

# 인간공학적 제품 개발을 위한 디지털 인체 모델링

글 이상헌<sup>1</sup>, 정문기<sup>2</sup>, 이건우<sup>3</sup>, 조현덕<sup>4</sup>, Ma Yanzhao<sup>5</sup>

<sup>1</sup>국민대학교 기계자동차공학부, <sup>2</sup>서울대학교 기계항공공학부, <sup>3</sup>서울대학교 기계항공공학부,

<sup>4</sup>서울대학교 기계항공공학부, <sup>5</sup>서울대학교 기계항공공학부

<sup>1</sup>shlee@kookmin.ac.kr, <sup>2</sup>mk555@snu.ac.kr, <sup>3</sup>kutwoo@snu.ac.kr, <sup>4</sup>zereneol@snu.ac.kr, <sup>5</sup>mayanzhao@cqd.snu.ac.kr

## 1. 머리말

인류의 복지 수준이 향상되면서 더욱 사람에게 편리하고 안전한 제품, 사람에게 무해한 작업 환경, 고령자를 배려한 제품 및 사회 인프라 구축 등이 관심을 모으고 있다. 이에 따라 제품 설계 시 단지 제품에 대한 모델링 및 시뮬레이션뿐만 아니라 사용자인 인체

에 대한 모델링 및 시뮬레이션을 도입함으로써 보다 인간 친화적인 제품을 만들려고 하는 노력이 자동차, 우주항공, 선박, 의류와 같은 제조업 및 의료/스포츠 분야에 널리 확산되어 가고 있다. 이에 따라 제품 설계 시 디지털 휴먼 모델을 이용한 CAE/DMU 프로세스가 기존의 전통적인 설계 프로세스에 비해서 Fig. 1에 나타난 것과 같이 제품 개발 프로세스 후반으로 갈수록 큰 비용감축, 시간 절감, 인체공학적 요소에 대한 개선 효과를 거둘 수 있다[1]. 그럼 디지털 인체 모델에 관한 연구와 응용이 의료 및 스포츠 분야 또는 제조업의 가장 대표적인 자동차 산업 분야에서 어떻게 이루어지고 있는지 간단히 살펴보도록 하겠다.

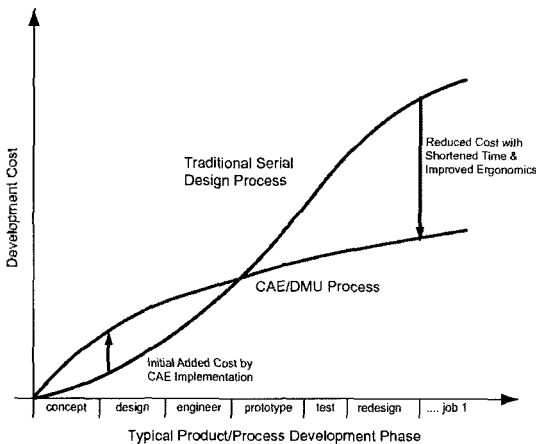


Fig. 1. A conceptual model comparing cost profiles between a traditional ergonomic design process and a computer-aided ergonomic design process with digital mock-up (DMU) capability [1]

## 2. 디지털 인체 모델 적용 사례

### 2.1 의료/스포츠 분야

의학이나 스포츠 분야에서는 생체공학적 해석을 위한 인체 모델 연구가 활발히 이루어지고 있다. 미국 Biomechanics Research Group Inc. [2]은 근골격 모델에 관한 연구를 활발히 진행하여 LifeModeler라는 상용 소프트웨어를 개발하였으며 유수의 세계적 기업 및 미국 국가기관을 client로 두고 있다. 이 제품은 의

료장비, 의학(정형외과), 스포츠, 재활, 작업 환경 시뮬레이션 등 사람의 움직임과 관련된 다양한 분야에서 활용되고 있으며 단순한 타원형태의 인체모델에서부터 복잡한 근 골격 모델까지 시뮬레이션이 가능하다. 그러나 LifeModeler는 ADAMS[3]의 플러그인 형태의 생체역학 모듈로 동역학 해석의 부분은 ADAMS에 의존하고 있다.

