

# 공학해석을 위한 의료영상 정보 기반 생체역학 모델링 및 시뮬레이션

글 \_ 김 윤 혁 교수 · 경희대학교 테크노공학대학 · yoonhkim@khu.ac.kr

## 1. 서 론

가상 휴먼(virtual human)이란 개념은 해부학적으로 정확한 모델과 자료 그리고 실제와 비슷한 환경에 대한 시뮬레이션을 통하여 인체 생리학을 이해하는 것을 목표로 탄생하였다. 크게 보면 가상 휴먼은 대상이 되는 인간의 다양한 해부학적, 생리학적, 그리고 행동학적 증상과 활동을 설명할 수 있는 통합된 시스템이라고 말할 수 있다. 최근에 이르러 다양한 공학 분야에서 컴퓨터 그래픽 모델링 및 애니메이션 기술을 이용한 시스템 해석 및 시뮬레이션이 활발하게 수행되고 있다.

컴퓨터 그래픽 모델링 및 공학해석기법을 접목하여 생체역학 해석 및 시뮬레이션을 수행할 수 있는 상업적 그리고 연구용 툴의 개발은 전 세계에서 널리 이루어지고 있다. 상업적으로 완성도가 높은 소프트웨어들은 ADAMS<sup>®</sup>에 연결되는 Lifemod<sup>®</sup>(Biomech. Res. Group), 모션 캡처 시스템과 연계되고 그래픽 모델링 및 역동역학 해석 기능이 강력한 SIMM(Motion analysis Inc.), 자동차 충돌 해석용 가상 더미(dummy)로 유명한 Madymo<sup>®</sup>(TNO Automotive), 그리고 CT등의 영상자료로부터 그래픽 모델 및 유한요소 해석을 위한 모델을 개발할 수 있는 Bionics 시리즈(Cantibio 사) 등이 유명하다.

상업용 소프트웨어들에 비하여 비상업 목적의 인체 근골격 모델 개발은 유럽에서 이탈리아 주도의 Bio-mechanics European Lab. 프로젝트, VAKHUM 프로젝트 등의 다국적 대형 프로젝트에서 진행되고 있으며 미국에서는 국립보건원(NIH)에서 시작한 Visible Human 프로젝트를 바탕으로 대학 및 국립 연구소에서 개별적인 연구가 활발하게 수행되고 있다.

우리나라에서도 최근에 이르러 인체 표준화 및 디지털 휴먼, 인체 물리계 구축, 공학해석용 정밀 인체 모델의 물성 평가 시스템, 자동차 충돌용 인체 모델 개발 등의 과제들이 정부의 지원으로 수행되고 있지만 아직까지는 일반 연구자들의 다양한 연구 목적에 맞도록 열린 구조(open architecture)로 구성되고 사용하기 쉬우며 저렴한 가격 또는 무료로 접근할 수 있고 상용 소프트웨어와의 접합성이 우수한 근골격계의 그래픽 모델 및 시뮬레이션 도구는 제공되지 못하고 있다고 생각한다. 특히 공학적 응용을 위해서는 개발된 모델이 단순한 그래픽 형상 모델을 탈피하여 다양한 물리, 생물, 화학적 원리를 적용할 수 있는 공학해석용 정보를 지녀야만 한다.

본 기고에서는 저자의 연구실에서 수행하였던 연구결과를 중심으로 공학해석을 위한 의료영상정보 기반 가상 휴먼의 생체역학 모델링 및 그래픽 시뮬레이션 기술 적용 사례를 소개하고자 한다. CT, MRI,

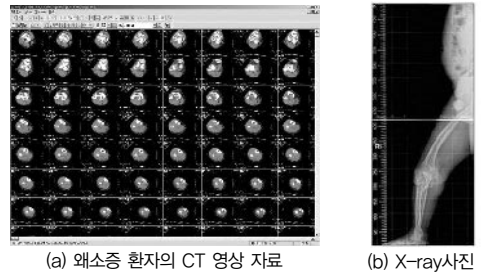


X-ray 등의 의료영상 자료로부터 가상 휴먼의 컴퓨터 그래픽 모델의 구축, 공학해석을 위한 유한 요소 모델링, 근육 모델의 개발, 운동 시뮬레이션, 수술 예비계획, 가상 재활 훈련 등의 예제를 통하여 그래픽 모델링 및 시뮬레이션 기술을 이용하여 가상 공간 상에서 생체공학 시험을 수행할 수 있는 가상 생체 역학 실험실을 제안하고자 한다.

