

디지털 인체와 그 공학적 응용

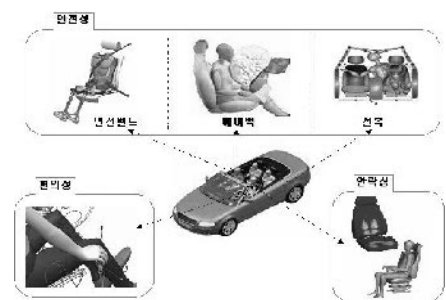
글 _ 채수원 교수 · 고려대학교 기계공학과 · FEM/CAE 전공 · swchae@korea.ac.kr

1. 디지털 인체의 공학적 활용

디지털 인체란 인체의 물리적 특성이 고려된 디지털 모델을 의미한다. 디지털 인체 모델은 인체에 대한 위험한 실험이나 경비가 많이 소요되는 실험을 컴퓨터 시뮬레이션으로 대체하기 위해 만들어졌다. 최근 들어 삶의 질과 건강에 대한 관심이 높아지면서 인간의 다양한 신체조건에 대한 맞춤형 설계의 필요성이 늘어나고 있으며, 이를 위해 디지털 인체를 이용한 제품의 개발이 크게 늘어날 전망이다.

디지털 인체를 이용한 설계기술이란 자동차, 가전제품, IT 기기, 무기체계, 실버의료기기, 스포츠기구 등과 같이 인체와 직접 접촉하여 사용되는 제품 개발 시에, 사용자를 디지털 인체로 모델링하여 인간과 제품의 상호작용을 고려하는 설계기술을 의미한다. 특히 사용자와 제품 간의 상호작용이 단순 오퍼레이션이 아니고 인체 여러 부위와의 물리적인 상호작용을 수반하는 자동차, 가전제품, IT 기기, 실버의료기기, 스포츠제품 등의 경우에는 고객의 제품 적응성이 제품의 성공에 매우 큰 영향을 미친다. 예를 들어 자동차의 경우 시장에서의 경쟁력을 확보하기 위해서는 안전성과 더불어 조작 편의성, 승차감, 안락성 등이 점차 중요해지고 있다. 또한 미래 고령화 사회에 대비하여 고령운전자를 위한 자동차설계 및 레이아웃 배치 등 다변화된 고객 지향 설계기술이 더욱 요구되는 시점에 있다. 현재는 이러한

설계 요구조건을 만족시키기 위해서 시승자 및 더미를 이용하여 각종 실험을 실시하고 실험결과를 설계에 반영하고 있다. 그러나 앞으로는 물리적인 실험을 최소화하면서 운전자-자동차 간 상호작용에 대한 설계 요구조건 만족 여부에 대한 정량적인 계산을 수행하고 설계에 피드백하는 시뮬레이션 기술이 보편화될 전망이다. 아래의 <그림 1>은 자동차의 설계 및 해석분야에서 디지털 인체모델과 시뮬레이션 기술이 사용되는 예를 보여준다.



<그림 1> 디지털 인체와 자동차 산업

한편 우리나라에서 산업재해로 인한 손실은 7조 3천억 원에 이르고 있다. 건설, 중공업, 일반 제조업 등의 분야에서 산업재해로 인한 막대한 경제적, 사회적 비용을 절감하기 위하여 많은 노력이 경주되고 있다. 특히, 최근 작업자의 근골격계 질환을 줄이기 위한 작업환경 설계가 산업계 전체적으로 중요한 사회적 문제로 대두되고 있는데, 실험에 의한 설계 및 검증에는

많은 비용과 시간이 소요된다. 최근 들어 디지털 인체-작업장 간의 물리적인 상호작용을 통합적으로 시뮬레이션하고 작업 부하를 예측하여 근골격계 질환을 예방하기 위한 다양한 작업 환경을 설계하기 위하여 <그림 2>와 같이 디지털 인체 모델이 이용되고 있다.



