



인체 디지털 정보를 이용한 사람 경추의 가상 생체역학 실험

글 _ 안 형 수 교수 · 경북대학교 의과대학 해부학교실 · hyungahn@mail.knu.ac.kr

1. 서론

지난 수세기 동안 의학은 과학 기술과 함께 변화하였다. 의사는 환자의 병증을 확인하기 위하여, 환자에게 질문을 하거나 신체를 만지며 병증을 확인하였다. 특히 신체의 내부 장기의 질병은 의사의 주관적인 감각에 의존하였으며, 수술 후 상태를 관찰할 때에도 다른 환자들의 통계 수치를 참고하기도 하였다. 그러나 물리학과 전자기학의 발달에 의해, 컴퓨터 단층 촬영(CT:Computer Tomography)이나 자기 공명 영상 장치(MRI:Magnetic Resonance Imaging)와 같은 영상 장비의 개발로 의사는 질병의 유무와 상태를 비침습적인 방법으로 진단하게 되었다. 최근에는 컴퓨터나 로봇을 이용한 수술(Computer Assisted Surgery and Robot Assisted Surgery)까지 연구되고 있으며, 일부는 실제 수술에 이용하고 있는 상황이다. 이런 발전 추세로 볼 때, 다양한 영상 자료와 프로세싱 기술 및 컴퓨터 기술을 인체에 적용한 디지털 휴먼을 의학에 적극적으로 이용하게 될 날이 멀지 않았다고 생각된다. 우리나라도 최근 디지털 코리아(Digital Korean) 사업을 시작하여 많은 성과를 거두고 있는데, 이러한 인체에 관한 양질의 디지털 데이터는 산업계에서 차량 안전 시뮬레이션이나

의지 및 보조기 개발 분야, 교육 분야(의학, 의공학 등), 생체역학 관련 기초 학문분야, 그리고 가상현실 분야 등에서 다양하게 사용되고 있다. 필자는 이러한 인체 디지털 정보를 이용한 기초학문 분야의 예로서 컴퓨터 상에서 경추(Cervical spine)를 가상실험(Virtual testing)하는 사례를 소개하고자 한다.

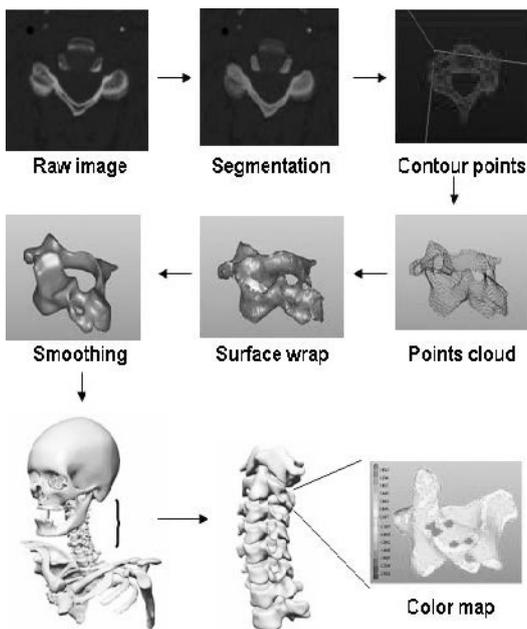
전통적으로 인체의 생체역학 실험은 사체에서 채취한 시편(specimens)을 이용하여 시행되어지고 있다. 그러나 사체시편(cadaver specimens)을 이용한 실험은 데이터 해석이 힘들고, 재연 가능한 실험을 하기가 힘들어 과학적으로 인정받기가 어려운 것이 사실이다. 더불어 사체시편 실험을 위한 기기의 제작은 많은 시간과 비용이 들어가며, 또 상당히 복잡하여 숙련을 요한다. 최근의 컴퓨터 테크놀로지와 Digital Korean 같은 인체 데이터를 활용한다면 이러한 실제 사체시편 실험을 보조할 수 있는 컴퓨터 가상 실험을 수행할 수 있으며, 더 나아가 미래에는 사체 시편 실험을 대체 할 수 있는 가상실험 시스템을 구축할 수 있다. 이를 위한 첫 번째 연구로 인체 내에서 가장 복잡한 운동(kinematics)을 가지고 있는 경추를 가상실험 하기위해 경추 컴퓨터 모델과 가상실험 시스템을 개발하게 되었다.