한편, 미국 Musculographics, Inc.[4]에서도 근골격 모델에 관한 연구를 활발히 진행하고 있으며 그 연구 성과로 생체역학 시뮬레이터 SIMM과 Dynamics Pipeline을 개발하였다. 이것은 LifeModeler와 달리 동역학 해석 모듈로 별도의 SD/FAST[5]라는 소프트웨어를 사용한다. Biomechanics Research Group사에 비하여 인간의 거동을 측정하기 위한 모션 캡처 하드웨어와의 연동, 근골격계 모델의 정밀함, 동역학적 데이터를 이용한 인간 이외의 다양한 생명체에의 적용 등

에 훨씬 뛰어난 기능을 제공하고 있어 스포츠, 의료 3D 애니메이션 등의 관련 분야에서 널리 사용되고 있다. Fig. 2는 배구 선수의 스파이크 동작을 모션 캡처하여 SIMM으로 시뮬레이션하는 장면을 보여주고 있다.

## 2.2 자동차 산업 분야

제조업의 대표적인 산업인 자동차 산업에서는 산업 특성상 인체 모델에 대한 연구가 일찍이 활발히 진행되어 왔다. 여기서는 디지털 인체 모델을 이용하여 가상 환경에서의 인간과 제품의 움직임을 분석하여 인간의 안락함과 제품의 안전 성능 향상, 인간의 자세 제어를 통한 제품 조작성 테스트 등의 기능을 제공하여 제품 개발 초기 단계에서 인간 공학적 설계를 지원하는 것을 목표로 하고 있다.

독일에서는 1987년 독일 자동차 생산 협회 주도로 Munich 대학과 연계하여 자동차 내장 초기 설계 단계에서 컴퓨터 시뮬레이션을 이용 인체의 영향을 평가하고 안락감을 테스트하기 위한 연구를 수행하였다. 이 프로젝트를 통해 유명한 Human CAD 시스템인 RAMSIS가 개발되었으며 이를 개발 판매하는 Human Solution[6] 회사가 설립되었다. RAMSIS는 자동차 내장 설계 분야의 안락함(comfort) 시뮬레이션 도구로서 독자적인 위치를 확보하고 있으며 현재 세계 자동차 회사의 70% 이상이 이를 사용하고 있다. 최근 자동차 설계에서 가장 많이 사용되는 CAD 시스템인 CATIA V5의 한 모듈로서 동작하는 버전을 개발하여 설계자에 예단 사용 편의성을 증가시켰다.

한편, 캐나다의 Genicom Consultants Ltd.사의 SAFEWORK[7]과 미국의 Pennsylvania 대학에서 NASA의 지원으로 시작한 Jack[8]이 RAMSIS와 동등한 수준의 Human CAD 시스템으로 손꼽힐 수 있다. 하지만 자동차 내장 설계에 있어 해석의 정확성과 다양한 기능 제공 부분에서 RAMSIS에 비해 상대적으로 부족한 성능을 보이는 것으로 알려져 있다. Jack

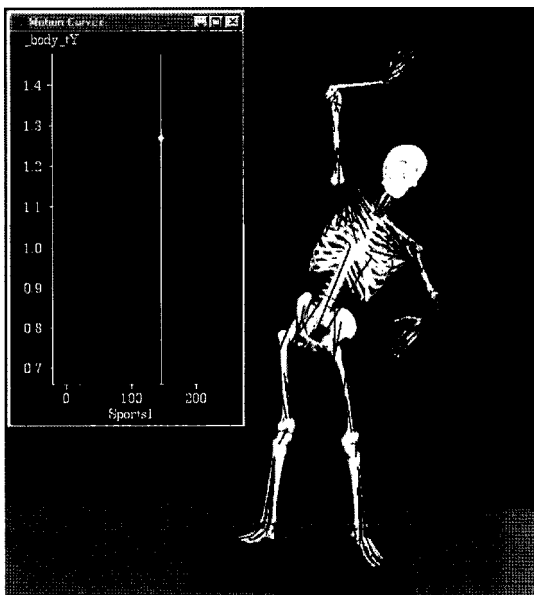


Fig. 2. Motion analysis in SIMM [4]



