $2.06mm \pm 0.16mm$ 이다.

본 실험에서 제작된 실험모델의 평균 변형량이 약 6mm이므로, 3KN의 하중을 부하하여 Epoxy수지의 광탄성 감도가 상온에서는 0.95 mm/kgf(ar)이고, 응력 동결온도에서는 40

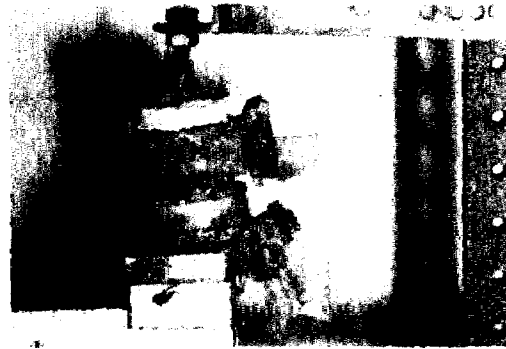


Fig. 7. 3 dimensional epoxy model in maximal flexed posture in the loading device in the stress freezing furnace.

모형을 제작하여 총 6가지의 추간판 모형을 제작하였다.(Fig. 5)

2. 방법

1) 하중 조건 및 3차원 응력 동결

추간판은 장축의 압축력, 전단력, 우력 등의 복합 하중이 작용하나 본 실험에서는 축 방향의 압축력만을 하중장치에 부하하였다. 3차원 응력동결로 내에서 Epoxy수지로 제작한 추체와 추간판을 실험장치에 부착한 후, 수직 압축력을 부하하였다.(Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8)

광탄성 실험에서 하중의 크기(F)는 $F = P/ah/ar$ 이다.

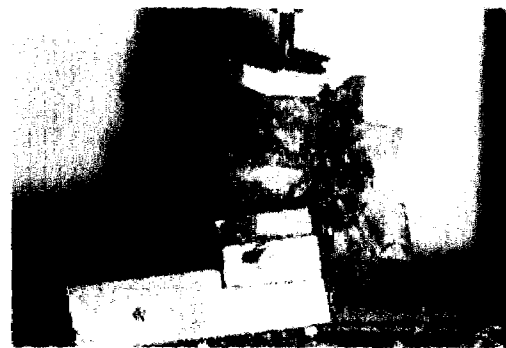


Fig. 8. 3 dimensional epoxy model in maximal extended posture in the loading device in the stress freezing furnace.

mm/kgf(ah)이기 때문에 실험의 하중은 $E = P/ah/ar = 306.12/40/0.95$ 즉, 약 8kg이다. 또한 광탄성 부위를 가장 효과적으로 얻기 위하여 4kg, 6kg, 8kg 3개의 모형으로 예비실험을 행하여 등색선이 가장 적절히 나오는 8kg으로 하중을 결정하였다.

응력의 동결 cycle(Fig. 9)에 따라 상온에서부터 130도까지 상승시킨 뒤 100분간 예열하고 부하를 시작하였다. 그 후에 시간당 4도의 비율로 서냉시켜 Epoxy의 glass전이역인 90도 이하가 되면 전원을 끄고 노냉시켰다가 추간판의 중심선에서 한쪽은 세로 5mm 간격의 4개의 절편을 얻어 각각 L₁, L₂, L₃, L₄로 하였고, 반대쪽은 추간판의 하변에서 가로 5mm 간격의 6개의 절편을 획득하여 T₁, T₂, T₃, T₄, T₅, T₆로 하였다.(Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13)

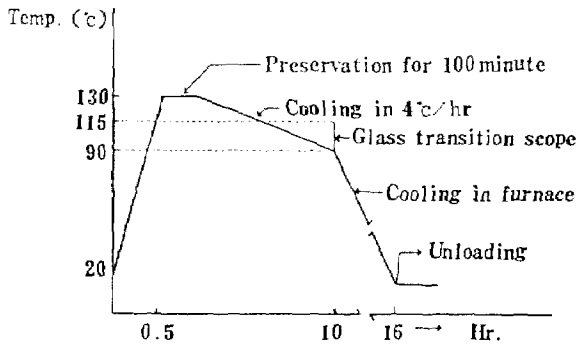


Fig. 9. The stress freezing cycle.

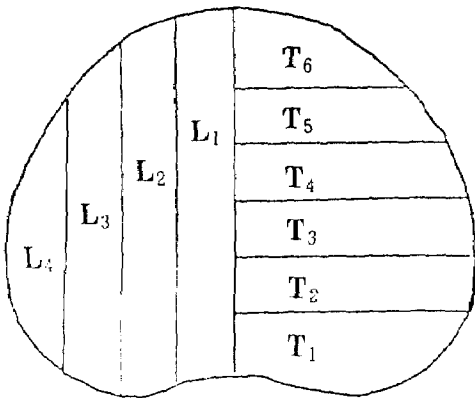


Fig. 10. 5mm-slice patterns of the disc.



Fig. 11. The slices of the disc models in erect neutral posture.

