

# 경부 자세 변화에 따른 경추 척수의 변형에 관한 유한요소해석 A Finite Element Analysis of Deformations in a Cervical Spinal Cord Followed after Changes in Posture of the Cervical Spine

\*강영구<sup>1</sup>, 정태은<sup>2</sup>, #신효철<sup>3</sup>

\*Young-Ku Kang<sup>1</sup>, Tae-Eun Chung<sup>2</sup>, #Hyo-Chol Sin(sinhyo@snu.ac.kr)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 기계항공공학부, <sup>2</sup>인덕대학 정보메카트로닉스과, <sup>3</sup>서울대학교 기계항공공학부

Key words : Biomechanics, Finite Element Analysis, Cervical Region of Spinal Cord

## 1. 서론

인체의 척추는 그 위치와 형태에 따라 크게 경추, 흉추, 그리고 요추의 세 부위로 구별된다. 이들 가운데 경추는 목 부위에 위치한 7개의 경추골들로 이루어지며, 형태와 기능에 따라 다시 상부 경추 유닛(upper cervical unit)과 하부 경추 유닛(lower cervical unit)으로 나뉜다. 상부 경추 유닛은 제 1 경추골(C1)과 제 2 경추골(C2)의 조합으로, C1은 머리의 후두골을 지지하며, C2는 C1이 경추의 축 방향 회전운동을 할 수 있도록 안내 해주는 구조로 되어있다. 실제 경추의 축 방향 회전운동의 40%가량의 변위는 상부 경추에서 발생되며 나머지 변위들은 그 이하의 하부 경추골들 사이에 나뉘어 발생된다<sup>1</sup>. 하부 경추 유닛은 제 3 경추골(C3)으로부터 나머지 경추들로 이루어진다. 하부 경추를 이루고 있는 경추골들은 그 형태가 상당부분 서로 유사하며 머리를 앞으로 숙이는 굴곡(flexion)과 뒤로 젖히는 신전(extension) 자세에 크게 기여한다<sup>1</sup>.

척추의 내부에는 뇌에서부터 시작된 신경의 다발로 이루어진 척수(spinal cord)가 척추관(spinal canal)을 따라 요추까지 연결되어 있으며 각 척추골 단계마다 특정한 신경근(nerve root)이 척수로부터 분기되어 척추골을 통해 해당 부위로의 연결이 시작된다. 또한 척수 내부와 외부에 여러 종류의 혈관들이 있어, 이들 가운데 일부는 뇌에 혈액을 공급한다.

경추가 머리와 가슴과 같은 질량관성모멘트가 큰 신체 부위를 연결하고 있는 부위라는 점과 흉추와 요추에 비해 큰 운동 범위를 갖는 부위라는 점에 기인하여 경추는 다른 두 척추 부위에 비해 상대적으로 손상에 취약한 부위로 판단된다. 따라서 경부 척수에 가해질 손상의 위험도 클 것이라 판단 할 수 있어 큰 하중이 가해질 경우 우선적으로 중추 신경 계통의 손상이 생길 수 있는 부위로 생각 할 수 있다.

본 연구에서는 경부의 자세 변화가 척수의 변형에 미치는 영향에 대한 연구의 일환으로, 경추의 신전 자세가 척수에 미치는 영향을 유한요소 해석을 통해 살펴 보 고자 한다.

## 2. 척수의 구조와 신전

척수는 여러 층으로 보호 받고 있다. 우선 경추관 내벽으로부터 지방(fat)층이 자리잡고 있고 이 안쪽으로 두껍고 질긴 경막(dura mater)에 의해 척수액으로 채워진 공간을 사이에 두고 둘러싸여 있다. 경막 내부에는 영양분을 전달하는 지주막(arachnoid membrane), 그리고 척수의 가장 가까운 표면에 얇은 연막(pia mater)이 척수를 둘러싸고 있다. 그리고 척수는 경막과 연결된 치아인대(denticulate ligament)에 의해 척수액 속에 잠긴 채로 경막에 지지되어 있다. 한편 척수는 백질(white mater)와 회백질(gray mater)의 두 부분으로 구성되어 있다.

경부가 신전 자세를 취할 때, 각 경추골들은 경추 후방의 한 점을 중심으로 세로평면(sagittal plane)에서 회전한다. 따라서 전체 경부의 후반부는 압축 하중을 받게 되며 전반부는 인장을 받게 된다. 척수는 전체적으로 경부의 후반부에 위치하고 있어 압축 상태에 있게 된다<sup>2</sup>.

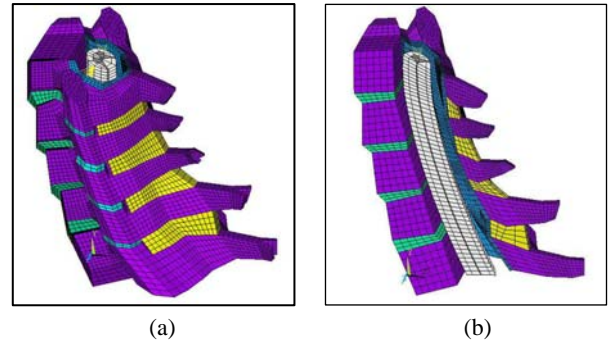


Fig. 1 Finite element modeling of the lower cervical part: (a) Full view and (b) Half sectional view.