## 2. 골격 모델 개발 및 물성정보

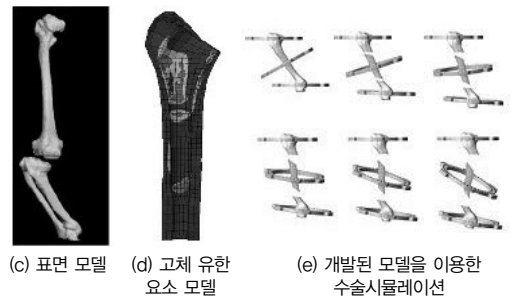
의미 있는 해석이나 그 결과의 가시화를 위하여 근골격계의 해부학적 정보가 모델에 내재되어 있어야 한다. 일반적으로 골격 모델의 개발을 위하여 해상도가 높은 CT를 주로 사용한다. 획득된 CT 영상 정보로부터 골격의 그래픽 모델을 개발하는 방법은 두 가지가 있다. 첫 번째 방법은 이미지 흑백 수준의 세팅 과정을 통하여 2차원 표면의 경계 곡선을 추출하고 이 경계 곡선의 적층과정을 수행하여 3차원 표면모델(surface model)을 구성하여 다시 내부를 채워 고체 모델을 생성하는 방법이고, 두 번째 방법은 2차원 표면에서 직접 Voxel모델을 적층하여 생성하는 방법이다. 두 번째 방법에서는 이미지 회색 수준 정보의 밀도-물성치 변환 과정을 통하여 탄성 계수를 각각의 요소에 직접 적용할 수 있다. 또한 Micro-CT를 사용하면 해면골의 미세구조까지 정밀하게 모델링 할 수 있다.

그래픽 모델이 개발되면 다양한 실험자료, CT의 이미지 회색수준 등을 이용하여 탄성계수, 질량, 질량모멘트 포아송 비 등의 모델에 적절한 물성 자료를 부여하여 유한요소해석 등의 목적으로 사용할 수 있다.



(a) 왜소증 환자의 CT 영상 자료

(b) X-ray사진

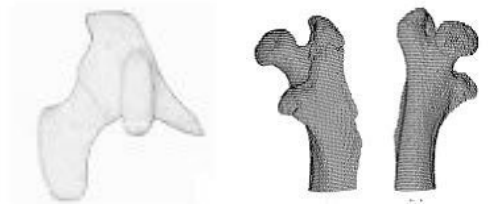


(c) 표면 모델

(d) 고체 유한 요소 모델

(e) 개발된 모델을 이용한 수술시뮬레이션

<그림 1> 인체 골격 시스템의 그래픽 모델링



(a) 표면 적층법에 의한 유한요소 모델

(b) Voxel형 유한요소 모델

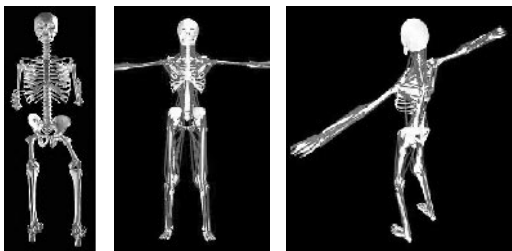
<그림 2> 인체 골격 시스템의 유한요소 모델링

## 3. 근육 모델의 개발

근육을 포함한 연조직(soft tissue)의 모델링은 주로 근육의 시작점과 끝점의 두 연결부위 간을 직선 또는 곡선으로 근사화하는 방법과 부피를 고려한 3차원 모델을 구성하는 방법이 있다. 현재의 대부분의 연구에서는 모델의 간략화를 위하여 근육 단면적의 면적 중심을 연결하여 선으로 표현하는 방법이 주로 사용되고

