

요추의 동역학 모델을 이용한 체간 굴곡·신전 운동 해석

Analysis of Torso Flexion and Extension Motions by Using a Dynamic Model of Lumbar Spine

*이병대¹, 전진홍², #김석일³

*H. D. Lee¹, J. J. Hong², #S. I. Kim(sikim@kau.ac.kr)³

¹한국항공대학교 항공우주및기계공학부 대학원, ²우리들병원 생체역학연구팀,

³한국항공대학교 항공우주및기계공학부

Key words : Lumbar spine, Dynamic model, Feedforward control, Feedback control, Extension, Flexion

1. 서론

과도한 상체의 거동과 하중은 요통을 유발하는 요추 추간판(lumbar disc) 질환의 원인이 되는 것으로 잘 알려져 있다.¹ 이러한 사실을 해석학적으로 검토하기 위해서는 상체의 거동과 하중이 요추 추간판의 변형과 응력에 미치는 영향을 분석하는 것이 필요하다. 이와 관련된 연구들은 요추의 유한 요소 모델을 이용한 구조 해석, 그리고 사체나 동물의 시편을 이용한 in vitro 실험이 그 대부분을 이룬다.

외부 하중에 대한 요추의 생체 역학적 변화를 직접 측정할 수 있는 in vitro 실험은 in vivo 실험을 대신할 수 있다는 장점이 있지만, 시편 확보의 어려움과 함께 하중 전달 기전(mechanism)에 대한 생체 반응 효과가 고려되지 않는다는 문제가 있다. 또한 유한 요소 모델을 이용한 구조 해석은 임상적 변수들을 조절하면서 요추의 정적 특성을 분석할 수 있지만, 상체의 동적 거동이 요추에 미치는 영향을 평가하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 상체의 동적 거동이 요추에 미치는 영향을 분석하기 위한 노력의 일환으로 요추의 동역학 모델을 구축하고, 피드포워드 제어(feedforward control)와 피드백 제어(feedback

control)를 병용한 하이브리드 제어(hybrid control)를 이용해서 체간 굴곡(flexion)·신전(extension) 운동이 요추 추간판의 변형과 하중 특성에 미치는 영향을 예측하는 방법을 제안하였다.

2. 요추의 동역학 모델

Fig. 1은 체간 굴곡·신전 운동을 표현하기 위한 요추의 좌표계를 보여주고 있다. 요추는 5개의 추골들로 이루어져 있으며, 추골 사이에는 추간판이 위치한다. 본 연구에서는 추골들을 강체로 가정하였고, 추간판들이 축 방향과 굽힘 방향으로 변형하는 것으로 상정하였다. 추골들의 등가 질량 중심의 좌표를 표현하기 위한 요추의 좌표계는 그 원점이 요추와 천추(sacrum) 사이의 추간판 중심에 위치한다.

j 번째 추골의 등가 질량 중심의 x 축 좌표와 z 축 좌표는 Fig. 1에 제시된 요추의 좌표계로부터 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$x_j = \sum_{i=1}^j l_i \cos \theta_i - a_j \cos \theta_j + b_j \sin \theta_j \quad (1)$$

$$z_j = \sum_{i=1}^j l_i \sin \theta_i - a_j \sin \theta_j - b_j \cos \theta_j \quad (2)$$

여기서 l_j 는 j 번째 추골의 상단과 하단에 위치한 두 추간판 사이의 거리, θ_j 는 l_j 가 x 축과 이루는 각도, 그리고 a_j 와 b_j 는 j 번째 추골의 등가 질량 중심에 대한 축방향 거리와 수선 거리를 의미한다.

식 (1)과 (2)로 주어지는 추골의 등가 질량 중심의 좌표, 추골의 등가 관성, 추간판의 강성 계수와 감쇠 계수 등을 토대로 Lagrange 운동 방정식을 구하면 요추의 동역학 모델은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f = M\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + K\theta \quad (3)$$

여기서 벡터 f 는 추간판에 작용하는 축 방향 하중과 굽힘 방향 모멘트, 벡터 θ 는 추간판의 축 방향과 굽힘

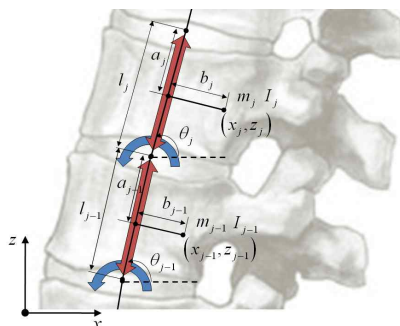


Fig. 1 Dynamic model of lumbar spine

방향 변형, 행렬 M 은 추골의 등가 질량과 관성적, 그리고 행렬 C 와 K 는 추간관의 축 방향과 굽힘 방향의 감쇠 계수와 강성 계수를 각각 나타낸다.