Fig. 3. A digital human model in a virtual manufacturing workstation rendered by Jack [1]

은 범용적인 인체 시뮬레이션 도구로서 역시 자동차 분야의 대표적인 CAD 소프트웨어인 Unigraphics에 탑재되어 작동되는데 주로 공장에서의 작업자 시뮬레이션, 자동차 내장 설계 시 운전자에 대한 시뮬레이션 기능을 제공하고 있다. Fig. 3은 Jack을 이용하여 작업장에서 작업자가 조립 작업을 수행하는 것을 시뮬레이션하는 장면을 보여주고 있다.

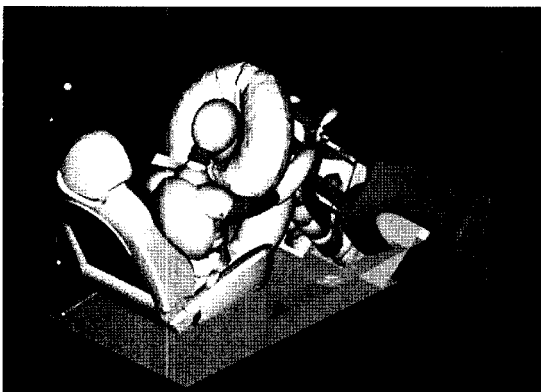


Fig. 4. Car crash simulation using MADYMO [11]

자동차 설계 분야에서는 위에서 언급한 Human CAD 시스템내의 인체 모델뿐만 아니라 승객의 안전을 위하여 해석을 위한 CAE 시스템내의 인체 모델도 널리 사용되고 있다. 이들은 특히 차량 충돌시 승객의 상해 정도를 예측하기 위한 차량 안전 분야의 해석 시스템에 널리 사용되고 있다. 대표적인 충돌 해석용 소프트웨어로서는 MADYMO와 PAM-CRASH 등을 들 수 있다.

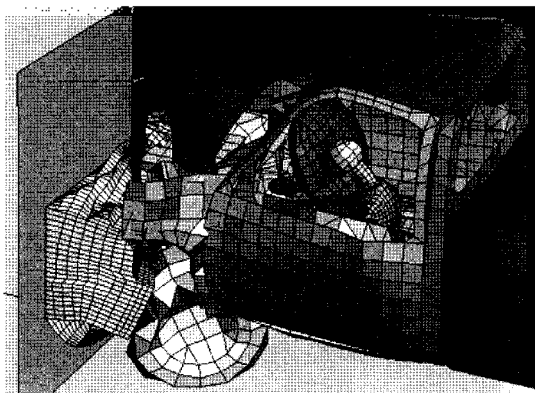
MADYMO는 MATHematical DYNAMIC MOdels의 약자로, 네덜란드의 응용과학 연구기구 (TNO)의 Automotive Safety Solution팀에서 만든 대표적인 다물체 동역학 기반의 해석 프로그램이다. MADYMO는 세계에서 가장 널리 쓰이고 있는 승객거동 해석용 소프트웨어 중의 하나로서 해석을 위한 solver가 MB(Multi-body Dynamics)를 기반으로 하기 때문에 승객거동 해석모델의 구성에서도 역시 multi-body를 정의하고, 이를 동역학적인 과정에 포함시키는 것이 추가 된다. Fig. 4는 MADYMO에서 디지털 터미 모델을 이용한 충돌 해석 장면을 보여주고 있다.