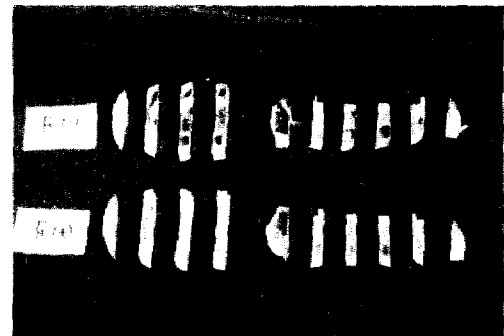


Fig. 12. The slices of the disc models in maximal flexed posture.

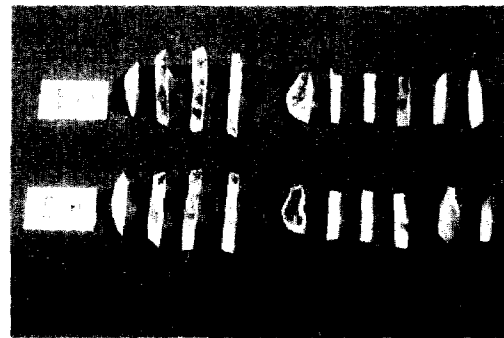


Fig. 13. The slices of the disc models in maximal extended posture.

이러한 절편에서 선명한 부위를 획득하기 위하여 α -Bromonaphthalene과 유동 파라핀을 용적비 1 : 0.585의 혼합액에 시험편을 넣

어서, 사진을 촬영하였다.

2) 응력 해석방법

실험에서 획득한 등색선의 사진을 Optical comparator에서 확대하여 무늬의 차수(N)을 측정하였다.(Fig. 15)

무늬의 차수와 두께의 주 응력차($\sigma_1-\sigma_2$)에는 다음과 관계가 있다.

$$\sigma_1 - \sigma_2 = N / ar \cdot t$$

여기서 ar는 광탄성 감도이며, t는 시험편의 두께를 나타낸다. 외부의 경계선상에서는 2개의 주응력의 성분중 1개가 0이 되므로 최대응력은 $\sigma = N / ar \cdot t$ 로 나타낼 수 있다.

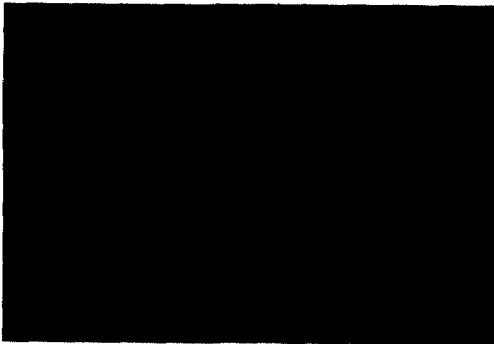


Fig. 14. The pattern of the isochromatic fringes in the sagittal plane.



Fig. 15. The pattern of the isochromatic fringes in the coronary plane.

그러므로 등색선의 무늬 차수는 시험표면의 응력집중의 크기를 나타낼 수 있다.

본 실험에서 시험편의 두께가 5mm이기 때문에 1차 무늬에 해당하는 응력은

$$\sigma = N / ar \cdot t = 1(0.95mm / kg \cdot 5mm)$$

로 21.05kg/cm²이다.

각 절편의 최대 무늬 차수를 획득하여 각 절편간의 응력 집중도의 차이를 분석하여 응력분포를 상대 비교하였다.

각각의 무늬 차수의 값을, 추간판 모형의 변연에 따라 법선 방향으로 도식화하여 응력 분포도를 작성한 후, 수핵의 유부와 3가지 체위각에 따른 응력 분포의 변화를 관찰하였다.

성 적

3가지 체위에서 Epoxy모형의 응력동결시 이 힘에 상당하는 8kg의 수직 압축력을 부과하여 등색선의 양상을 관찰하고, 그 무늬 차수와 응력을 해석한 결과는 다음과 같다.

1. 기립 중립위

세로로 절단한 절편에서는 수핵이 있는 경우는 최대 무늬 차수가 전방에 2차(L₁), 후방에 3차(L₁)로 전방 부위보다 후방 부위에 고응력이 집중되었으며, 전·후방부 모두 내측부(L₁, L₂)가 고응력이고 외측부(L₃, L₄)로 이동할수록 저응력이 관찰되었다.(Table. 1)

수핵이 없는 경우는 최대 무늬 차수가 전방에 4.5차(L₁), 후방에 2차(L₁)로 후방보다 전방부에 고응력이 집중되었으며, 그 응력의 크기도 증가하였다. 내외측부의 응력은 수핵이 있는 경우와 동일하였다.(Table.1)

가로로 절단한 절편에서는 수핵이 있는 경우는 후방부(T₁, T₂)에 고응력이 집중되면서

Table. 1 The isochromatic fringes in erect neutral posture.

