

## 흉요추부 골절 치료에 있어 다양한 전방 고정술식의 생역학적 유용성

박예수·김형진·최충혁\*·박원만<sup>†</sup>·김윤혁<sup>†</sup>

한양대학교 의과대학 구리병원 정형외과, 한양대학교 의과대학 정형외과학교실\*,  
경희대학교 테크노공학대학<sup>†</sup>

**목 적:** 흉요추 골절의 치료에 있어 다양한 전방고정술식에 따른 생역학적 결과를 비교 분석하였다.

**대상 및 방법:** 고정 술식의 비교 분석은 1 mm CT 절단면 영상을 기반으로 개발된 3차원 유한 요소 모델을 이용하였으며, 임상에서 흔히 볼 수 있는 압박 골절과 방출성 골절을 대상으로 12가지 고정술식을 조합하여 굴곡, 신전, 측방 굴곡, 비틀림 응력을 분석하였다.

**결 과:** 생역학적 해석에서는 척추체-고정기구의 강성도는 압박 골절의 경우 기존의 두 개의 금속봉을 사용한 경우에 정상에 비해 안정적이었으며, 방출성 골절의 경우에는 금속봉의 수에 상관없이 모두 정상에 비해 안정적이었지만 두 개의 금속봉을 사용한 경우에는 과도한 강성도의 증가를 보여주었다.

**결 론:** 저자들은 전방 고정술만을 시행하는 경우에는 두 개의 금속봉 사용을, 전후방 고정술의 경우에는 전방에 단일 금속봉 사용을 제안하는 바이다.

**색인 단어:** 흉요추 골절, 전방 고정술식, 단일 금속봉

## Biomechanical Efficacy of Various Anterior Spinal Fixation in Treatment of Thoraco-lumbar Spine Fracture

Ye-Soo Park, M.D., Hyoung-Jin Kim, M.D., Choong-Hyeok Choi, M.D.\*,  
Won-Man Park<sup>†</sup>, Yoon-Hyuk Kim, Ph.D.<sup>†</sup>

Department of Orthopaedic Surgery, Guri Hospital, Hanyang University College of Medicine, Department of Orthopaedic Surgery, Hanyang University College of Medicine\*, School of Advanced Technology, Kyung Hee University<sup>†</sup>, Seoul, Korea

**Purpose:** To evaluate the biomechanical results according to various anterior spinal fixation methodology in the treatment of thoracolumbar spine fracture.

**Materials and Methods:** The comparative analysis of fixation method was evaluated by three dimensional finite element model using the 1 mm reconstruction image of CT. Authors evaluated the flexion, extension, lateral bending, torsional stresses with 12 fixation methods for the compression and burst fracture.

**Results:** In biomechanical analysis, stiffness of body-fixation device was more stable in two-rod system in compression fracture and was stable in one-rod, two-rod system in burst fracture, but two-rod system was showed over-increase of stiffness.

**Conclusion:** Authors recommend the usage of two-rod system in anterior fixation only and anterior one-rod system in anterior-posterior fixation.

**Key Words:** Thoracolumbar spine fracture, Anterior fixation, One-rod system

통신저자 : 김 윤 혁

경기도 용인시 기흥구 서촌동 1번지  
경희대학교 테크노공학대학  
Tel : 031-201-2028 · Fax : 031-202-8106  
E-mail : yoonhkim@khu.ac.kr

Address reprint requests to : Yoon-Hyuk Kim, Ph.D.