이러한 다물체 동역학 기반의 충돌해석 프로그램은 앞에서 말한 것과 같이 해석에 걸리는 시간이 짧기 때문에 다양한 변수 변경에 따른 시험에 대응하여 다수의 시뮬레이션을 수행하는 데에 적합하지만, 승객을 단순한 rigid body와 여러 restraint들로 표현하기 때문에 충돌시험의 터미와 마찬가지로 인체의 특성들을 표현하는 데에 한계가 있다.

이에 비하여 PAM-CRASH는 Finitic Element Method를 이용하여 해석을 수행하기 때문에 MADYMO와 같은 Dynamics 툴보다 해석 시간이 훨씬 오래 걸리지만, 인체의 복잡한 근골격계 구조와 다양한 물성치를 표현할 수 있다는 점이 승객의 상해치를 보다 정밀하게 예측할 수 있도록 한다. PAM-CRASH는 PAM-SAFE와 더불어 프랑스의 ESI Group에서 제작한 Virtual Prototyping 툴 중의 하나로 유한요소 해석기반의



(a) Car crash experiment.



(b) Crash simulation

Fig. 5. Car crash simulation using PAM-CRASH [11]

소프트웨어이다. Fig. 5에 차량 충돌 테스트 장면과 이를 PAM-CRASH를 사용하여 시뮬레이션 하는 장면이 소개되어 있다. 차량뿐만 아니라 그에 탑승하고 있는 터미 또는 인체에 대한 디지털 모델을 생성하여 해석에 사용하고 있음을 확인할 수 있다.

이러한 장점으로 PAM-CRASH에는 독자적인 유한요소 인체 모델을 보유하고 있으며, 이를 이용한 충돌해석이 가능하다. 하지만 이 인체모델은 인체 치수변경이나 자세 제어 등 다양한 변수 변경에 따른 시

뮬레이션 변경에 즉각 반영되기 어려운 점이 있다.

현재의 해석기술 수준에서 인체의 모든 특성을 표현하는 것은 쉽지 않은 과제이지만, 이미 수행된 여러 시험결과들을 이용하여 표준화된 인체 모델을 개발하고, 이를 이용하여 인체의 거동을 해석적으로 표현하는 것은 자동차 충돌시험의 시뮬레이션화를 통한 안전에 영향을 미치는 설계 변수의 연구에 큰 도움을 줄 수 있을 것이다.

### 3. 디지털 인체 모델링 관련 기술

디지털 인체 모델 및 Human CAD 시스템을 구축하기 위해서는 인체 모델링 기술, 인간과 제품간의 상호 작용에 대한 정의, 인체 동작 시뮬레이션 기술, 인체의 생체역학적 해석 기술 등이 필요하다. 디지털 인체 모델을 개발하기 위해서 필요한 각 기반 기술에 대하여 현재의 기술 수준 및 동향에 대하여 간략히 기술하면 다음과 같다.

#### 3.1 디지털 인체 모델의 표현

보통의 인체의 경우 206개의 뼈를 가지고 있고 수많은 티슈 조직 및 장기들이 뼈에 붙어 있다. 따라서 이를 모두 정확히 반영하는 인체모델을 구성하는 것은 대단히 어려운 일이다. 인체 모델 구성시 모델의 자유도를 높이면 높일수록 인체 모델에 대한 정확도는 향상되지만 문제의 복잡성도 같이 증가하므로 생체역학적 해석을 수행하는 것이 더욱 어렵게 된다. 따라서 적당한 수의 자유도를 가지는 단순화된 인체 모델을 구성할 필요가 있다.