2. 가상경추 형성

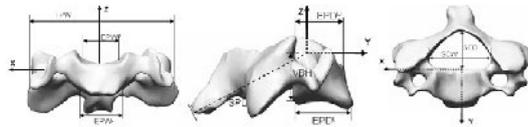
(Construction of the virtual cervical spine)

2-1. 컴퓨터 단층 촬영 영상(CT)으로부터 3차원 기하학적 모델 형성 과정

컴퓨터 단층 촬영 영상을 원하는 영역별로 구역화한 후, 이미지들을 겹쳐 쌓아 올려 개체를 만들게 된다. 여기서는 사람 경추 외에도 추가적으로 두개골, 상부 흉곽, 쇄골 및 견갑골을 모델 하였다. 이 모델은 공학적 이용이 가능하다(그림 1). 이렇게 3차원으로 재구성된 모델의 정확도를 측정하기 위해 polygonal surface deviation을 측정하여 color map을 구현하게 된다(그림 1). 3차원 기하학적 경추들은 여러 해부학적 파라미터들이 정확한지 다시 검증받는 과정을 거치게 된다(그림 2).



〈그림 1〉 컴퓨터 단층 촬영 영상(CT)으로부터 3차원 기하학적 모델 형성 과정

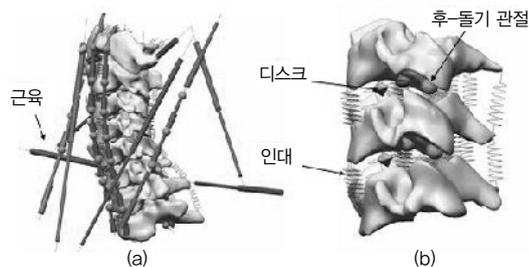


〈그림 2〉 경추의 여러 해부학적 파라미터 측정

2-2. 디스크, 인대, 근육 및 후-돌기 관절 (Disc, ligament, muscle, and facet joint)

단순히 3차원 구성된 가상 경추의 형태는 아직 인체와 같은 성상을 지닌 것이라 할 수 없으며, 경추사이에 존재하는 여러 구조물들 즉 디스크(Intervertebral discs), 인대(Ligaments), 근육(Muscles) 및 후-돌기 관절(Facet joints)이 구현되어야 한다.

경추 디스크는 사체실험을 통한 데이터를 이용하여 6-자유도 운동을 가지며 인체 디스크와 유사한 특성을 가지는 비선형 점탄성구조(Nonlinear viscoelastic structures)로 구현 하였으며, 인대는 각 경추 사이에 존재하는 종류별로 스프링과 댐퍼(Spring and damper)를 이용하여 역시 비선형 점탄성 구조로 하였다. 후-돌기 관절은 사람 경추가 가지는 특이한 운동을 잘 대변하도록 구성하였다. 근육은 아직 미완성의 단계인데 구동장치(actuator)를 이용하여 직선 및 곡선 개체로 하여 구성 하였다(그림 3).

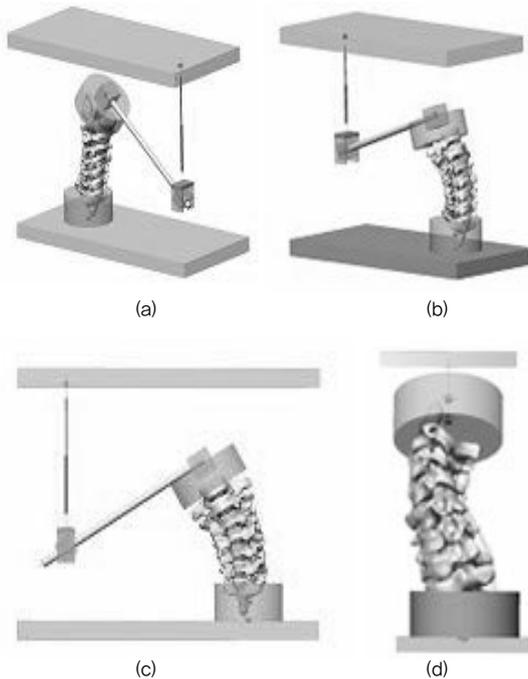


〈그림 3〉 (a) 경추 1번부터 흉추 1번까지 디스크, 인대, 근육 및 후-돌기 관절이 정의된 모델. (b) 경추 3번부터 경추 5번까지를 확대한 그림 (관절 사이 간격을 인위적으로 늘려서 표시하였음)