School of Advanced Technology, Kyung Hee University, 1, Seochon-dong, Giheung-gu, Yongin 449-701, Korea  
Tel : 82-31-201-2028 · Fax : 82-31-202-8106  
E-mail : yoonhkim@khu.ac.kr

## 서 론

일반적으로 흉요추부 골절에서 전방 고정술을 시행하는 경우에는 전방 감압으로 추체 제거 후 자가 장골을 이용한 골이식을 시행하고 Kaneda 내고정 기기 등과 같은 2개의 금속봉을 이용한 고정술을 시행하였다<sup>3)</sup>. 그러나 저자들은 압박 골절에서 전방 지주만을 감압하는 경우나 혹은 후방 고정술을 먼저 시행한 불안정성 방출성 골절에서 2단계 술식으로 전방 고정술을 병행하는 경우에는 1개의 금속봉만을 이용하여 고정술을 시행하였다. 이러한 1개의 금속봉을 이용한 술식은 흉요추 이행 부위의 전방 고정술 시 횡경막의 완전 절개를 시행치 않고도 수술을 시행할 수 있어 횡경막의 손상을 최소화할 수 있고 상하 추체의 골단판 부위에 나사 삽입을 시도함으로써 해서 인접 추체의 분절 혈관 결찰을 시행하지 않아도 되는 장점이 있을 것으로 생각하였다. 이에 저자들은 압박 골절과 방출성 골절을 대상으로 유한 요소 모델을 이용하여 12가지의 다양한 고정술식을 시행하고, 그 결과를 생역학적으로 비교 분석하였다.

## 대상 및 방법

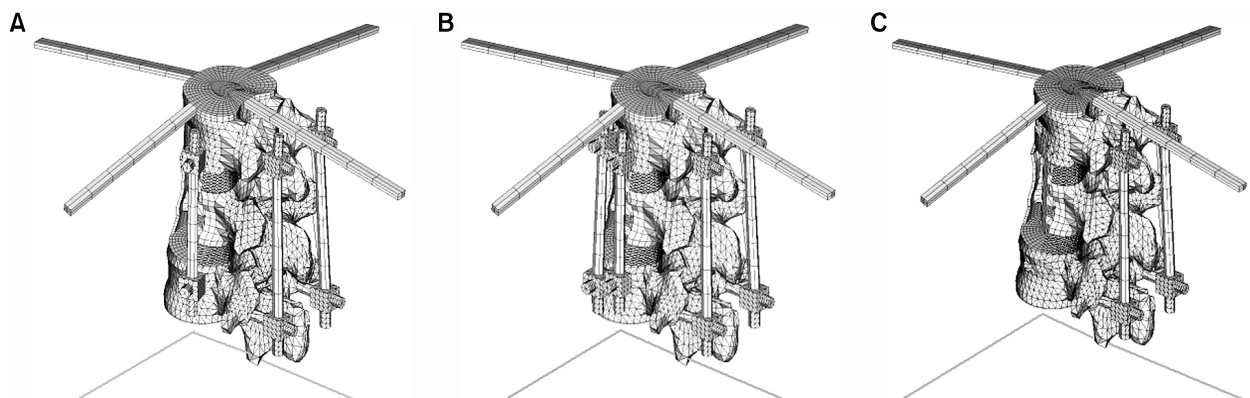
고정 술식의 비교 분석은 1 mm CT 절단면 영상을 기반으로 개발된 3차원 유한 요소 모델을 이용하였으며, 임상에서 흔히 볼 수 있는 압박 골절과 방출성 골절을 대상으로 12가지 고정술식을 조합하여 굴곡, 신전, 측방 굴곡, 비틀림 응력을 분석하였다.

유한 요소 모델을 위해 방사선 전문의와 정형외과 전문의에 의해 척추에 병변이 없는 것으로 확인된 신장 175 cm, 나

이 21세의 남성 사체를 1 mm 간격으로 컴퓨터 단층촬영(CT)하였으며, 상용 모델링 프로그램인 3D-doctor<sup>®</sup> (Able software Corp., USA)를 이용하여 3차원 그래픽 모델을 개발하였다. 이때, 흉요추 모델은 정중 시상면을 중심으로 대칭이 되도록 개발되었다. 개발된 그래픽 모델은 상용 유한 요소 해석용 모델링 프로그램인 FEMap<sup>®</sup> V8.2 (Electronic Data Systems Corp., USA)를 이용하여 유한 요소 모델로 변환되었다. 각각의 추체 요소의 개발에 사용된 물성치들은 과거 문헌들을 참조하였다<sup>10,20,24,28)</sup>.