많은 기존의 관련 연구자들은 자신이 해결하고자 하는 문제의 복잡도 및 응용분야에 따라서 수많은 종류의 인체 모델을 제안해왔다. 그 가운데 컴퓨터 그래픽스 분야에서 널리 사용되고 있는 인체 모델로서 ISO/IEC 19774의 Information technology-Computer graphics and image processing-Humanoid animation(H-

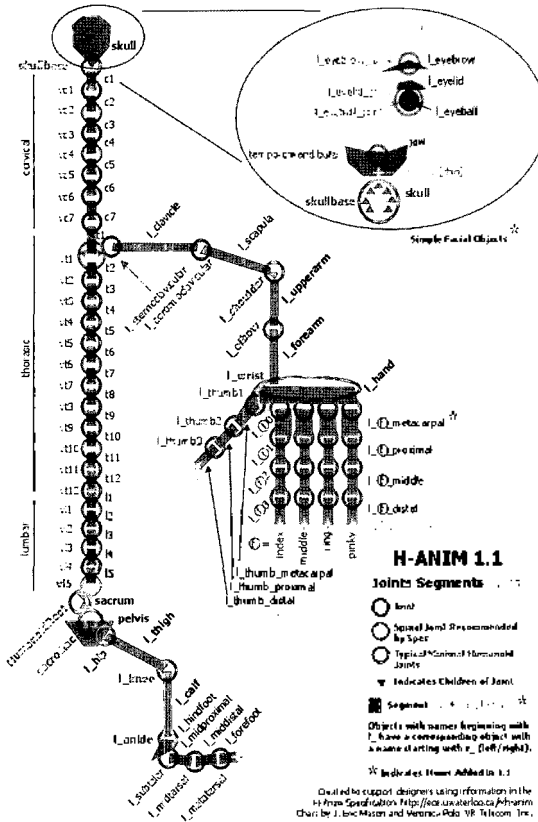


Fig. 6. H-ANIM 1.1 specification [9]

Anim)[9]이라는 표준이 있다. 이 국제표준은 humanoid를 표현하기 위한 것으로 주로 애니메이션과 관련된 작업 수행시 널리 사용된다. H-ANIM 1.1의 사양을 도식적으로 표현한 것이 Fig. 6에 나타나 있다.

3.2 인체 측정학 (Anthropometry)

디지털 인체 모델은 다양한 범위의 남녀노소 인구에 대해 실제 신체 정보를 근접한 수준으로 만들어져야 하며, 이를 위해 실제 사람들을 추출하여 그에 대한 인체 치수 정보 데이터베이스를 구축하고 이를 활

용하여 디지털 인체 모델을 생성시켜야 한다. 따라서 이러한 데이터베이스를 구축하기 위해서는 인체 측정 기술이 반드시 필요하다.

인체를 측정하는 방법에는 자를 이용하는 수동 방법과 스캐너를 이용하는 자동 방법으로 구분할 수 있다. 수동 방법은 줄자와 같은 도구를 사용하여 측정자가 피측정자의 주요 치수 부위를 직접 손으로 측정하여 기록하는 방법이다. 이에 비하여 자동 방법은 3차원 스캐너를 사용하여 인체 형상을 point cloud 형태의 데이터로 얻어내어 그로부터 surface 정보까지 구성하거나 그대로 사용하는 방법이다.

세계 각국은 각자 자국의 국민들을 대상으로 인체 측정 사업을 수행해 왔는데, 미국의 경우 1998 ~ 2000년에 CAESAR (Civilian American and European Surface Anthropometry Resource) 프로젝트를 통해서 18 ~ 65세의 남녀 2,375명을 대상으로 38개 부위에 대한 치수 조사를 하였다. 일본의 경우는 가장 최근에 1997 ~ 98년에 남녀 18 ~ 29세 대상으로 각 연령별 100명, 60세가 넘는 사람들에게 대해서 연령별 각 50명에 대해서 49개 부위에 대해 인체 치수를 측정할 바 있다.

한국의 경우도 산업자원부 기술표준원 주관으로 Size Korea 라는 한국인 인체 치수 측정 사업을 수행하였다. 2003년4월~2004년11월 동안 전국 시군별로 한국인 21,295명을 대상으로 직접 측정, 동측정 및 3차원

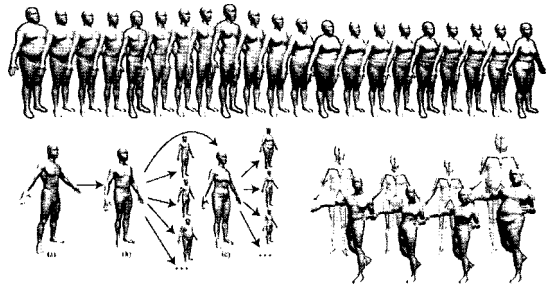


Fig. 7. Parametric human model generation [13]

측정을 수행하였다.