Classification Segment position	Nucleus pulposus(+)		Nucleus pulposus(-)	
	Anterior portion	Posterior portion	Anterior portion	Posterior portion
L1	2	3	4.5	2
L2	1.5	2.5	2	2
L3	1	2	2	1
L4	0.5	1	0.5	0
T1		3		1.5
T2		2		4
T3		1.5		3
T4		1.5		3
T5		1		
T6		0.5		

전방부(T5, T6)로 이동할수록 저응력이 나타났고 수핵이 없는 경우는 후방부(T2)와 중심부(T3)에 고응력이 집중되었다.(Table. 1)

응력 분포도의 분석에 의하면 수핵이 있는 경우는 추간판의 외형을 따라 균등히 분포되는 반면에 수핵이 없는 경우는 응력의 분포가 전반적으로 전방으로 이동하면서 후방의 응력의

크기가 감소하고 전방 내측부와 후외측부에 국소적으로 응력의 집중이 증가함을 관찰할 수가 있었다.(Fig. 16, Fig. 17)

2. 최대 굴곡위

세로로 절단한 절편에서는 수핵이 있는 경우는 최대 부너 차수가 전방 내측부(L1)에 2차,

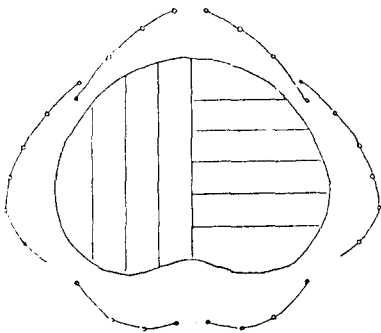


Fig. 16. The stress distribution diagram of the disc model with nucleus pulposus in erect neutral posture.

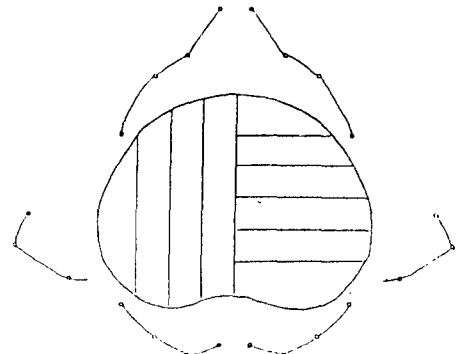


Fig. 17. The stress distribution diagram of the disc model without nucleus pulposus in erect neutral posture.

후방 내측부에 1차로 전방에 고응력이 집중되었으며, 내측에 고응력(L₁, L₂), 외측(L₃, L₄)에 저응력을 나타내었다.(Table 2)

수핵이 없는 경우는 최대 부피 차수가 전방(L₁)에 3차, 후방(L₁)에 1차로 전방에 고응력이 집중되었으며, 내측(L₁, L₂)에 고응력, 외측

(L₃, L₄)에 저응력을 나타냈다.(Table. 2)

가로로 절단한 절편에서는 수핵이 있는 경우는 전방부(T₅, T₆)와 중심부(T₄)에 고응력이 수핵이 없는 경우는 중심부(T₃, T₄)에 고응력이 나타났다.(Table 2)

응력 분포도의 분석에 의하면 수핵이 있는

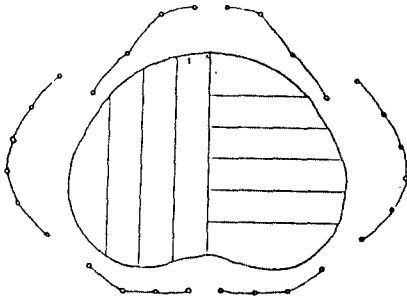


Fig. 18. The stress distribution diagram of the disc model with nucleus pulposus in maximal flexed posture.

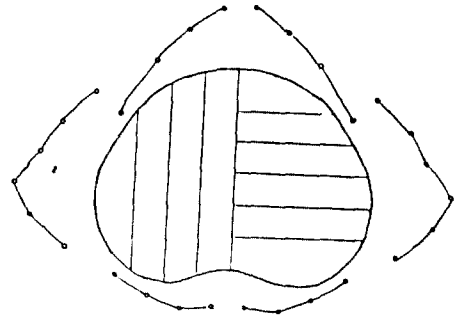


Fig. 19. The stress distribution diagram of the disc model without nucleus pulposus in maximal flexed posture.

Table. 2 The isochromatic fringes in maximal flexed posture.

Classification Segment position	Nucleus pulposus(+)		Nucleus pulposus(-)	
	Anterior portion	Posterior portion	Anterior portion	Posterior portion
L1	2	1	3	1
L2	2	0.5	2	0.5
L3	0.5	0.5	1	0
L4	0.5	0.5	0.5	0
T1		1		1.5
T2		2		3
T3		2.5		4
T4		3		3
T5		3		3
T6		3		2.5

Table. 3 The isochromatic fringes in maximal extended posture.

Classification Segment position	Nucleus pulposus(+)		Nucleus pulposus(-)	
	Anterior portion	Posterior portion	Anterior portion	Posterior portion
L1	4	1.5	1	0.5
L2	4	1.5	1	0.5
L3	3.5	1	0.5	0
L4	3	0.5	0	0
T1		2		3
T2		2		3
T3		4.5		2
T4		4		3
T5		4		3
T6		2		2

경우는 추간판의 외형을 따라 균등한 응력 분포를 보이면서 수핵이 없는 경우보다 저응력을 나타내었다.