<그림 2> 디지털 인체와 작업환경 설계

사용시 인체와 직접 접촉하는 제품의 예로 그림 3과 같은 운동기구를 들 수 있다. 이 운동기구는 조작판, 저항조절기구, 의자조절기구, 자전거 바퀴의 플라이휠, 플라이휠에 저항을 전달하는 마찰 벨트 등으로 구성되어 있다. 이 운동기구 개발 시에 인간의 운동과 관련된 설계 파라미터 선정이 매우 중요하다. 페달의 사이즈, 토크, 의자의 위치, 형상, 쿠션, 각도, 핸들의 크기와 각도 등은 제품 사용자의 인체에 직접적인 영향을 미치므로 이와 같은 설계 파라미터들이 제품의 품질과 경쟁력을 결정하는데 큰 비중을 차지한다. 기존의 설계 프로세스에서는 인체와의 상호작용을 고려하기 위해서, 시제품과 인체대미(dummy)를 이용하여 실험적 평가를 수행하고 그 결과를 설계에 반영한다. 이와 같은 기존의 실험적 또는 시행착오법에 의한 제품개발 방법은, 상당한 개발비용과 개발기간을 필요로 하고 제품의 인체 조화성을 정량적으로 평가하여 설계에 반영하기에

적합하지 않다. 사용자 친화적인 맞춤형 제품개발을 위해서는 인체모델을 기반으로 하는 제품개발 패러다임으로의 변환이 필요하다 할 수 있으며, 이는 인체와 제품이 서로 상호작용을 하는 상태에서의 복합모델을 구성하고, 해석 및 시뮬레이션을 통해서 최적의 성능을 제공하는 제품을 개발할 수 있다. <그림 3>의 경우 인체-제품 복합모델을 통하여 핸들과 손/팔, 힙과 안장, 페달과 발/다리 간의 상호접촉 및 기구학적, 동역학적 메커니즘을 총체적으로 모델링하고, 동시에 시뮬레이션 함으로써 설계사양의 만족 및 설계 최적화를 기할 수 있다. 이 경우 각기 다른 인체 조건에 따르는 디지털 시뮬레이션을 통해서 대량맞춤 설계 및 제작도 가능하게 된다. 이와 같은 제품개발 패러다임의 경우에는 성능성의 정량적인 평가를 설계 과정에 피드백 함으로써 시작품 제작의 횟수를 획기적으로 줄일 수 있다. 결과적으로 제품개발 기간 및 비용을 절약하며 소비자의 욕구에 부응하는 고품질의 제품을 제공할 수 있다.



<그림 3> 인체모델 기반 제품개발 프로세스

이와 같은 효율적인 인간공학적 설계를 위해서는 기존의 제품 설계를 위한 CAD/CAE 시스템과 인체 모델 시뮬레이션 도구 간의 효과적인 연계가 필수적이지만, 현재 대부분의 CAD/CAE 시스템은 인체 모델 생성 및 동적 시뮬레이션을 지원하지 않으며, 생체 동역학



(dynamics)을 기반으로 한 기존의 인체모델 시뮬레이션 도구들도 제품 설계 관점에서 기구 또는 기계와의 상호작용을 동시에 시뮬레이션 할 수 있는 기능이 아직까지는 크게 미비한 실정이다.