이처럼 일단 표본에 대한 인체 치수 데이터베이스가 구축되면 그로부터 대표적인 퍼센트의 인체 치수를 통계적으로 얻어내어 이를 제품 설계에 사용한다. 최근에는 어떤 정해진 퍼센트의 인체뿐만 아니라 다양한 연령, 성별, 인종에 대한 인체 모델을 파라메트릭 기법을 적용하여 생성하는 기술이 널리 연구되고 있으며 그 예가 Fig. 7에 나타나 있다 [13].

### 3.3 모션 캡처 시스템

디지털 인체 모델링 및 시뮬레이션 분야의 핵심은 생체 역학적 인체 모델과 더불어 인체 모델의 자세와 동작을 제어하는 컴퓨터 알고리즘에 있다. 이러한 생체 역학적 모델은 크게 다음의 두 가지 특징을 갖고 있어야 한다: 첫째, 현실감 있는 인체를 반영하기 위해서 인체모델의 생체 역학적 구조가 충분한 정도의 복잡성(자유도)을 지니고 있어야 하고, 대다수의 사람들의 동작 범위도를 반영해야 하며, 인체 모델이 재생성한 자세나 동작이 실제 사람과 유사해야 한다. 둘째, 실시간으로 인체 모델 동작을 표현하기 위해서 컴퓨터 알고리즘이 시간적인 측면에서 효율적이어야 한다.

모션 캡처 시스템은 인간의 동작을 잡아내어 시간에 따른 일련의 3차원 위치/방향 정보를 제공해 주는 시스템을 말한다. 이 자료는 디지털 인체 모델이 실

제 인간의 동작을 재현하거나 혹은 인체 모델에 대한 생체 역학적인 분석 작업 수행시 그에 대한 입력 자료로 사용된다.

모션캡처 시스템은 크게 광전자 방식과 비광전자 방식의 두 가지로 분류할 수 있다. 먼저 광전자(opto-electronic) 방식의 시스템은 인체의 신체 표면상의 특징점상에 마커를 붙이고 이를 카메라로 추적하여 3차원 위치 정보를 얻는 방식으로서 현재 가장 널리 사용되고 있다. 마커가 빛을 반사하는 경우에는 수동(passive) 시스템이라고 하고, 반대로 마커가 빛을 내는 경우에는 능동(active) 시스템이라고 한다. 광전자 모션 캡처 시스템의 응용성을 제한하는 요소로서 첫째는 하나의 마커가 최소한 두 개 이상의 카메라에 동시에 잡혀야 그 마커의 3차원 위치 정보를 얻을 수 있다는 점과 두번째는 신체 세그먼트에 부착된 3개의 non-collinear 마커를 알고 있어야 그 세그먼트의 위치와 방향을 결정할 수 있다는 점이다.

두번째 비광전자 방식의 시스템으로는 전자기(electromagnetic) 또는 초음파(ultrasonic)등을 이용한 것들이 있다. 이러한 시스템은 광전자 방식에 비하여 가시성(visibility) 제약 조건이 없는데 이로 말미암아 자동차 시트 등에 기댄 상태에서의 허리의 요추 부분의 운동에 대한 측정 등 가려진 부분이 발생할 경우에 적절하다. 또한 전자기 시스템은 광전자 시스템에 비해 적은 개수의 마커만 있으면 되는데 이는 각각의 전자기 센서는 위치 및 방향 정보를 등록하므로 그 마커가 부착된 인체 세그먼트의 모든 6자유도 운동을 측정하기 때문이다. 초음파 시스템은 상대적으로 단순한 동작을 측정하기 위해 고안되었고, 전신의 복잡한 인체 동작을 측정하는 데는 적합하지 않다.