수핵이 없는 경우는 국소적으로 후방부와 중심부에 고응력의 집중을 보였다.(Fig. 18, Fig. 19)

3. 최대 신전위

세로로 절단한 절편에서는 수핵이 있는 경우는 최대 부의 차수가 전방(L₁)에 4차, 후방(L₁)에 1.5차로 전방부에 고응력이 집중되었으며, 내측(L₁, L₂)이 외측(L₃, L₄)보다 약간의 고응력을 나타냈다.(Table. 3)

수핵이 없는 경우는 최대 부의 차수가 전방(L₁)에 1차, 후방(L₁)에 0.5차로 전방부가 후방부보다 약간의 고응력을 나타냈다.(Table 3)

가로로 절단한 절편에서는 수핵이 있는 경

우는 중심부(T₄)에 고응력이, 수핵이 없는 경우도 중심부(T₃)에 고응력이 집중되었다.(Table 3)

응력 분포도의 분석에 의하면 수핵이 있는 경우는 전체적인 응력의 값이 상당한 고응력을 보이고 수핵이 없는 경우는 비교적 균등한 응력의 분포를 보이나 중심부에 약간의 고응력을 보이고 있었다.(Fig. 20, Fig. 21)

4. 기립 중립위와 최대 굴곡위의 비교

1) 수핵(+) 경우

중립위의 후방부(L₁, L₂) 고응력이 굴곡시 2차 정도 현격히 감소되는 양상을 보이고 있으며, 가로 절편에서는 중립위의 후방부(T₁, T₂)고응력이 굴곡시 전방부로 이동하는 양상을 보이고 있었다.(Fig. 22)

2) 수핵(-) 경우

세로 절편에서는 기립 중립위의 전방 내측

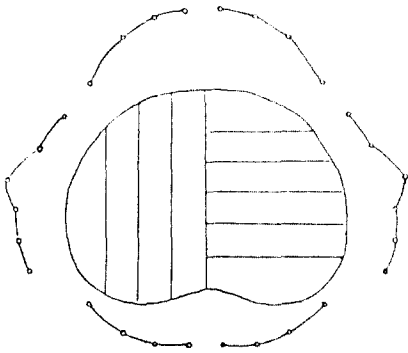


Fig. 20. The stress distribution diagram of the disc model with the nucleus pulposus in maximal extended posture.

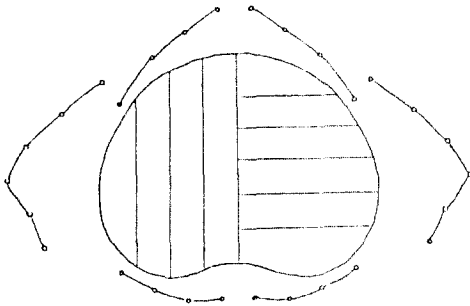


Fig. 21. The stress distribution diagram of the disc model without nucleus pulposus in maximal extended posture.

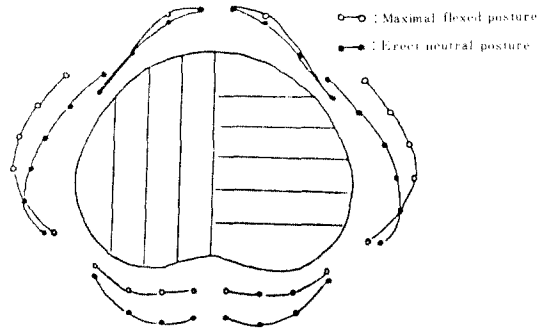


Fig. 22. The stress distribution diagram in maximal flexed posture in comparison with in erect neutral posture. The nucleus pulposus is present.

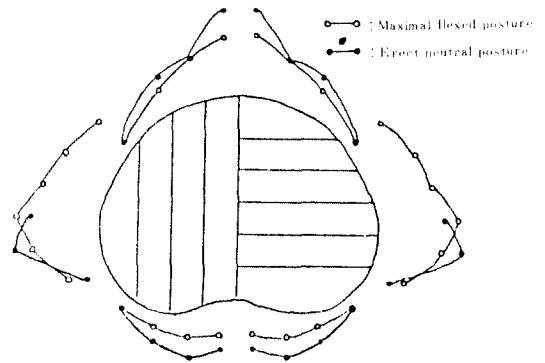


Fig. 23. The stress distribution diagram in maximal flexed posture in comparison with in erect neutral posture. The nucleus pulposus is absent.

(1)과 후방 내측(L₁, L₂)의 고응력이, 굴곡시 저응력을 보이고, 가로 절편에서는 중립위의 후방부 고응력(T₂)이 전방부로 이동하는 양상을 보이고 있었다.(Fig. 23)

5. 기립 중립위와 최대 신전위의 비교

1) 수핵(+) 경우

세로 절편에서는 신전위의 전방부(L₁, L₂, L₃, L₄) 고응력이, 중립위에서는 저응력을 보이며 신전위의 후방부(L₁, L₂, L₃, L₄)응력이 중립위에서 약간의 고응력을 보이고 있고, 가로 절편에서는 중립위의 후방부(T₁) 고응력이 신전위에서 중심부(T₄)로 이동하는 양상을 보이고 있었다.(Fig. 24)

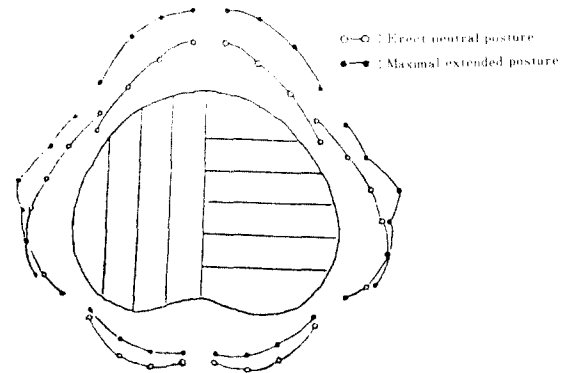


Fig. 24. The stress distribution diagram in erect neutral posture in comparison with in maximal extended posture. The nucleus pulposus is present.