2. 디지털 인체의 기술동향

인체 모델은 골격, 인대, 근육, 장기 등의 특성을 수치적으로 정확히 표현하여야 하나, 이들의 형상이나 물성 및 기능이 대단히 복잡하므로 이를 완벽하게 표현하기는 거의 불가능하다. 따라서 사용하고자 하는 공학적 또는 의공학적 용도에 따라 적절히 단순화시켜야 하며, 어느 한두 가지 모델로 모든 공학적 필요사항을 다 만족시킬 수는 없다. 인간공학적 해석을 위한 인체 모델은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 기구학적(kinematic) 모델로서 정적인 자세(static posture)에 초점을 맞춘 것으로 힘(force)에 대한 고려가 없는 모델이다. 다른 하나는 동역학적(dynamic) 모델로 모델에 작용하는 내력(internal forces)과 외력(external forces)을 고려한 모델이다. 동역학적 인체 모델은 다시 다물체(multi-body) 모델 및 유한요소(finite element) 모델 등으로 구분할 수 있다. 다물체 모델은 주로 변형이 없는 강체(rigid body)를 사용하며 변형이 고려된 유연체(flexible body)도 포함된다. 유한요소 모델은 주로 변형을 정확히 고려할 수 있는 가장 복잡한 모델이다. 다물체 모델이나 유한요소모델은 각각 장단점을 가지고 있다. 일반적으로 다물체 모델은 인체의 전체적인(overall) 거동을 예측하는 데 주로 사용되고 계산이 매우 빠르고 간편한 장점이 있으나, 정확한 변형을 예측하기 어려운 문제가 있다. 한편 유한요소 모델은 인체의 변형을 정확히 예측할 수 있는 반면에 계산에 많은 시간과 노력이 소요되는 문제가 있다.

2.1 기구학적 인체모델

RAMSIS, BHMS(Boeing Human Modelling System), Safework, Jack 및 ERL 등은 상용화된 인간공학적 해석 소프트웨어이다. RAMSIS, BHMS 및 Safework 은 H-점과 자세(posture)의 조건을 정의함에 따라 인체의 실제 자세를 예측할 수 있도록 되어 있다. RAMSIS의 자세예측 기능은 mock-up 실험을 통한 통계학적 분석에 기초를 두고 있으며, Jack 과 ERL은 최적화 기법을 이용하여 자세예측을 하고 있다. RAMSIS, Safework, Jack 및 ERL은 조인트 회전에 기초한 안락함 해석이 가능하나 BHMS에서는 가능하지 않다.

2.2 동역학적 인체모델

동역학적 인체 모델은 집중질량(lumped mass) 모델, 다물체(multi-body) 모델 및 유한요소(finite element) 모델 등으로 구분할 수 있다. 일부 상용 소프트웨어 시스템은 다물체 모델과 유한요소 모델이 조합된 모델을 제공하고 있으나, 대부분의 시스템은 그렇지 않다. 집중질량 모델은 보통 1차원이나 2차원 모델로 되어 있으나, 다물체 모델이나 유한요소 모델은 2차원이나 3차원 모델로 구성되어 있다. 집중질량 모델은 주로 수직 진동에 대한 인체 거동(human behaviour)의 해석에 사용되고 있다.

(1) 다물체 모델

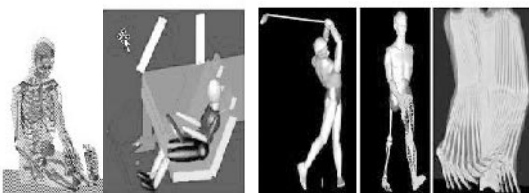
다물체 모델은 각 요소들이 여러 자유도를 갖는 다양한 조인트 종류(joint type)로 연결되어 있는 것으로서 조인트로 연결된 요소들에 힘, 스프링-댐퍼요소, 접촉요소, 구속요소 등과 같은 외력이 가해짐으로써 운동을 하게 된다. 다물체 모델의 경우 보통 강체(rigid bodies)를 사용하나 유연한 물체(flexible bodies)도 사용할 수 있다. ALASKA, ADAMS 및

디지털 인체를 이용한 설계기술이란 자동차, 가전제품, IT 기기, 무기체계, 실버의료기기, 스포츠기구 등과 같이 인체와 직접 접촉하여 사용되는 제품 개발 시에, 사용자를 디지털 인체로 모델링하여 인간과 제품의 상호작용을 고려하는 설계기술을 의미한다.