공학해석용 표준 생체역학 모델을 이용하여 가상 공간상에서 다양한 해석 및 시뮬레이션을 통한 가상시험을 수행할 수 있는 가상 실험실을 구축하면 관련 분야의 많은 연구 및 개발자들에게 큰 도움을 줄 수 있을 것이다.

있다. 단순화된 모델에 근육의 단면적, 밀도, 부피, 길이, 질량 모멘트 등의 정보가 모델에 포함된다. 따라서 향후에는 정확한 연부조직의 거동을 표현하기 위하여 MRI 정보를 기반으로 하는 3차원 고체 모델을 개발할 필요성이 있다. 그리고 연골, 인대 등의 다른 연부 조직들도 역시 MRI정보로부터 정밀한 3차원 모델을 재구성하거나 연결지점에 스프링과 같은 연결 모델로 표현하기도 한다.



(a) 골격 모델 (b) 전면 근골격 모델 (c) 후면 근골격 모델

〈그림 3〉 인체 전체 근골격 시스템의 모델링

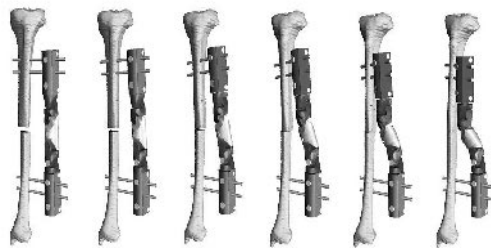
본 연구실에서는 인체의 목부위 13 종류, 팔부위 24 종류, 흉추 및 요추 부위 13 종류, 어깨 부위 14 종류, 고관절 부위 10 종류, 다리 부위 27종류로 총 96 종류의 근육을 각각 좌우에 배치한 근육 모델을 개발하여 골격 모델에 통합하였다. 이 중에서 광배근과 같이 넓은 면적의 근육은 3~5개의 세부 근육으로 분할하였고, 척추에 연결되는 근육군은 각 분절에 각각 연결되도록 하여 각각의 근육에 대하여 5~8 정도의 세부 근육을 생성하였다. 또한 근육의 해부학적 분류에 따라, 직선 근육, 여러 개의 직선들이 연결된 부분직선 (piecewise linear) 근육, 그리고 관절을 감싸는 경우의 원통형 근육들로 구분하여 생성하였다.

근골격 모델의 생성 및 그래픽 시뮬레이션을 위하여 본 연구에서는 상용 소프트웨어인 3D-Max<sup>®</sup>를 사용하였다.

## 4. 생체공학 해석 및 시뮬레이션

### 4.1. 골절치료 및 기형교정 수술 시뮬레이션

교통사고나 낙마 등의 상해로 인한 골절 치료나 왜소증, 소아마비 등으로 인한 하지 기형 등을 수술하기 위하여 외고정장치가 널리 사용되고 있다. 수술을 위해서는 보통 2차원 수술 예비계획을 수립하지만 3차원 복합 기형인 경우 기존의 X-ray를 이용한 방법으로는 주어진 골절 및 기형 교정을 위하여 외고정장치를 어떻게 고정시켜야 하는지 예측하기 어렵다. 본 연구에서는 링형, 모노형, 하이브리드형 등 다양한 외고정장치를 이용하여 골절수술 및 기형교정술 예비계획을 위한 수술 시뮬레이션을 수행하였다. 이 시뮬레이션 기술은 수술의가 원하는 타입의 수술법, 의료기구, 수술옵션 등을 지정하게 되면 컴퓨터 그래픽 시뮬레이션을 수행하고, 수술을 위해 필요한 기구의 조인트 값을 알려줄 수 있도록 구성되어 있다.