Table. 4 The isochromatic fringes in the longitudinal segments.

Classification	Nucleus pulposus(+)		Nucleus pulposus(-)	
	Anterior portion	Posterior portion	Anterior portion	Posterior portion
L1	N(2)	N(3)	N(4.5)	N(2)
	F(2)	F(1)	F(3)	F(1)
	E(4)	E(1.5)	E(1)	E(0.5)
L2	N(1.5)	N(2.5)	N(2)	N(2)
	F(2)	F(0.5)	F(2)	F(0.5)
	E(4)	E(1.5)	E(1)	E(0.5)
L3	N(0.5)	N(1)	N(0.5)	N(0)
	F(0.5)	F(0.5)	F(1)	F(0)
	E(3.5)	E(1)	E(0.5)	E(0)
L4	N(0.5)	N(1)	N(0.5)	N(0)
	F(0.5)	F(0.5)	F(0.5)	F(0)
	E(3)	E(0.5)	E(0)	E(0)

N : Erect neutral posture (-15°)

F : Maximal flexed posture ($+5^\circ$)

E : Maximal extended posture (-20°)

2) 수핵(-) 경우

세로 절편에서는 중립위의 전방 내측(L₁, L₂)과 후방 내측(L₁, L₂)의 고응력이 선진서 저응력을 보이고 가로 절편에서는 후방부(T₅)의 고응력이 중심부(T₃, T₄)로 이동하는 양상을 보이고 있었다.(Fig. 25)

6. 최대 굴곡위와 최대 신전위의 비교

1) 수핵(+) 경우

세로 절편에서는 선진위의 전방부와 후방부 고응력(L₁, L₂, L₃, L₄)이 굴곡시 전방부는 2차 정도 현저히 감소하며 후방부는 1차 정도 감

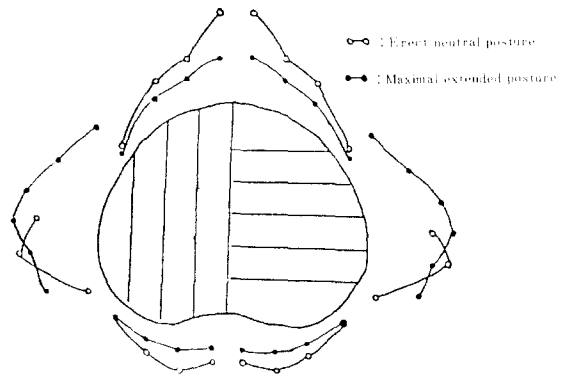


Fig. 25. The stress distribution diagram in erect neutral posture in comparison with in maximal extended posture. The nucleus pulposus is absent.

Table. 5 The isochromatic fringes in the transverse segments.

Classification Segment position	Nucleus pulposus(+)		Nucleus pulposus(-)	
	Anterior portion	Posterior portion	Anterior portion	Posterior portion
T1		N(3)		E(1.5)
		F(1)		F(1.5)
		E(2)		E(3)
T2		N(2)		N(4)
		F(2)		F(3)
		E(2)		E(3)
T3		N(1.5)		N(3)
		F(2.5)		F(4)
		E(2)		E(4.5)
T4		N(1.5)		N(3)
		F(3)		F(3)
		E(3)		E(4)
T5		N(1)		
		F(3)		F(3)
		E(2)		E(3)
T6		N(0.5)		
		F(3)		F(2.5)
		E(2)		E(2)

N : Erect neutral posture (-15 °)

F : Maximal flexed posture (+5 °)

E : Maximal extended posture (-20 °)

소하는 양상을 보이고 가로 절편에서는 신전
위의 중심부(T4 고응력이 전방부(T4, T5, T6)

로 이동하는 양상을 보이고 있었다.(Fig. 26).
2) 수핵(-) 경우

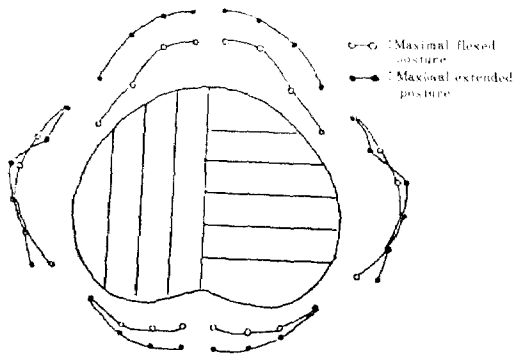


Fig. 26. The stress distribution diagram in maximal flexed posture in comparison with in maximal extended posture. The nucleus pulposus is present.