한편 각 경추골의 척추뼈꼬리판(vertebra lamina)사이를 채우고 있는 후종격인대(Ligamentum Flavum, LF)는 경추가 신전 자세를 취할 때 이웃하는 경추골들 사이의 상대운동에 의해 압축, 변형되어 경추관 내부로 침투하게 된다. 이 과정에서 척수관 내부의 구성요소들에 압박을 주게 된다<sup>2</sup>.

## 3. 경추 유한요소모델링

방사선사진법(radiography)을 통해 얻어진 경추 이미지로부터 중요한 치수를 실측한 후, Forbin<sup>3</sup>의 경추골 치수의 표준화 연구 결과를 적용해 측정된 치수를 스케일링 하는 방법으로 경추골의 치수, 경추관의 직경 등의 중요한 치수들을 추출하였다. 신전 자세에 크게 기여하는 하부 경추 유닛에 대해서만 모델링 작업을 수행 하기로 하였다. 그 결과로 얻어진 하부 경추 유닛의 형태를 Fig. 1에 나타내었다. 이와 같이 얻어진 하부 경추 유닛의 각 경추골 사이의 공간에 추간판(intervertebral disc, IVD)과 후종격인대, 척추 관절(Facet Joint, FJ) 모델을 삽입하였으며, 경추관내의 지방과 척수의 백질과 회백질 요소를 모델링 한 후 치아인대로 척수 모델을 지방과 연결 하였다. 경추체의 전,후면에 위치한 전종인대(Anterior Longitudinal Ligament, ALL)와 후종인대(Posterior Longitudinal Ligament, PLL), 그리고 척추관절을 감싸고 있는 Capsular ligament를 각 경추골 마디 마디 삽입 하였다. 또한 이 유한요소 모델에 신전 운동을 일으킬 수 있도록 각 경추골의 척추 돌기(spinous process) 사이에 linear actuator 요소를 모델링 하였다. 척수액과 경막 그리고 spinous ligament는 모델링 에서 제외하였다.

이상 열거한 유한요소모델의 요약은 Table 1에 나타내었으며 이 연구에서 사용된 상용 유한요소 해석 소프트웨어인 Ansys<sup>4</sup>에서 제공하는 element type과 재료 특성, 그리고 component별 사용된 요소 개수를 나타내었다.

각 구성 요소들의 물성치는 Geaves<sup>5</sup>와 Ichihara<sup>6</sup>의 논문을 참조하였다.

## 4. 해석

### 4.1 경계조건

C7 하단 면에 몇 개의 노드들에 대해서 모든 자유도를 구속하였고, sagittal plane 상에 위치한 노드들에 sagittal

plane 내에서만 움직임이 일어나도록 자유도를 구속하였다.

신전 자세를 취하기 위해 각 linear actuator 요소마다 초기 길이의 50% 만큼의 stroke 를 주었다.

5. 결론

신전 자세 후 sagittal 평면상에 위치한 지방의 가장 상부에서 하부까지 순차적으로 Von-Mises 응력 분포를 추출한 결과를 Fig. 2(a)와 같이 나타냈다. 각 경추골 사이의 후중격인대가 신전 자세로 인해 압축, 변형되면서 경추관 내부를 향해 밀려들어오는 경향이 관찰 되었고 이에 상응하는 지방에 국부적인 응력이 발생된 결과를 볼 수 있다. 후중격인대의 압박에 의한 응력의 크기는 Fig. 2(a)에 나타난 바와 같이 C5-C6 > C6-C7 > C4-C5 > C3-C4 의 순임을 보아, 경추골의 운동성이 큰 부분에서 후중격인대의 압박이 더 크게 일어난 것이라 볼 수 있다.

이 해석에서는 100% 신전이 일어나지 않았으며 지방 내부에 있는 척수는 압박에 대해 큰 영향을 받지 않았다. 하지만 100% 신전이 일어난다 하더라도 지방과 척수액이 흐르는 공간이 후중격인대의 압박이 척수까지 전달되는 것을 충분히 차단해 줄 것이라 예상이 되며, 이 압박이 중추신경계에 직접적인 영향을 미치지 않을 것이라 판단할 수 있다.