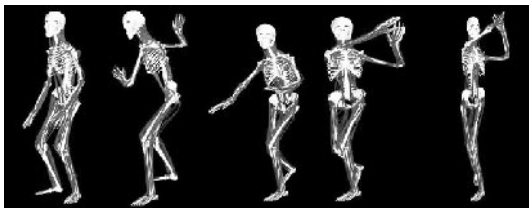
〈그림 4〉 순차적 조인트 교정을 통한 골절수술 시뮬레이션

### 4.2. 모션 가시화 및 시뮬레이션

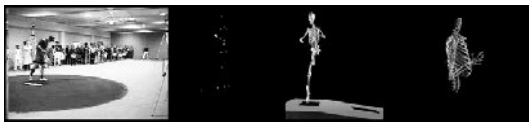
〈그림 5〉는 테니스 스트로크 모션과 야구 투수의 투구 모션에 대한 그래픽 가시화 및 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 먼저 테니스 스트로크 시뮬레이션은 먼저 구성된 근골격 모델을 한 명의 피시험자의 신체 사이즈로 scaling을 하였다. 그 후 Motion Analysis사의 모션 캡처 시스템을 이용하여 피시험자의 스트로크



운동 정보를 획득하였다. 그 다음, 운동 정보를 그래픽 모델의 동일한 위치 마커에 부여한 후 모션 가시화 과정을 시뮬레이션하였다. 그래픽 가시화를 위하여 본 연구에서는 3D-Max<sup>®</sup>를 사용하였다. 야구 피칭 모션 가시화를 위하여 대학 야구 투수의 피칭 모션을 Qualisys<sup>®</sup>사의 모션 캡처 장비를 이용하여 운동정보를 획득하고, 이를 그래픽 모델에 삽입하여 모션 시뮬레이션을 수행하였다.



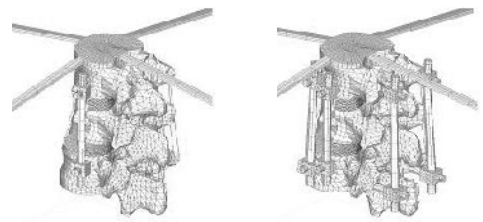
〈그림 5〉 테니스 스트로크 모션 시뮬레이션



〈그림 6〉 야구 피칭 모션 시뮬레이션 과정

### 4.3. 가상환경에서의 척추 고정술 평가 및 임플란트 설계를 위한 가상시험

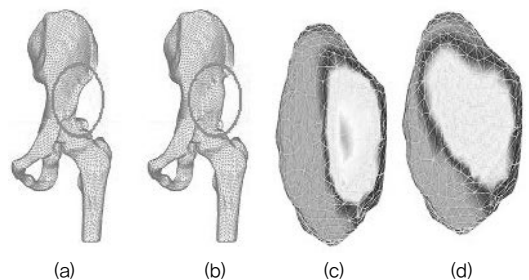
일상생활에서의 운동부족 및 올바르지 못한 자세, 근로자의 근골격 산업 재해, 고령화에 따른 노인들의 골절 상해, 교통사고 등의 다양한 원인에 따른 척추 질환이 증가하고 있다. 추간관 탈출증이나 골절과 같은 심한 척추 질환에 대하여 척추 고정술을 시행하게 된다. 이에 따라 다양한 척추 고정술 방법과 임플란트의 설계가 척추체의 생체역학적 안정성에 미치는 영향이 수술의들에게 주요한 관심 대상이다. 이러한 수술 후의 척추체의 생체역학적 안정성을 예측하기 위한 흉요추체와 척추고정기기의 유한요소해석용 모델을 개발하였다.