3. 경추 컴퓨터 모델을 이용한 가상실험 (Virtual experimentation)

컴퓨터 가상실험은 실제 사체 실험과 동일하게 구성하였고, 경추를 앞뒤 좌우로 구부리고 회전시켜서 운동학적(Kinematic) 및 동역학적(Kinetic)으로 실험하였다.

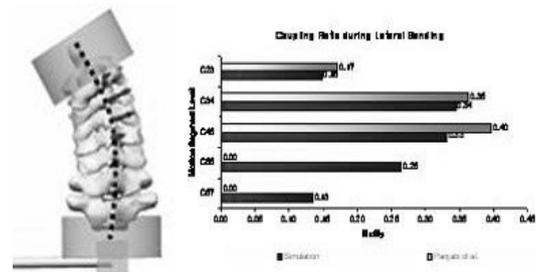


(a) 굴곡 운동 (b) 신전 운동 (c) 측면 굴곡 운동 (d) 축상 회전 운동
(그림 4) 경추 컴퓨터 모델을 이용한 가상 실험

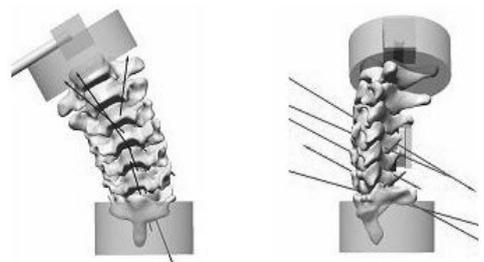
3-1. 운동학적 평가(Kinematic evaluation)

경추 컴퓨터 모델이 운동학적으로 얼마나 유효한가를 알아보기 위하여, 실제 살아있는 인체에서 측정된 수치와 사체 실험한 수치 그리고 컴퓨터로 가상 실험한 수치를 비교하였더니 상당히 일치 하는 결과를 얻었다.

그리고 사람 경추는 특수한 3차원적 운동을 하는데 이것을 측정하기위해 커플링 비율(Coupling ratio)과 3차원 나선축(Three dimensional helical axes of motion)을 측정하여 애니메이션 하였다. 이 검증에서 가상 경추 모델이 인체와 유사하게 행동함을 볼 수 있었다(그림 5).



(a) 옆으로 구부릴 때에 생기는 커플링



(b) 옆으로 구부릴 때의 3차원 나선축

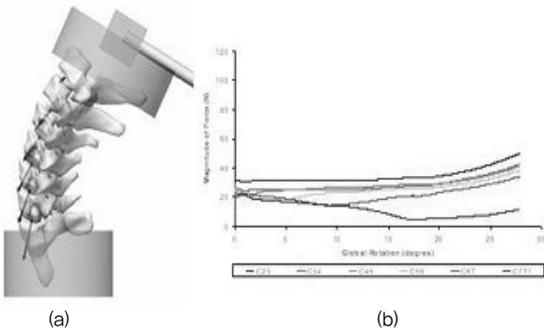
(그림 5) 운동학적 평가

3-2. 동역학적 평가(Kinetic evaluation)

경추 컴퓨터 모델이 가지는 물성(Material properties)이 얼마나 실제와 유사한지 검사하기 위해 경직도(Stiffness)와 디스크 및 후-돌기관절에 발생하는 힘 벡터(Force vector)를 분석 하였다. 전체적인 경직도 검사는 가상실험과 실제실험 결과 값을 비교 분석하여 통계적으로 어느 정도 오차 범위에서 일치 하는냐를

인체 내에서 가장 복잡한 운동(kinematics)을 가지고 있는 경추를 가상실험 하기위해
경추 컴퓨터 모델과 가상실험 시스템을 개발했다.