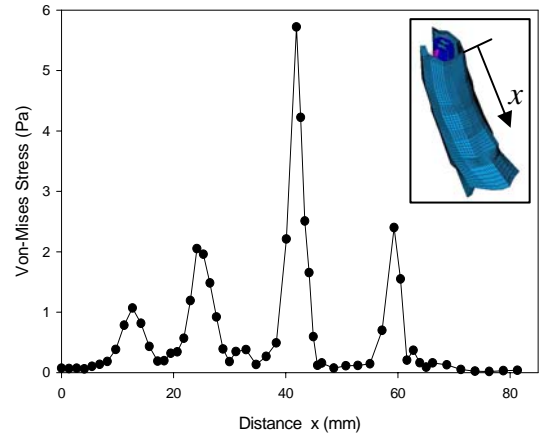
Fig. 2(b)는 지방과 척수의 응력 분포도를 나타낸 그림이다. 이 그림을 통해 알 수 있는 것은 척수는 신전 자세를 취해감에 따라 점차 경추골의 후면 벽에 점차 가까이 접근해가고 있다는 점이다. 100% 신전 자세를 취하게 되었을 경우 척수는 경막을 사이에 끼고 경추골 후면 벽과 접촉하여 압박을 받게 될 것이다.

한편, 이 연구에서는 척수가 신전 자세를 취함에 따라 길이방향으로 압축되는 경향을 찾아볼 수는 없었지만 이러한 현상은 상부 경추 유닛 및 머리부분의 두개골과 뇌를 포함한 유한요소 모델링이 완성되었을 때 확인 가능하리라 생각 된다.

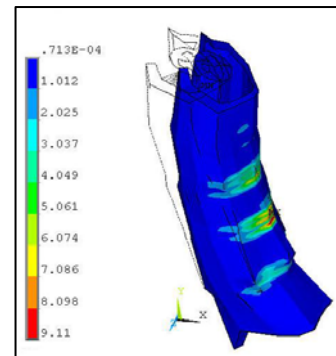
척수액의 역할은 척수에 가해지는 하중을 완충하여 보호하는 역할 외에도 경막과 연막 사이에서 척추의 움직임에 따라 pumping되어 끊임 없이 흐르면서 척추로부터 뇌에 이르기까지 산소와 영양분을 수송하는 역할을 한다. 그런데 만일 경추의 신전을 비롯한 다른 어떠한 자세에 의해 척추관 내부의 변형이 발생하여 유동 면적이 변화한다면, 그때의 척수액의 유동은 어떤 경향을 보이게 될런지에 대한 고려가 필요하다. 신전 자세를 취할 경우 경추 후반부의 압박에 의해 척수는 어느 정도 이완되어 척수를 따라 뇌를 향하는 혈관의 단면적은 넓어진다고 알려져 있다<sup>2</sup>. 하지만 반대로 척추관내의 척수액의 유동 면적은 줄어들 것으로 예상된다. 뇌로 전달될 혈액과 산소, 그리고 영양분들의 수송 관계가 경추의 자세에 영향을 받을 수 있다는 점을 고려해 볼 때 척수액의 유동과 척추관내부의 변형 사이의 상관관계를 고려해 볼 필요가 있을 것이라 판단 된다.

Table 1 Finite Element modeling Summary (Ansys)

Component	Element type	No. of Elements
Vertebrae(C3-C7)	45 (linear solid)	16744
ALL	10 (tension only)	16
PLL	10 (tension only)	16
IVD	185 (hyperelastic)	1224
FJ	185 (hyperelastic)	768
CL	10 (tension only)	64
FAT	185 (hyperelastic)	9720
LF	185 (hyperelastic)	2280
SW	185 (hyperelastic)	900
SG	185 (hyperelastic)	500
ACTUATOR	11 (linear actuator)	4



(a)



(b)

Fig. 2 Stress distribution on the cervical fat under the extension model: (a) on the sagittal plane nodes and (b) whole fat and spinal cord.

참고문헌

1. Nikolai Bogduk, and Susan Mercer, "Biomechanics of the cervical spine. I: Normal kinematics," *Clinical Biomechanics*, **15**, 633-648, 2000.
2. Deed E. Harrison, DC, Rene Cailliet, MD, Donald D. Harrison, PhD, DC, Stephan J. Troyanovich, DC, and Sanghak O. Harrison, DC "A Review of Biomechanics of the Central Nervous System - Part II: Spinal Cord Strains from Postural Loads," *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*, **22**, 322-332, 1999.
3. W. Frobin, G. Leivseth, M. Biggemann, and P. Brinckmann, "Vertebral height, disc height, posteroanterior displacement and dens-atlas gap in the cervical spine: precision measurement protocol and normal data," *Clinical Biomechanics*, **17**, 423-431, 2002.
4. Ansys User's Manual version 7.1 (2003). Pennsylvania, Swanson Analysis Inc.
5. Carolyn Yvonne Greaves, "Spinal Cord Injury Mechanisms : A Finite Element Study," The University of British Columbia, Thesis of B.A.Sc 2004.
6. Hideyuki Kimpara, Yuko Nakahira, Masami Iwamoto, Kazuo Miki, Kazuhiko Ichihar, Shun-ichi Kawano, and Toshihiko Taguchi, "Investigation of Anteriorposterior Head-Neck Respines during Severe Frontal Impacts Using a Brain-Spinal Cord Complex FE Model," *Stapp Car Crash Journal*, **50**, 2006.