〈그림 7〉 전방 및 후방 척추 고정술의 생체역학적 안정성 시험을 위한 흉요추(T12-L2) 레벨 및 척추고정기기의 유한요소모델 개발

### 4.4. 발달성 고관절 이형성증 어린이의 선반형성술 예비계획

발달성 고관절 이형성증에 걸린 어린 환자는 대퇴골의 무혈성 괴사, 퇴행성 관절염, 탈구 및 골절 등의 치명적인 위험에 노출이 된다. 이러한 환자를 치료하기 위하여 고관절의 접촉 면적을 늘리고 골반 및 대퇴골의 정렬상태를 재확립하는 수술을 주로 하게 된다. 본 연구에서는 개발된 환자의 골반 및 대퇴골 모델을 이용하여 선반형성술의 수술 예비계획을 수립하고 컴퓨터 그래픽 시뮬레이션을 통하여 수술 전후에 고관절의 접촉 압력이 어느 정도 감소하게 되는 지를 확인하였다. 〈그림 8〉에서 보는 바와 같이, 수술 후 환자 고관절에 부과되는 접촉 압력이 감소하게 되는 것을 확인할 수 있다.




(a) 환자의 수술 전 유한요소 모델  
 (b) 환자의 수술 후 유한요소 모델  
 (c) 한 발로 선 자세에서 수술 전 고관절에 걸리는 접촉압력 분포  
 (d) 수술 후 고관절에 걸리는 접촉압력 분포

〈그림 8〉 발달성 고관절 이형성 환자의 선반형성술 예비계획



### 3. 근육 모델의 개발

본 기고에서는 생체공학적인 연구 및 개발을 위한 영상정보 기반 생체역학 모델링 및 시뮬레이션 기술 및 적용사례에 대하여 소개하였다. 다양한 의료, 스포츠, 공학 사례에서 볼 수 있듯이 가상 생체역학 모델을 이용한 생체역학 해석 및 그래픽 시뮬레이션은 조직, 기관, 시스템 레벨에서 생체역학 연구, 교육, 개발, 환자 치료 등의 다양한 분야에 많이 적용될 수 있다.

본 기고에서 사용한 인체 모델의 개발을 위하여 대부분 미국 국립보건원(NIH)에서 제공한 영상정보를 이용하거나 개별 환자의 영상정보를 이용하였다. 따라서 디지털 코리안 사업을 통하여 구축된 표준 인체 영상정보를 이용한다면, 다양한 공학적인 연구 및 개발에의 적용을 위한 한국인 표준 생체역학 모델을 개발할 수 있다. 또한 현재 개발된 모델의 수준보다 정확하고 미세한 인체 구조까지를 고려함과 동시에 다양한 응용 기술을 적용한다면 디지털 코리안 사업내의 공학 해석용 표준 생체역학 모델의 공학적 중요성은 매우 높을 것이다. 마지막으로, 이렇게 개발된 공학해석용 표준 생체역학 모델을 이용하여 가상 공간상에서 다양한 해석 및 시뮬레이션을 통한 가상시험을 수행할 수 있는 가상 실험실을 구축하여 관련 분야의 많은 연구 및 개발자들에게 큰 도움을 줄 수 있을 것이다. 

#### [참고문헌]

1. Yoon Hyuk Kim, N. Inoue, E. Chao, "Kinematic simulation of fracture and bone deformity correction under external fixation", J. Biomech. Vol.25, pp.1047-1058, 2002
2. 김윤혁, "생체역학 연구 및 개발을 위한 근육격계의 모델링 및 시뮬레이션" 의공학회 추계학술회의, 연세대, 11월, 2004년
3. Yoon Hyuk Kim and Won Man Park, "Finite Element Contact Analysis of Dysplastic Hip Based on CT and MR Images" 2nd Asia-Pacific Biomechanics Conference, Taipei, Taiwan, Nov.22-25, 2005.
4. 김윤혁, 박원만, 박예수, 조재림 "척추 고정술 생체역학적 평가를 위한 척추체의 유한요소 모델 개발" 추계 척추외과학회, 교육문화회관, 서울, 12월, 2005년