MADYMO는 다물체 모델 전용패키지 이며, 각각 여러 가지의 인체모델을 개발하여 사용하고 있다.

ALASKA에서는 RAMSIS에서 모델링 된 크기와 자세를 갖는 인체모델에 대한 동역학적 거동을 해석할 수 있는 생체역학적 인체모델인 DYNAMICUS를 제공하고 있다. 이 모델은 19개의 몸체가 62자유도를 갖는 것으로 되어 있다. 척추는 세 부분으로 나뉘어 있으며, 조인트는 타원형의 형태로 표현되어 있다. 근육도 포함되어 있고 인체와 의자와의 탄성접촉이 가능하도록 되어 있다. 그러나 아직 실험을 통한 검증은 되어 있지 않다.

ADAMS에서는 FIGURE를 제공하고 있다. 이 모델의 기본은 50th percentile 남성으로서 15개의 몸체와 16개의 조인트로 구성되어 있다. 이 인체 모델은 타원형 모델이나, 뼈대형 모델, 또는 피부와 의복이 입혀진 모델 등으로 나타낼 수 있다. 여기서 사용된 조인트는 3차원으로 해부학적으로 정확한 위치에 만들어 졌다. 또한 조인트에 작용하는 힘은 수동(passive) 이나 능동(active) 형이 모두 가능하게 되어 있다. 각 부분의 질량 성질, 크기, 조인트 강성, 마찰댐핑 성질 등은 Hybrid III 충돌 더미와 적합하도록 되어 있다. 아래 그림은 FIGURE를 사용하여 수동적(passive) 시뮬레이션 한 예와 능동적(active) 시뮬레이션 한 예를 각각 보여 주고 있다.

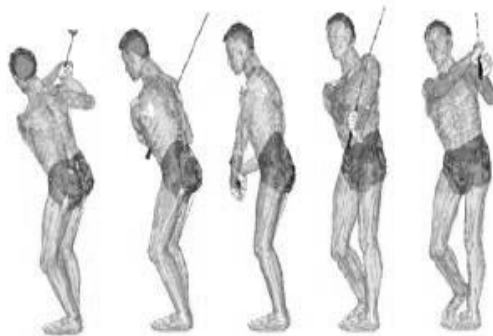


(a) passive simulation model (b) active simulation model

〈그림 4〉 FIGURE human model의 적용 예

MADYMO 에서는 여러 가지의 다물체 인체 모델이 개발되어 왔고, 그 중 하나가 50th percentile 인체 모델이다. 이 모델은 RAMSIS의 인체측정치를 기본으로 구성되어 있으며, 총 92개의 강체 몸체가 기구학적 조인트로 연결되어 있으며, 피부는 삼각형 쉘 요소로 구성되어 있다. 모든 척추와 목은 스프링-댐퍼로 연결된 강체들로 구성되어 있다. 이 모델의 표면은 의자와의 접촉현상을 해석할 수 있는 정도의 정확도를 유지하고 있다. 또한 이 모델은 필요에 따라 유한요소모델도 함께 나타낼 수 있도록 구성되어 있으며, 저속 및 중속 충돌 (1-37G)조건에 대해 검증이 되어 있다.