개발된 추체와 추체 사이에는 추간판 모델을 개발하여 삽입하였으며, 추간판은 수핵을 중심으로 다섯 겹의 추간판 고리로 이루어져 있다고 가정하였다. 추간판 고리는 다섯 겹의 바탕질과 각각의 바탕질의 안쪽과 바깥쪽에 존재하는 여섯 겹의 트러스 구조를 가지는 섬유륜으로 구성되었다<sup>24)</sup>. 이때 추간판 단면적의 약 43%가 되도록 수핵의 단면적을 결정하였으며<sup>24)</sup>, 섬유륜의 체적이 추간판 고리체적의 19%가 되도록 섬유륜의 단면적을 결정하였다<sup>20)</sup>. 또한 트러스 구조의 섬유륜은 수평면에 대하여 평균 30°의 각도를 이루도록 개발되었다<sup>20)</sup>. 각각의 추간판 섬유륜은 오직 인장하중에만 반응을 하는 케이블 요소로 개발되었으며, 수핵은 비압축성 재료 거동을 가지는 물질로 가정하였다.

일곱 개의 주요 인대 (전방 종인대, 후방 종인대, 횡돌기간인대, 황인대, 척추 후관절낭, 극상건 인대, 극간인대)를 추체 운동분절에 고려하였고, 각 인대의 부착위치는 문서 및 선행연구 논문에 의거한 해부학 정보에 의해 결정되었다<sup>17)</sup>. 척추고정술식은 금속봉의 사용 수에 따라 0R, 1R, 2R로 분류하였고, 중간주 골편의 감압 여부에 따른 분류로 NM (no midcolumn decompression), M (midcolumn decompression)



**Fig. 1.** The finite element models of thoracolumbar spine segments with different anteroposterior fixation techniques were developed.

- (A) One-rod anterior fixation with posterior fixation (1R-M-P).
- (B) Two-rod anterior fixation with posterior fixation (2R-M-P).
- (C) Posterior fixation (0R-M-P).

을, 후방 척추경 나사못의 사용 여부에 따라 NP (no pedicle screw), P (pedicle screw)로 분류하여 조합하였다. 이때, 척추고정술이 시행된 모든 모델에는 전방 지주부 감압과 금속 망 삽입이 시행되었다 (Fig. 1).

모든 모델에서 제2요추의 바닥면을 완전히 고정시켰으며, 제12흉추의 상단에 길이 100 mm의 “+” 형태의 강체판을 달고 5 Nm의 굴곡, 신전, 측방 굴곡, 그리고 비틀림 응력을 가하였다. 본 연구에서는 각각의 하중에 대하여 상용 유한요소 해석 소프트웨어인 ABAQUS® (ABAQUS Inc., USA)를 이용하여 해석을 수행하였다.

일반적인 생체역학적 정의에 따라 추체의 강성도를 주어진 하중을 회전 각도로 나눈 값으로 정의하고, 이를 이용하여 정상 모델과 전방 및 후방고정술이 적용된 모델의 안정성을 평가하였다.