3. 체간 굴곡·신전 운동 해석

3.1 요추의 운동 제어 시스템

Fig.2는 체간 굴곡·신전 운동이 요추 추간관의 변형과 하중 특성에 미치는 영향을 분석하기 위해서 구성한 요추의 운동 제어 시스템을 보여주고 있다. 먼저 추골들의 등가 질량 중심의 위치, 속도 및 가속도는 요추부 피부 표면에 부착된 표식(marker)들의 위치, 속도 및 가속도로부터 산정한 후, 직교 좌표계($x-z$ 좌표계)의 운동 정보들을 극 좌표계($l-\theta$ 좌표계)의 운동 정보들로 변환하였다.

식 (4)는 피드포워드 제어 기법을 토대로 추간관들의 축 방향과 굽힘 방향 변형으로부터 추간관에 작용하는 축 방향 하중과 굽힘 방향 모멘트를 추정하는 개념을 보여주고 있다.

$$f_f(t) = K_f \delta(t) + K_v \dot{\delta}(t) + K_a \ddot{\delta}(t) \quad (4)$$

여기서 행렬 K_f , K_v 및 K_a 는 위치, 속도 및 가속도의 피드포워드 이득(gain)을 의미한다.

식 (5)는 피드백 제어(PD 제어) 기법을 토대로 추골들의 등가 질량 중심의 위치에 대한 입력과 응답 사이의 오차 e 로부터 추간관에 작용하는 축 방향 하

중과 굽힘 방향 모멘트를 추정하는 개념을 보여주고 있다.

$$f_b(t) = K_p e(t) + K_d \dot{e}(t) \quad (5)$$

여기서 행렬 K_p 와 K_d 는 피드백 제어에서의 비례 이득과 미분 이득을 의미한다.

그리고 식 (4)의 f_f 와 식 (5)의 f_b 의 합으로 주어지는 축 방향 하중과 굽힘 방향 모멘트를 식 (3)과 같이 표현되는 요추의 동역학 모델에 입력하면 요추의 동적 거동에 대한 응답을 얻을 수 있다.

3.2 체간 굴곡·신전 운동 해석

Fig. 3은 체간 굴곡·신전 운동 과정에서의 5번째 추골의 등가 질량 중심의 위치, 그리고 5번째 요추 추간관에 작용하는 굽힘 방향 모멘트, 축 방향 하중 및 전단 방향 하중을 보여주고 있다. 특히 추골의 등가 질량 중심의 위치에 대한 입력과 응답 사이의 오차가 매우 작다는 사실로부터 본 연구에서 제안한 체간 굴곡·신전 운동 해석 방법에 대한 신뢰성을 확인하였다.

요추 추간관에 작용하는 최대 축 방향 하중은 639.7N으로 가장 하단에 위치한 5번째 요추 추간관에서 나타났으며, 상단에 위치한 요추 추간관일수록 축 방향 하중이 작았다. 이 현상은 상체로부터 전달되는 추중 부하(follow load)가 하단으로 갈수록 커지는 것과 관련이 있다. 또한 요추 추간관에 작용하는 최대 전단 하중은 310.3N으로 5번째 요추 추간관에서 나타났으며, 최대 굽힘 방향 모멘트는 8.3 Nm으로 굽힘 방향 변형이 가장 큰 4번째 요추 추간관에서 발생하였다.

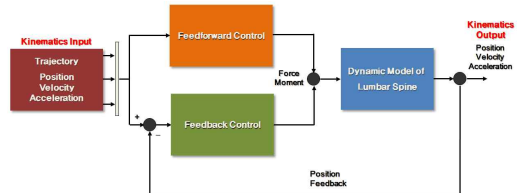


Fig. 2 Schematic diagram of a motion control system of lumbar spine

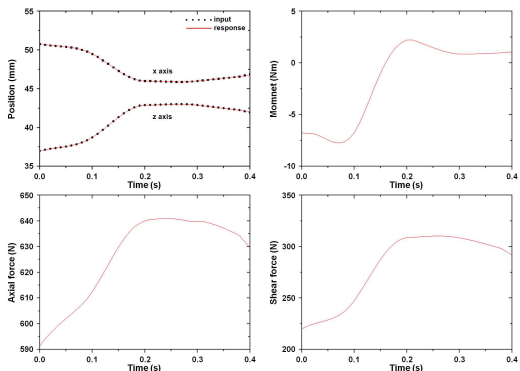


Fig. 3 Motion analysis results of 5th lumbar

4. 결론

본 연구에서는 상체의 동적 거동이 요추 추간관에 미치는 영향을 분석하기 위하여 요추의 동역학 모델을 구축하였고, 피드포워드 제어와 피드백 제어를 병용한 하이브리드 제어를 토대로 하는 요추의 운동 제어 시스템을 제시하였다. 특히 체간 굴곡·신전 운동이 요추 추간관의 변형과 하중 특성에 미치는 영향을 예측함으로써 본 연구에서 제안한 해석 방법의 유용성을 입증하였다.

참고문헌

1. Frymoyer J.W., Pope M.H., and Clements J.H., "Risk Factor in Low Back Pain," The Journal of Bone & Joint Surgery, 65, 213-218, 1983.