검증 하였으며, 그 결과 모든 실험모드에서 검사를 통과 하였다. 디스크에 발생하는 힘과 후-돌기 관절에 발생하는 힘은 실제로 측정하기 어려우므로 실제 실험 값과 비교 할 수는 없으며, 개략적으로 생리적 반응을 보이는 것으로 판정 되었다<그림 6>.

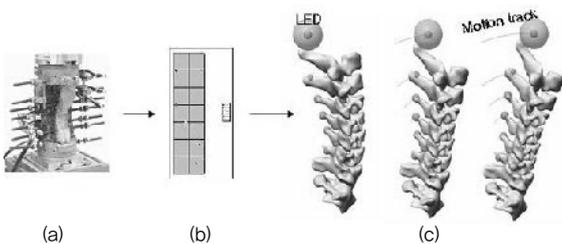


(a) 디스크 및 후-돌기 관절에 발생 하는 힘의 애니메이션. 푸른 화살표 = 디스크에 발생하는 힘, 연두색 화살표 = 후-돌기 관절에 발생하는 힘
(b) 각 분절 디스크에 발생하는 힘의 크기를 굴곡 각에 대하여 표시한 그래프

<그림 6> 경추가 뒤로 구부러질 때 각 분절에서 발생하는 힘

3-3. 실험 데이터 애니메이션

실제 실험에서 얻을 수 있는 운동 정보를 이용하여 가상 컴퓨터 모델을 직접 구동하는 것으로 사체시편에 장착한 LED 표지로부터 나온 데이터로 경추 컴퓨터 모델에 장착한 표지를 구동 하였다<그림 7>.



(a) 사체시편 실험 (b) 사체시편 실험 데이터
(c) 굴곡 모드에서 모션 트랙에 의해 컴퓨터 모델이 구동 되는 장면

4. 의학적 이용

4-1. 실험 프로토콜 개선

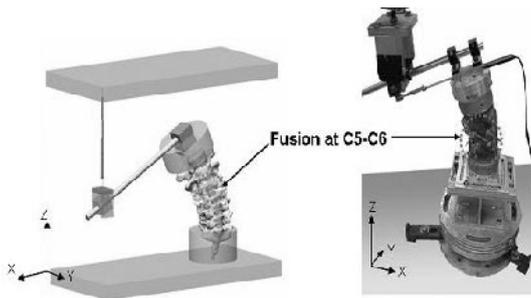
컴퓨터상에서 가상실험으로 여러 실험 프로토콜을 실제 제작하기 전에 검사 할 수 있으며 이로 인해 실험 기기 제작에 드는 시간과 비용을 절감 할 수 있었다. 경추의 회전 실험을 위한 프로토콜을 가상 실험하여 개선한 예이다<그림 8>.



<그림 8> (a) 종래의 실험 프로토콜의 가상실험, 운동 커플링과 나사축이 비-생리적이다.
(b) 가상실험상에서 개선한 실험 프로토콜, 운동 커플링과 나사축이 생리적이다
(c) 가상실험결과를 토대로 개선된 생체역학 실험기기

4-2. 척추 관절고정술 연구(Spine fusion study)

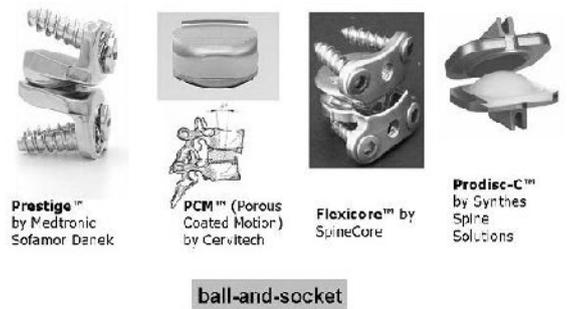
척추 손상이나 질환의 치료로서 척추체(Vertebral body) 사이를 유합하는 수술을 많이 시행하고 있는데 그 결과 통증을 감소시킴에도 불구하고 장기적으로 보면 유합된 분절 주변 척추 분절에 또다시 문제가 발생 하는 사례가 많이 보고 되고 있다. 이러한 인접 분절 퇴행(Adjacent segment degeneration)의 원인이 무엇인지 알아보기 위해 경추 컴퓨터 모델의 일부를 유합한 후 가상 실험을 하였다. 그 결과 유합한 부위 아래위로 운동과 하중이 증가 하고 전체적인 경직도가 상당히 증가함을 관찰 할 수 있었다. 이러한 연구는 의학적으로 더 나은 치료법을 찾는 데 유용 하게 쓰일 수 있다.