## 결 과

### 1. 압박 골절의 강성도 변화 (Table 1)

압박 골절의 경우 전방 지주와 중간 지주의 일부만을 감압하고 고정술을 시행하였으므로 2분절 정상 모델 (Intact-2L), 전방 고정 시 하나의 금속봉만을 사용한 경우 (1R-M-NP), 2개의 금속봉을 사용한 경우 (2R-M-NP)로 나누어 굴곡, 신전, 좌, 우 측방굴곡, 좌, 우 회전력을 가하여 강성도 (Nm/o)에 있어 금속봉의 숫자가 미치는 영향을 분석하였다. 각각을 비교해 보면 굴곡 1.87, 4.57, 11.96, 신전 1.6, 2.2, 9.99, 좌측방 굴곡 1.09, 6.08, 6.74, 우측방 굴곡 1.09, 12.71, 21.24, 좌회전 3.85, 3.11, 4.21, 우회전 3.85, 3.02, 4.14의 강성도를 보여 주었으며 이를 분석해 보면 굴곡, 신전, 좌우 측방 굴곡 운동에 있어서는 정상에 비해 금속봉 수에 관계없이 높은 강성도를 보여 주었으나, 회전 운동에 있어서는 하나의 금속봉을 사용한 경우에는 정상에 비해 약한 강성도를 보여 주었다.

### 2. 방출성 골절의 강성도 변화 (Table 1)

방출성 골절의 경우에는 중간 지주의 완전 감압 여부에 따른 결과, 척추경 나사못을 이용한 후방 고정의 유무, 금속봉의 수에 따른 결과를 비교 분석하였다.

#### 1) 중간주 감압 여부에 따른 강성도의 변화

먼저 중간 지주의 감압 여부에 따른 결과는 정상, 하나의 금속봉만을 사용하고 척추경 나사못을 사용하지 않은 경우 (Intact, 1R-NM-NP, 1R-M-NP)와 사용한 경우 (Intact, 1R-NM-P, 1R-M-P), 두 개의 금속봉을 사용하고 척추경 나사못

**Table 1.** All datas of stiffness in construct varieties (Nm/o)

Stiffness construct	Flexion	Extension	Left-lateral bending	Right-lateral bending	Left-torsion	Right-torsion
2 level intact	1.87	1.6	1.09	1.09	3.85	3.85
0R-NM-P	11.76	5.50	4.71	4.24	2.37	2.34
1R-NM-NP	3.52	2.19	5.08	12.46	2.88	2.80
1R-NM-P	28.18	16.54	15.49	26.55	5.76	5.80
2R-NM-NP	10.50	9.64	5.76	18.29	3.85	3.80
2R-NM-P	35.80	27.20	16.85	29.04	8.02	8.01
0R-M-P	34.00	9.56	10.12	9.63	3.78	3.67
1R-M-NP	4.57	2.2	6.08	12.71	3.11	3.02
1R-M-P	36.12	18.13	16.56	30.73	6.12	6.19
2R-M-NP	11.96	9.99	6.74	21.24	4.21	4.14
2R-M-P	42.7	27.16	17.39	34.49	7.4	7.32

0R-NM-P: 0 rod - no midcolumn decompression - pedicle screw instrumentation, 1R-NM-NP: 1 rod - no midcolumn decompression - no pedicle screw instrumentation, 1R-NM-P: 1 rod - no midcolumn decompression - pedicle screw instrumentation, 2R-NM-NP: 2 rod - no midcolumn decompression - no pedicle screw instrumentation, 2R-NM-P: 2 rod - no midcolumn decompression - pedicle screw instrumentation, 0R-M-P: 0 rod - midcolumn decompression - pedicle screw instrumentation, 1R-M-NP: 1 rod - midcolumn decompression - no pedicle screw instrumentation, 1R-M-P: 1 rod - midcolumn decompression - pedicle screw instrumentation, 2R-M-NP: 2 rod - midcolumn decompression - no pedicle screw instrumentation, 2R-M-P: 2 rod - midcolumn decompression - pedicle screw instrumentation.

을 사용하지 않은 경우 (Intact, 2R-NM-NP, 2R-M-NP)와 사용한 경우 (Intact, 2R-NM-P, 2R-M-P)를 비교한 결과 강성도는 중간주 감압 여부에 상관 없음을 알 수 있었다. 특히 척추경 나사못을 사용하지 않고 1개의 금속봉만을 사용한 경우에는 강성도가 중간부 제거 여부에 상관없이 정상에 비해 낮음을 알 수 있었다.