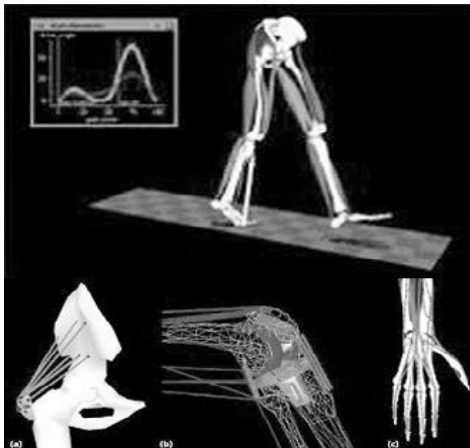
LifeMOD는 미국 Biomechanics Research Group에서 2002년 발표한 인체모델해석 프로그램으로 유수의 세계적 기업 및 미국 국가기관을 고객으로 두고 있다. 의료장비, 의학(정형외과), 스포츠, 재활, 작업 시뮬레이션 등 사람의 움직임과 관련된 다양한 분야에 걸쳐 연구가 이루어지고 있다. 단순한 타원형태의 인체모델에서부터 근골격 모델까지 시뮬레이션이 가능하다. 그러나 고가의 상용소프트웨어인 ADAMS의 플러그인 생체역학 모듈로 동역학 해석의 부분은 자체 개발이 아닌 ADAMS를 이용하고 있다.



〈그림 5〉 LifeMOD 의 적용 예



Musculographics 사에서는 근골격계 모델에 관한 연구를 활발히 진행하고 있으며 생체역학 시뮬레이터 SIMM과 Dynamics Pipeline을 개발하였다. 인간의 거동을 측정하기 위한 모션 캡처 하드웨어와의 연동, 근골격계 모델의 정밀함, 동역학적 데이터를 이용한 인간 이외의 다양한 생명체에의 적용에 있어서 뛰어난 기능을 제공하고 있어 스포츠, 의료 3D 애니메이션 등의 관련 분야에서 사용되고 있다. 그러나 제품과 인간의 상호 작용에 대한 고려가 부족하여 인간 거동에만 초점이 맞춰져 있어 뛰어난 인체 모델을 지원하고 있음에도 제품 개발 단계에서 인간 공학적 설계에 이용하기에는 어려운 상황이다. 동역학 해석 모듈로 별도의 SD/FAST라는 소프트웨어를 사용한다.



〈그림 6〉 SIMM의 적용 예

미국 아이오와 대학 CAD 센터의 VSR(Virtual Solider Research) 프로그램은 미 육군이 지원하여 디지털 인체모델 및 시뮬레이션과 관련된 여러 기초 연구 수행하고 있다. 휴먼 모델, 동역학 시뮬레이션, 가상환경, 생체역학 등의 연구를 진행하였고 Santos라 불리는 디지털 휴먼 모델을 생성하였다. Santos를 무기, 자동차등의 제품과 가상환경에서의 성능 테스트를

통해 제품 제작에 인간 공학적 요소를 적용하기 위한 연구를 수행하고 있다. 그러나 VSR의 인체모델은 인체 각 관절에 대한 역학적 시뮬레이션 보다는 가시화(visualization)나 UI(user interaction)에 치우쳐 있다.

(2) 유한요소 모델

ALASKA 와 PAM-CRASH는 대표적인 유한요소 모델을 사용하는 소프트웨어이며, MADYMO는 다물체 모델과 유한요소 모델을 동시에 사용하는 소프트웨어이다. Hubbard 등은 인체의 형상과 움직임을 나타낼 수 있는 3차원 생체역학모델을 개발하였는데, 평균 남성 모델을 JOHN 이라 하고, 평균 여성모델을 JANE이라 하였으며 큰 남성모델을 JERRY라 명명하였다. 이 모델 들은 두개골과 갈비뼈 및 골반을 가지고 있다. 이러한 모델들은 강체 구조와 이들을 서로 연결하는 유연한 경추 및 흉추로 표현되어 있다. 근육도 적절히 포함 되었고, 피부를 나타내는 얇은 층도 포함되어 있다.

ABAQUS에서는 앉은 상태의 동역학적 유한요소 모델인 CASIMIR를 개발하였고, 이 모델들은 특징인 이나 특정그룹(percentile)에 맞게 조정할 수 있게 되어 있으며, RAMSIS와의 연결을 통해 정해진 자세를 취할 수 있게 되어 있다. 이는 인체 해부학을 기초로 개발된 것으로 주요 성질들(관성, 강성, 댐핑 등)은 생체역학적 실험 자료를 사용하여 얻은 것이다.