〈그림 9〉 경추 5번과 6번 사이 관절 고정술의 가상실험 장면
가상실험을 위한 실험 프로토콜의 중요 파라미터는 실제 실험과 동일하게 구성 하였다

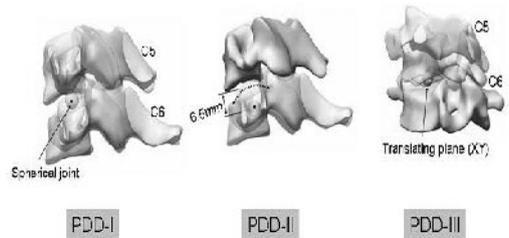
4-3. 척추 인공관절 연구

척추 관절고정술 후 발생하는 인접 분절의 문제를 해결하려는 노력의 일환으로 척추에도 고관절이나 무릎관절과 같이 인공관절을 사용해 보고자 하는 시도가 행해지고 있다〈그림 10〉.



〈그림 10〉 경추에 사용하는 인공 디스크 중 ball-and-socket 디자인의 대표적인 제품들

하지만 어떤 디자인이 적절한지, 각 디자인 파라미터가 척추 운동 및 하중 패턴에 어떤 영향을 미치는지에 대한 연구는 미흡 한 것이 사실이다. 이에 세 가지 경추 인공관절 모델을 설정 하여 가상 실험함으로써 각 모델 간 장점 및 단점을 분석하고 최적의 모델을 구하는 연구를 수행 하였다〈그림 11〉. PDD-III 모델이 가장 우수한 결과를 보였다.



PDD-I = 회전축이 디스크 중앙에 위치
PDD-II = 회전축이 디스크 중앙에서 6.5mm 하방에 위치
PDD-III = 회전축이 디스크 중앙에 있고 평면상의 전위가 허용됨

〈그림 11〉 Ball-and-socket 디자인의 경추 인공 디스크 형태

5. 맺음말

디지털화한 인체 정보의 활용은 인간의 상상력이 어느 정도까지 갈 수 있느냐에 달려 있다고 할 정도로 무한하다. 본고에서 보여준 바와 같이 기초 학문 분야에서도 디지털 인체 정보를 활용하여 연구 하고 있으며, 이러한 연구는 앞으로 더욱 활발히 이루어 질 것으로 예상된다. 본고에서 보여준 것은 한 실험실에서 행하고 있는 일례일 뿐으로, 가상 사체(The virtual cadaver), 가상 수술 시뮬레이션(Virtual surgery simulation), 증강 현실 (Augmented reality), 원격 진료(Telemedicine) 및 기타 여러 의학 및 공학 분야에서 활발히 사용되어지고 있다. 우리나라에서는 아직 디지털 인체정보의 활용이 일부 분야에 한정되어 있는 실정이고, 이에 대한 홍보도 미흡한 것이 현실이다. 하지만 컴퓨터 관련 인력이 우수하고 IT강국인 우리나라의 특성을 볼 때, 이 분야는 다시 한번 의생명 분야에서 과거 IT가 이루어낸 쾌거를 이룰 수 있는 유망한 분야라 생각 된다. 장래 디지털 코리아(Digital korean)들이 의료, 교육, 그리고 산업계에서 광범위하게 활용 될 날을 기대하며 본고를 마친다. 

[참고문헌]

1. Ahn, Hyung Soo, A virtual model of the human cervical spine for physics based simulation and applications, PhD Dissertation 2005, The University of Tennessee Health Science Center.
2. Ahn, Hyung Soo, Computer-Aided Geometric Modeling and Animation of the Cervical Spine, 대한해부학회지 2005, 38권 1호 1-9.