#### 2) 척추경 나사못 사용에 따른 강성도의 변화

정상, 한 개의 금속봉을 사용하고 중간주 완전 감압을 시행치 않은 경우 (Intact, 1R-NM-P, 1R-M-NP), 완전 감압을 시행한 경우 (Intact, 1R-M-P, 1R-M-NP), 두 개의 금속봉을 사용하고 중간주 완전 감압을 시행치 않은 경우와 (Intact, 2R-NM-P, 2R-NM-NP), 시행한 경우 (Intact, 2R-M-P, 2R-M-NP)를 비교해 보았다.

강성도는 척추경 나사못 고정을 병행하는 경우에는 모든 범위에서 강성도를 유지하는 것을 알 수 있었다.

#### 3) 금속봉의 수에 따른 강성도의 변화

정상, 중간주 완전 감압을 시행치 않고 척추경 나사못을

사용한 경우 (Intact, 0R-M-P, 1R-M-P, 2R-M-P), 사용치 않은 경우 (Intact, 1R-M-NP, 2R-M-NP), 중간주 완전 감압 후 척추경 나사못을 사용한 경우 (Intact, 0R-NM-P, 1R-NM-P, 2R-NM-P), 사용치 않은 경우 (Intact, 1R-NM-NP, 2R-NM-NP)를 비교하였다.

강성도는 금속봉의 수 증가에 따라 증가하는 것을 알 수 있었으며, 척추경 나사못을 사용함에도 불구하고 금속봉을 사용치 않을 경우에는 회전 강성도에 약함을 알 수 있었다.

## 고 찰

전방 및 후방 척추고정술에 대하여 임상적인 연구, 사체를 이용한 실험적 연구 등 많은 연구들이 수행되고 있지만, 각각의 수술적 방법들이 척추의 거동에 미치는 생체역학적 영향에 대해서는 아직까지 완전히 밝혀지지 않았다고 할 수 있으며, 각 수술 방법의 우열에 대하여 연구자들 사이에서 서로 엇갈린 주장을 보이고 있다<sup>4,18,22,23,25,27</sup>.

기존의 연구 결과들에 따르면, 전방 감압술과 함께 전방 고정술이 시행된 경우, 전방 지주부에 걸리는 체중 부하를 수술 즉시 회복시킬 뿐 아니라, 후방 고정술이 시행된 경우보다 후만각의 손실이 1~4° 정도 적게 나타난 것으로 알려져 있다<sup>4,18,22</sup>. 뿐만 아니라, Wood 등<sup>27</sup>은 후방 고정술에 비해 전방 고정술이 시행된 경우 수술 결과는 유사하지만 합병증의 발병률과 추가적인 수술을 요하는 경우가 적은 것으로 보고한 바 있다.

이에 반하여 Payer<sup>22</sup>는 후방 고정술을 척추의 정렬, 수술 직후의 안정성 및 신경계 결손 경우의 감압에 이르기까지, 흉요추부 골절에 대한 안전하고 신뢰할 수 있는 수술 방법으로 평하고 있다. 이러한 후방 고정술에는 과거에 Harrington 기기가 주로 사용되었으며<sup>17</sup>, 이러한 수술의 단점은 척추 변형의 교정을 위해 정상 척추가 상당 분절 포함되었던 것과 기기 자체의 안정성이 굴곡 및 회전력에 특히 낮았다는 점이 었다. 이후 척추경 나사못을 이용한 후방 고정술이 발전하였으나 술 후 척추 전방 지주의 붕괴로 인한 후만 변형이 후기에 발생하여<sup>8,19,21</sup>, 안정적이고 견고한 교정을 위해 두 분절 이상의 고정이 필요하였다.