PAM-CRASH에서는 여러 가지의 유한요소 인체 모델을 개발하였다. ROBBY 모델은 50th percentile 남성을 나타내는 HARB(Human Articulated Rigid Body) 모델이다. 이 모델은 강체 부분과 이들이 비선형 조인트로 연결된 것이다. 각 강체 부분은 골격과 이들을 둘러싼 피부로 구성되어 있으며, 피부는 쉘 요소들로 모델링 되어 있다. 이 모델은 15개의 부분으로 구성되어

있고 각 부분의 질량, 무게중심, 관성과 관성모멘트의 주축, 조인트 위치 및 방향, 조인트의 동작범위, 운동저항들이 모두 고려되어 있다. 이 모델은 충돌에 적용하기 위한 검증이 완료된 것으로 최근에는 프랑스 군대에서 인간공학적인 연구를 위해 사용하고 있다.

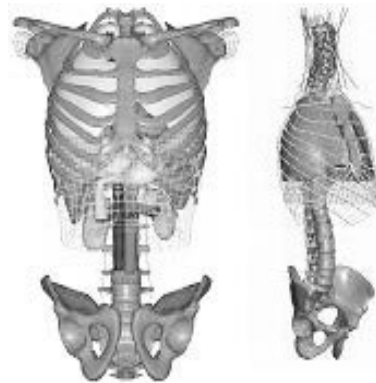
MADYMO에서는 인체측정학을 토대로 한 50th percentile 남성에 대한 모델을 주로 자동차에 적용하기 위해 개발하였다. 장기를 포함한 모든 인체 부분을 정확한 위치에 모델링하기 위하여 50th percentile 남성이 앉아 있는 상태를 디지털화하여 사용하였다. 이 모델에서는 주요 장기들이 다 포함되어 있으며 이들은 외부환경과의 접촉 반응이 가능하도록 되어 있다. 모델에서는 기구학적 조인트가 여러 골격 조직 사이의 관절을 나타내기 위해 사용되었고, 각 조인트들의 동작범위와 운동저항 등이 비선형 스프링과 댐핑으로 표현되어 있다.



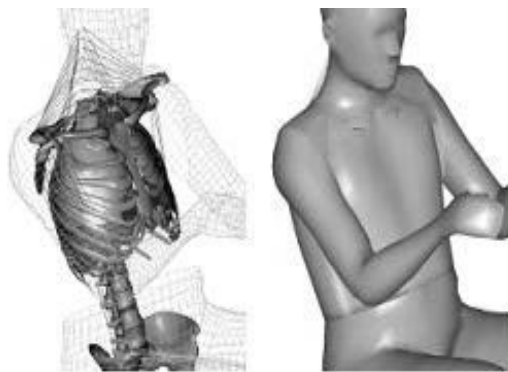
〈그림 7〉 MADYMO의 50th percentile male 유한요소모델

한국의 IPS International에서는 기존의 Hybrid-III 충돌해석 모델을 대체하기 위한 H-Model의 개발에 착수하여 1997년에 국내 최초로 상용화하였다. H-Model은 다국적 기업인 ESI의 PamCrash/Safe에 탑재되어 각국의 차량 충돌해석에 사용되고 있다.

이는 인체의 변형을 고려한 동역학적 유한요소 모델로서 자동차 안전도 분야, 방위산업분야 및 의용공학 분야 등에 광범위하게 사용되고 있다. 또한 일본(JARI, TOYOTA, HONDA) 및 북미(NHTSA, Virginia Tech), 그리고 국내(재활공학센터)에서 그 활용도와 실용화 가치가 인정되고 있다. H-model은 인체의 각 부분이 모듈화(H-Head, H-Thorax, H-Torse, H-Foot 등)되어 있어 필요에 따른 모듈만을 채택할 수 있다. 자동차 개발에서 에어백과 승객과의 out-of-position 문제, 정면충돌 및 후면 충돌시 승객의 목에 발생하는 상해의 상세연구 등 기존의 hybrid dummy 로는 예측이 어려운 인체상해의 해석이 가능하다.