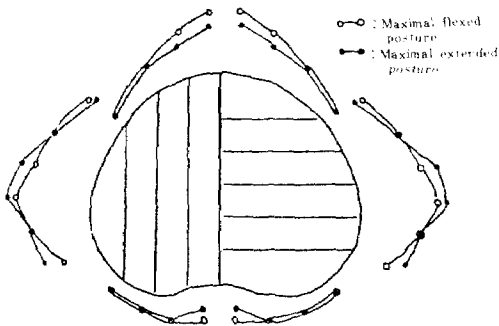


Fig. 27. The stress distribution diagram in maximal flexed posture in comparison with in maximal extended posture. The nucleus pulposus is absent.

세로 절편에서는 굴곡위의 전방부(L₁, L₂)와 후방부(L₁)응력이 신전시 감소하는 양상을 보이며 가로 절편에서는 굴곡위의 중심부(T₃) 고응력이 신전시 중심부(T₃, T₄)로 약간 증가 되는 양상을 보이고 있었다.(Fig. 27)

고 찰

오랫동안 요통의 병리 생리학적인 연구가 진행되어 왔는데, Schmorl⁴⁾은 추간판의 형

태학적인 변화, Ghormley⁵⁾은 추간판절의 병리학적인 변화, Walsh는 인대의 병리학적인 변화, Jung and Brunschwig은 신경 근육 체계의 병리학적인 변화에 의해서 요통의 기전을 연구하여 왔다.

Mixter and Barr⁶⁾는 추간판 탈출은 대부분 좌골 신경통의 원인이며 요통은 좌골 신경통의 전단계로서 발생한다고 보고했다.

현재는 추간판의 구조적인 변화가 요통의 유발인자라는 것이 지배적인 의견이 되고 있으나 정확한 기전은 밝혀내지 못하고 있다.^{1,3)}

그러나 요통은 수핵의 퇴행성 변화로 인해 섬유륜이 파괴되고 추간판의 안정성이 감소하며 이러한 요소들은 추간판의 변형을 일으켜서 후방 척추인대의 신경구조와 신경근에 압력을 가하여 발생한다고 추측되어진다.

근래 생역학적 개념이 정형외과에 도입됨에 따라 Naylor와 Smare⁷⁾는 요추와 추간판 내압을 Bourdon gauge pressure indicator로서 측정하여 연령 증가에 따른 압력의 감소를 보고하였다.

Nachemson은 사체의 추간판내의 압력을 compression apparatus, dynamometer, manometers for air pressure, needles and polyethylene tubing, electromanometer, mionograph, calibration chamber, planimeter의 기구로써 측정하는 방법과 나이, 추간판의 리학적인 범위내의 하중에서는 나이, 추간판의 퇴행성 변화 및 위치에 따라 큰 변화는 없었으며 추간판의 수직하중을 받았을 때 수핵의 정수역학적인 작용을 보고하였다.

그러나 퇴행성 변화가 아주 심한 추간판에서는 섬유륜에 대한 수핵의 압력이 낮아서 수직하중시 섬유륜에 대한 수직하중이 증가하였다.⁸⁾

광탄성 실험은 투명한 가변물질에 하중을 부하하고 편광을 통과시키면 복굴절하는 성질을 이용하여 응력을 이용하는 방법으로, pho-

toelastic coating법도 있으나 정확도 등의 문제로 주로 모형을 이용하여 응력을 해석한다.

Milch⁹⁾가 광탄성 실험법을 인체의 골에 처음 시도한 이래 Masabayashi, Ito, Arima 등은 2차원의 모형에서 척추에 시도되어 왔다.

Kameo, IKEDA(1969)에 의해 요추와 추간판에서의 2차원 및 3차원 모형을 제작하여 중립위, 최대 굴곡위 및 최대 신전위에서의 추간관의 응력을 분석하였다.

2차원 모형은 주 응력(principal stress)의 분석 능력에 한계가 있으며, 3차원 모형은 척추 및 추간관의 중앙부와 측부의 시상면에서의 응력의 차이를 관찰하는데 장점이 있어 요추 추간관의 응력을 분석하는 본 실험에 적당하였다.¹⁰⁾

척추의 기능적 단위는 전후로 구분되는데 전방부는 상·하척추의 흡수체의 기능을 담당하여 후방부는 척수 등 신경구조물을 보호하는 추궁관, 척추경, 각 분절의 운동에 관여하는 근육과 인대가 부착하는 극돌기 및 횡돌기 등으로 형성되며 30%의 체중이 부하되고 각 단위의 운동방향을 지시 혹은 제한하는 후방관절돌기 혹은 후관절 등이 있다.

Brown¹¹⁾ 등은 요추의 후방부가 없는 운동 분절에 하중을 가했을 때 연골단판의 골절이 발생했으며 추간판은 건재했다. 이 결과로서 추간판의 강도가 추체보다 더 강하다는 것이 입증되었다.

추간판은 연골단판, 섬유륜, 수핵으로 구성되어 있으며, 제 1,2 경추간 관절을 제외한 23개의 추간판이 존재한다.