특히 방출성 골절의 치료에 있어서 Whitesides<sup>26</sup>는 신경학적 손상 유무에 관계없이 수술적 치료 시 후만증, 동통, 사회활동의 복귀, 신경학적 안정에 있어 더 양호한 결과를 보여준다고 하였으며, Denis 등<sup>6</sup>은 수술적 치료가 예방적 의미에서도 더 가치가 있다고 하였고, 강 등<sup>15</sup>은 흉요추부 골절에서 수술적 치료 시 후만각 및 전방 추체 압박 정도가 변형의 진행 없이 치유되었다고 하였다. 척추 손상에 대한 생역학적인 많은 연구가 진행됨에 따라 방출성 골절의 조기 수술을 선호하는 경향을 보이고 있다<sup>12,13</sup>.

척추관 내로 후방 돌출된 골편이 있는 방출성 골절이나 손상 후 장시간 경과된 고도의 압박 골절에서는 후방 고정 기기만으로는 충분한 감압, 이탈된 골편의 정복, 후만 변형의 교정 및 유지가 힘들고 수상 후 2주 경과 시는 척추관 협착의 회복이 거의 없어 전방 감압 및 고정술이 필요하며<sup>9</sup>, 불안정성 척추 골절에 대해서 수술 실패를 피하기 위해 전후방 유합 및 고정술이 필요할 수도 있다<sup>21</sup>.

1980년 소개된 Kaneda 기기는 전방 도달에 의해 골절 추체의 효과적인 감압을 시행할 수 있고 전방 감압술 후의 척추 재건술에도 최소한의 분절을 효과적이고 견고하게 내고 정하여 충분한 안정성을 얻을 수 있었으며<sup>9</sup>, 생역학적 검사에서도 축성 압박력 및 염전 강성 (torsional stiffness)에 있어서 충분한 견고성이 확인되었고<sup>11</sup>, 이에 따라 척추골절의 치료에 있어 전후방 고정술의 필요성이 감소되었다고 하였다<sup>16,19</sup>.

저자들은 이환 추체가 흉요추부인 경우에는 Kaneda 기기 사용 시 주로 사용되어 온 횡경막의 광범위한 절제 없이 이환 추체에 부착된 횡경막 부위만을 상하로 부분 절제하고 이환 추체 부위를 제거한 후 상하 추체의 혈관 결찰을 피하기 위해 상부 추체의 하부 골단판 부위와 하부 추체의 상부 골단판 인접 부위에 각각 하나의 나사못을 이용하여 고정을 하고자 하였으며, 이를 생역학적으로 비교 분석하였다. 이처럼 횡경막의 부분 절제로 인해 골다공증성 압박 골절이 빈발하는 고령의 환자에서 호흡기 합병증<sup>14</sup>의 발생을 피할 수 있었으며, 상하 분절 혈관의 결찰을 피함으로 인해 출혈도 줄일 수 있었다. 그러나 이러한 하나의 금속봉을 이용하는 술식에 있어 회전 불안정을 문제로 들 수 있겠다<sup>2,3</sup>.

또한 저자들은 골다공증성 압박 골절의 경우에는 전방 지주와 중간지주 일부를 감압한 후 금속망과 하나의 금속봉을 이용하여 고정을 시행하고, 새로이 개발한 2분절 유한 요소 모델을 이용하여 생역학적 검사를 시행하였다. 그 결과 전방 고정술만 시행하는 경우에는 회전 불안전성으로 인해 두 개의 금속봉 고정을 시행하는 것이 안정적이라는 결과를 얻을 수 있었다. 불안정성 방출성 골절의 경우에는 중간주 완전 감압을 시행한 경우에는 기존의 두 개의 금속봉을 사용하는 것이 더 유리한 결과를 보여 주었으며, 완전 감압을 시행치 않아도 되는 경우에는 한 개의 금속봉을 사용하는 것이 정상에 비해 과도한 강성도의 증가를 방지할 수 있다고 보여진다. 특히 저자들은 고령의 골다공증성 압박 골절, 신경 증상이 동반된 불안정성 방출성 골절, 다발성 골절이 동반된 척추 골절의 경우에는 수술 후 환자의 재활을 권장하기 위해 기존의 삼면 자가 장골 대신, Mesh 금속망 고정을 시행하고자 실험 시 모든 경우에 금속망 고정을 사용하였다.