(a) Torso model (Spine+Organs)



(b) Whole torso model

〈그림 8〉 IPS International의 H-model

3. 맺음말

- ▶ 디지털 인체모델링 분야에서는 강체모델로부터 시작하여 현재의 정교한 유한요소모델까지 개발되고 있으나, 향후에는 기하학적 형상, 물리적인 성질 및 생리학적 특성이 모두 고려된 상태의 개인화된 모델링이 가능할 전망이다. 체형 측정 기술 및 의료 이미지 기술과 데이터 변환 기술 등이 복합적으로 발전하여 이를 가능하게 할 것이다.
- ▶ 생체역학 분야에서는 현재 개별적인 장기 시스템의 모델링에 의한 해석이 일반적이나, 미래에는 장기 시스템의 복합적인 모델링 및 해석으로 발전하고, 장기적으로 전체 인체 시스템이 통합적으로 고려될 전망이다.
- ▶ 미래형 자동차, 가전제품, IT 기기, 무기체계, 실버 의료기기, 스포츠 기구 등의 제품설계에 있어서는 사용자의 인체역학적 특성 및 인간과 기계의 상호작용이 제품설계에 고려되어야 하나, 지금까지의 인체공학적 설계는 대부분 실험적인 방법에 의한 시행착오를 거쳐서 검증되어 왔다. 효율적인 인간 공학적 설계를 위해서 CAD/CAE 시스템과 인체 모델 시뮬레이션 도구 간의 효과적인 연계가 필수적이나, 현재 대부분의 CAD/CAE 시스템은 인체 모델 생성 및 동적 시뮬레이션을 지원하지 않는다. 따라서 앞으로는 인체모델 시뮬레이션 도구들도 마찬가지로 인체-제품 간의 상호작용을 동시에 시뮬레이션 할 수 있는 기능이 포함된 통합 CAE 시스템이 개발되어야 하며 디지털 인체 모델도 이에 맞게 개발되어야 할 것이다. 

[참고문헌]

1. D. H. Robbin, Anthropometry of motor vehicle occupants, UMTRI Report, 1983
2. Oakley, C., Human injury modeling capabilities and limitations, 17th Internal technical conference on the enhanced safety of vehicles, Amsterdam, 2001
3. I. H. Lee, H. Y. Choi, H-Model reference manual, IPS International, 2003
4. 이인혁, 최형연, 한동철, "유한요소 인체모델의 개발: 한국전산구조공학회학회지, Vol. 17, No. 1, pp.50-64, 2004
5. S. McGuan, "Achieving Commercial Success with Biomechanics Simulation", 20TH Symposium of the International Society of Biomechanics in Sports, Caceres, Spain, July 2002.
6. C.S. Pan, et al., "Evaluation of a Computer-Simulation Model for Human Ambulation on Stilts", 2004: Journal of Mechanics in Medicine and Biology, Vol. 4, No. 3, 2004.
7. Jingzhou Yang, Karim Abdel-Malek, Kimberly Farrell, Kyle Nebel, "The IOWA Interactive Digital-Human Virtual Environment", 2004 ASME International Engineering Congress, The 3rd Symposium on Virtual Manufacturing and Application, Anaheim, California, November 13-19, 2004.
8. S. P. McGuan, "Human Modeling - From Bubblemen to Skeletons", SAE Paper 2001-01-2086.
9. "Current status of articulated and deformable human models for impact and occupant safety simulation at ESI Group", PUCA '98 User's Conference, Tokyo, Nov.12-18, 1998.
10. TNO Automotive, Manual: MADYMO human body models, Delft (The Netherlands), 2001.