연골단판은 초자연골로서 수핵의 압력에 대한 장벽역할을 하고, 섬유륜은 탄력섬유가 꼬여져 망을 이룬 듯한 구조를 하고 있다. 섬유륜들은 나선형으로 배열되어 추간판의 평면에서 30도의 각도로 위치하고 인접 그룹과는 120도의 각도를 유지한다. 내측 섬유륜은 연

골판에, 중간 섬유륜은 상하 척추의 성장판에, 외측 섬유륜은 척추체에 부착한다.¹²⁾

수핵은 점다당질을 함유한 점단백질로 둘러싸인, 느슨하고 투명한 교원질 섬유 3차원의 망상조직이다.¹³⁾ 수분 함유량이 70~90%이고 추간판 부피의 30~50%을 차지한다. 중·후부의 집합점 근처의 약간 후방부에 쌍안경 모양의 타원형으로 위치한다.⁸⁾

수직하중이 가해질 때 섬유륜과 함께 충격을 흡수하며 하중을 수핵은 수분과 내압을 가진 삼투압 체계로 알려져 있다.³⁾

Hendry는 퇴행성 추간판의 수분 함유량의 감소를 보고하였으며 나이의 증가에 따라 스트레스 환경 아래에서는 수분 함유 능력이 소실된다는 결론을 내렸다.

여러 학자들에 의해서 추간판 특히 수핵의 하중 흡수 능력이 강조되어지고 있다.^{3,8,12,14,15)}

본 실험에서도 응력 분포도를 분석하면 동일 하중에도 불구하고 수핵이 있는 경우는 없는 경우보다 추간판 외형을 따라 비교적 균등한 응력 분포를 보이고, 수핵이 없는 경우는 국소적인 응력의 집중을 나타내고 있다.

그러므로 수핵은 하중이 가해질 때 섬유륜과 함께 충격을 흡수하며 하중을 균등히 섬유륜에 분배하나 퇴행성 변화로 인하여 수분 함유량이 감소되면 이러한 기능의 소실과 섬유륜에 대한 하중을 증가시켜 섬유륜의 퇴행성 변화와 함께 요통을 유발한다고 추측되어 진다.

수핵이 있는 경우는 굴곡위시 신전위에 비해 응력 분포가 전반적으로 전방으로 이동하면서 추간판 외형을 따라 매우 균등한 응력 분포를 나타내고 있어 수핵이 있는 경우는 굴곡 운동이 요통환자의 운동요법에 좋을 것으로 사료되어진다.(Fig. 26)

최대 굴곡위와 최대 신전위의 응력 분포도를 비교해 보면 수핵이 없는 경우는 신전위시 추간판 중심부에 약간의 국소적인 응력의 집중을

보이나 신전위가 굴곡위보다 전후방이 저응력을 나타내면서 비교적 균등한 응력 분포를 보이고 있으므로 수핵이 없는 경우는 굴곡보다는 신전운동이 요통환자의 운동요법에 적합할 것으로 추측되어 진다.(Fig. 27)

요 약

요추의 중립위, 굴곡위 및 신전위에서의 응력 분포의 차이와 수핵의 유무에 따른 응력 분포의 변화를 관찰하기 위해 본 연구를 시행하였으며 등색선의 양상을 관찰하고 그 응력을 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기립 중립위에서는 수핵이 있는 경우는 전방 부위보다 후방부위에 고응력이 집중되었으며, 전후방 모두 내측부와 중간부위가 고응력이고 외측부로 이동할수록 저응력이 관찰되었다.

수핵이 없는 경우는 후방보다 전방부에 고응력이 집중되었으며 국소적으로 응력이 집중되는 양상을 보이고 있다.

2. 최대 굴곡위에서는 수핵의 존재에 관계없이, 전방보다 후방부에 고응력이 집중되었으며, 수핵 유무 비교시 수핵이 있는 경우보다 전방이 저응력, 후방은 거의 동등한 응력 분포를 나타내었다.

응력 분포도의 분석에 의하면 전반적으로 균등한 응력 분포 양상을 나타냈다.

3. 최대 신전위에서는 수핵 유무에 관계없이 전방부에 고응력, 후방부에 저응력, 내측에 고응력, 외측은 저응력을 나타내었으며, 수핵이 있는 경우 없는 경우보다 고응력을 나타냈다.

4. 기립 중립위와 최대 굴곡위의 비교에서는 기립 중립위보다 굴곡시 수핵의 유무에 관계없이 전반적으로 후방부 응력이 2차 정도 현저히 감소하는 양상을 보이면서 비교적 균등한 응력 분포를 나타냈다.

5. 최대 신전위와 최대 굴곡위의 비교에서는 수핵 존재시 최대 신전위보다 최대 굴곡위에서 응력 분포가 전후방 모두 2차 정도 감소되고 수핵이 없는 경우는 최대 신전위가 굴곡위보다 응력이 전후방 0.5차 정도 감소되었다.