생역학적으로 최소한의 안정성 확보를 위해서는 고정술 후 정상의 척추보다 고정술이 시행된 부위에서 모든 하중조

건에 대하여 높은 안정성을 보여야 한다. 그러나 수술부위의 높은 안정성은 인접부위 정상 추간관 손상 원인이 될 수 있으므로, 최소한의 나사못을 삽입하는 것이 필요하다. 본 연구 결과를 활용한다면, 환자의 상태에 따라 최소한의 안정성 확보와 적절한 운동성 확보를 위한 고정술의 최적 수술 방법 및 기기의 선택을 위한 생체역학적 정보를 줄 수 있을 것이라 생각된다.

## 결 론

생역학적 분석 결과 전방 고정술만을 시행하는 경우에는 두 개의 금속봉을 사용하는 것이 더 안정적이었으며, 전후방 고정술의 경우에는 척추경 나사못 고정과 더불어 전방에는 1 개의 금속봉만을 사용하는 것이 과도한 강성도의 증가를 방지하는 데 효과적인 것을 확인하였다.

결론적으로 흉요추 이행부 골절에서 전방 고정술 시행 시 한 개의 금속봉과 나사못을 이용한 술식도 생역학적 검사상 큰 차이가 없음을 확인할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- 1) An HS, Vaccaro A, Cotler JM, Lin S: Low lumbar burst fractures. Comparison among body cast, Harrington rod, Luque rod, and Steffee plate. *Spine*, **16**(Suppl 8): S440-444, 1991.
- 2) Been HD: Anterior decompression and stabilization of thoracolumbar burst fractures by the use of the Slot-Zielke device. *Spine*, **16**: 70-77, 1991.
- 3) Been HD, Bouma GJ: Comparison of two types of surgery for thoraco-lumbar burst fractures: combined anterior and posterior stabilisation vs. posterior instrumentation only. *Acta Neurochir (Wien)*, **141**: 349-357, 1999.
- 4) Carl AL, Tranmer BI, Sachs BL: Anterolateral dynamized instrumentation and fusion for unstable thoracolumbar and lumbar burst fractures. *Spine*, **22**: 686-690, 1997.
- 5) Choi IS, Kim WI, Lim S, Lee SH: Treatment of unstable fracture of the thoracolumbar spine using Kaneda instrumentation. *J Korean Fracture Soc*, **7**: 192-200, 1994.
- 6) Denis F, Armstrong GW, Searls K, Matta L: Acute thoracolumbar burst fractures in the absence of neurological deficit. A comparison between operative and nonoperative treatment. *Clin Orthop Relat Res*, **189**: 142-149, 1984.
- 7) Dewald RL: Burst fractures of the thoracic and lumbar spine. *Clin Orthop Relat Res*, **189**: 150-161, 1984.
- 8) Ebelke DK, Asher MA, Neff JR, Kraker DP: Survivorship analysis of VSP spine instrumentation in the treatment of thoracolumbar and lumbar burst fractures. *Spine*, **16**(Suppl 8): S428-432, 1991.
- 9) Edwards CC, Levine AM: Early rod-sleeve stabilization of the injured thoracic and lumbar spine. *Orthop Clin North Am*, **17**: 121-145, 1986.
- 10) Goel VK, Ramirez SA, Kong W, Gilbertson LG: Cancellous bone Young's modulus variation within the vertebral body of a ligamentous lumbar spine - application of bone adaptive remodeling concepts. *J Biomech Eng*, **117**: 266-271, 1995.
- 11) Gurr KR, McAfee PC, Shih CM: Biomechanical analysis of anterior and posterior instrumentation systems after corpectomy. A calf-spine model. *J Bone Joint Surg Am*, **70**: 1182-1191, 1988.
- 12) Gurwitz GS, Dawson JM, McNamara MJ, Federspiel CF, Spengler DM: Biomechanical analysis of three surgical approaches for lumbar burst fractures using short-segment instrumentation. *Spine*, **18**: 977-982, 1993.
- 13) Kaneda K, Abumi K, Fujiya M: Burst fractures with neurologic deficits of the thoracolumbar-lumbar spine. Results of anterior decompression and stabilization with anterior instrumentation. *Spine*, **9**: 788-795, 1984.
- 14) Kaneda K, Taneichi H, Abumi K, Hashimoto T, Satoh S, Fujiya M: Anterior decompression and stabilization with the Kaneda device for thoracolumbar burst fractures associated with neurological deficits. *J Bone Joint Surg Am*, **79**: 69-83, 1997.
- 15) Kim JO, Kang OY, Kang CN, Ahn SY: The comparison of conservative treatment with operative treatment in bursting fracture. *J Korean Fracture Soc*, **8**: 807-814, 1995.
- 16) Kostuik JP: Anterior fixation for fractures of the thoracic and lumbar spine with or without neurologic involvement. *Clin Orthop Relat Res*, **189**: 103-115, 1984.
- 17) Lu YM, Hutton WC, Gharpuray VM: Do bending, twisting and diurnal fluid changes in the disc affect the propensity to prolapse? A viscoelastic finite element model. *Spine*, **21**: 2570-2579, 1996.
- 18) McDonough PW, Davis R, Tribus C, Zdeblick TA: The management of acute thoracolumbar burst fractures with anterior corpectomy and Z-plate fixation. *Spine*, **29**: 1901-1908, 2004.
- 19) McLain RF, Sparling E, Benson DR: Early failure of short-segment pedicle instrumentation for thoracolumbar fractures. A preliminary report. *J Bone Joint Surg Am*, **75**: 162-167, 1993.
- 20) Natarajan RN, Andersson GB: The influence of lumbar disc height and cross-sectional area on the mechanical response of

- the disc to physiologic loading. *Spine*, **24**: 1873-1881, 1999.
- 21) **Olerud S, Karlstrom G, Sjostrom L**: Transpedicular fixation of thoracolumbar vertebral fractures. *Clin Orthop Relat Res*, **227**: 44-51, 1988.
  - 22) **Payer M**: Unstable burst fractures of the thoraco-lumbar junction: treatment by posterior bisegmental correction/fixation and staged anterior corpectomy and titanium cage implantation. *Acta Neurochir (Wien)*, **148**: 299-306, 2006.
  - 23) **Pflugmacher R, Schleicher P, Schaefer J, et al**: Biomechanical comparison of expandable cages for vertebral body replacement in thoracolumbar spine. *Spine*, **29**: 1413-1419, 2004.
  - 24) **Polikeit A, Ferguson SJ, Nolte LP, Orr TE**: Factors influencing stresses in the lumbar spine after the insertion of intervertebral cages: finite element analysis. *Eur Spine J*, **12**: 413-420, 2003.
  - 25) **Schreiber U, Bence T, Grupp T, et al**: Is a single anterolateral screw-plate fixation sufficient for the treatment of spinal fractures in the thoracolumbar junction? A biomechanical in vitro investigation. *Eur Spine J*, **14**: 197-204, 2005.
  - 26) **Whitesides TE Jr**: Traumatic kyphosis of the thoracolumbar spine. *Clin Orthop Relat Res*, **128**: 78-92, 1977.
  - 27) **Wood KB, Bohn D, Mehbod A**: Anterior versus posterior treatment of stable thoracolumbar burst fractures without neurologic deficit: a prospective, randomized study. *J Spinal Disord Tech*, **18**: S15-23, 2005.
  - 28) **Zhong ZC, Wei SH, Wang JP, Feng CK, Chen CS, Yu CH**: Finite element analysis of the lumbar spine with a new cage using a topology optimization method. *Med Eng Phys*, **28**: 90-98, 2006.