참 고 문 헌

1. Carl, Hirsh. : Studies on the mechanism of the low back pain, Acta Orthop. Scand. 20 : 261, 1951.
2. Coventry, M., Hansen, R. and Kernoham, J. : The intervertebral disc. Part I. Its microscopic anatomy & pathology, anatomy, development and physiology. J. Bone Joint Surg., 59A : 1135, 1957.
3. Keyes, D., Compere, E. : The normal and pathological physiology of the nucleus pulposus of the intervertebral disc. An anatomical, clinical and experimental study. J. Bone & Joint Surg., 14 : 897m 1932.
4. Schmorl, H. Tunghanns, H. : The human spine in health & disease. Grune & Stratton, New York, 1959.
5. Ghormey, R., Klrklin, B. : The oblique view for demonstration of the articular facets in lumbosacral backache and sciatic pain. Am.J.Roent., 31 : 173, 1934.
6. Mixter, W., Barr, J. : Rupture of the intervertebral disc with involvement of the spinal canal. New England J.Med., 211 : 210, 1934.
7. Naylor A., Smare, D. : Fluid content of the nucleus pulposus as a factor in the disc syndrome. Preliminary report. Brit. M.J., 2 : 975, 1951.
8. Nachemson, Alf. : Lumbar intradiscal pressure. Acta. Ortho. Scand.Ejnar.Munk-

- sgaard.Copenhagen. 1960.
9. Milch, H. : Photoelasticitic studies of bone forms. *J.Bone & Joint Surg.*, 22 : 621, 1940.
 10. Hidezo, Yoshizawa. : Photoelastic study on the relation between the lumbar lordosis and the load. 43, 645-652. 1969.
 11. Brown, T., Hansen, R., and Yorra, A. : Some mechanical tests on the lumbosacral spine with particular reference to the intervertebral disc. *J.Bone Joint Surg.*, 59A : 1135, 1957.
 12. Augustus.A.White III, and Manohar M. Panjabi. : *Clinical Biomechanics of the Spine.*
 13. Sylven, B. : On the biology of nucleus pulposis . *Acta Orthop. Scand.* 20 : 275, 1950.
 14. Kazarian, L.E. : Creep characteristics of the human spinal coloumn. *Orthop.Clic. North Am.*, 6 : 3, 1975.
 15. Virgin. W. : Experimental investigations in to physical properties of inervertebral disc. *J.Bone & Joint Surg.*, 33B : 607, 1951.
 16. Armstrong. K.R. : *Lumbar disc lesion.* E.& S.Livingstone. 1952.
 17. Cyriax. J. : *Textbook of orthopaedic medicine.* Seventh ed. London : Bailliere Tindall. 1978 : 473-482.
 18. Freiberg, S. and Hirsch, C. : *Anatomical and clinical studies on lumbar disc degeneration.* *Acta Orthop.Scand.*, 19 : 222, 1949.
 19. Sikorski, J.M. : A rationalized approach to physiotherapy for low back pain.*Spine*, 10-6 : 571-579, 1985.
 20. Lindblom, K. : Intervertebral disc degeneration considered as a pressure atrophy. *J.Bone & Joint Surg.*, 39-A : 933, 1957.
 21. Adams, P.M.A., Dolan and Hutton, W.C. : The lumbar spine in backward bending.*Spine*, 13 : 1019-1026, 1988.
 22. Roaf,R. : A study of the mechanics of spinal injuries. *J. Bone & Joint Surg.*, 42B : 810, 1960.
 23. Shigerw, Tadano. : Stress disribution of lumbar spine under compression.

-Abstract-

Photoelastic analysis of the Stress distribution on an intervertebral disc

Hyun-Kug Shin, Jae-Chang Lee, Myun-Whan Ahn,
Jong-Chul Ahn, Joo-Chul Ihn

*Department of Orthopaedic Surgery
College of Medicine, Yeungnam University
Taegu, Korea*

To observe the change in the status of stresses according to three different postural angulation of an intervertebral disc with or without nucleus pulposus, 6 specimens of a 3-dimensional photoelastic model of the spine were made of epoxy.

The nucleus pulposus portion was replaced with silicon in three models, and the three were made without silicon.

Through axial application of a vertical compressive load of 8kg, the peculiar patterns of the isochromatic fringes were observed. Stresses on the intervertebral disc were analyzed according to three different postural angulations of the intervertebral disc with the nucleus pulposus and without the nucleus pulposus.

The results of these study are as follow :

1. In an erect neutral posture with the nucleus pulposus, the stress concentration was much increased at the posterior portion rather than at the anterior portion.

Also, the high stress was concentrated at the medial and central portion. In an erect neutral posture without the nucleus pulposus, the stress concentration was much increased at the anterior portion rather than at the posterior portion and the stress distribution seemed to be locally concentrated.

2. In a maximal flexed posture, the stress concentration was much increased at the posterior portion rather than at the anterior portion.

Comparing the presence of the nucleus pulposus with the absence of the nucleus pulposus, the stress concentration was lower at the anterior portion in the presence of the nucleus pulposus than in the absence of the nucleus pulposus. However, the stress distribution at the posterior portion was nearly same in the two groups.

According to the analysis of the stress distribution diagram, as a whole, the stress pattern around the disc was evenly distributed.

3. In a maximal extended posture, the higher concentration of the stress distribution at the anterior and medial portion rather than in the posterior and lateral portion was observed.

The stress concentration was higher in the presence of the nucleus pulposus than in the absence of the nucleus pulposus.

4. Comparing the maximal flexed posture with the erect neutral posture, the stress concentration in the flexed posture was much decreased in the posterior portion rather than in the erect neutral posture, and an even distribution of the stress pattern in the flexed posture was observed.
5. In the presence of the nucleus pulposus, at the anterior and posterior portion, the stress concentration in the flexed posture was much decreased compared with the extended posture.

In the absence of the nucleus pulposus, at the anterior and posterior portion, the stress concentration in the extended posture was much decreased compared with the flexed posture.