어느 방식의 시스템이든지 모두 인체 표면에 부착된 마커의 위치를 측정하기 때문에 원래 관심 대상인 인체 피부 밑의 뼈의 운동에 관한 정보를 얻어내려면 인체 표면 측정한 데이터로부터 관절과 뼈의 위치를

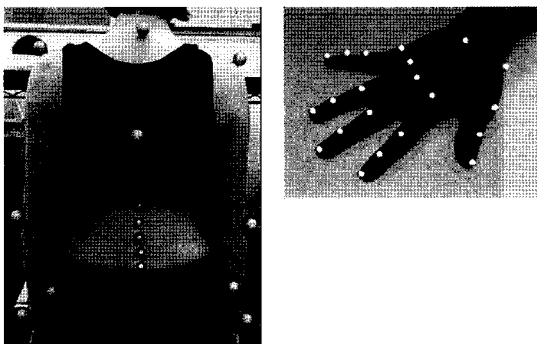


Fig. 8. Opto-electronic motion capture system [1]

계산해 낼 수 있어야 한다. 정확한 계산을 위해서는 방사선, CT, MRI 등을 이용한 의료 영상 시스템을 이용하여 대상인의 내부 형상을 조사할 필요가 있다.

이러한 모션 캡처 시스템을 이용한 인체 시뮬레이션 응용 사례로서 자동차의 승하차(ingress/egress) 동작 분석을 들 수 있다. 같은 자동차라 하더라도 나이, 성별 및 기타 다양한 신체 조건에 따라서 승하차의 편의성이 다르다. 이를 실제 사람이 실험적으로 검증하는데에는 많은 시간과 비용이 소요되므로 이를 디지털 인체로 대체하여 가상 실험을 수행하는 것이 필요하다. 즉, 표준 인체 치수뿐만 아니라 다양한 조건의 신체 특징을 지닌 사람들을 파라메트릭 인체 모델 생성 방법을 사용하여 생성시킨 후 이를 가상의 자동차 모델을 대상으로 가상 인간이 승하차를 하면서 그 편의도를 생체역학 해석을 통하여 시뮬레이션하는 것이다. 이러한 인체 가상 시뮬레이션 시스템이 의미있는 해를 제공할 수 있다면 자동차 개발 기간 단축과 품질 향상에 크게 기여할 수 있을 것이다. Fig. 9은 RAMSIS 상에서 승하차 시뮬레이션을 하고 있는 장면을 보여주고 있다.



Fig. 9. Ingress and egress motion simulation [11]

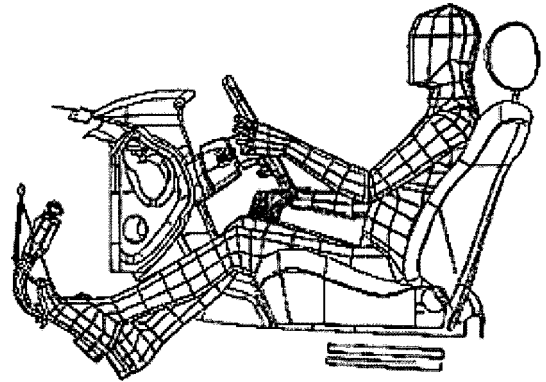


Fig. 10. Driver posture control [11]

### 3.4 자세 및 동작 제어 알고리즘

자동차 설계 시 디지털 인체 모델을 필요로 하는 부서는 충돌 안전 해석 팀도 있지만 패키지 팀에서도 이를 절실하게 필요로 한다. 여기에서는 Fig. 10에 나타난 것과 같이 주로 자동차 내장 패키지를 위한 각종 부품들과 운전자의 상대적인 위치의 적절성을 파악하고 운전자 시야 확보성 등을 검증한다. 이러한 패키지 분야에서 디지털 인체 모델을 유용하게 쓰기 위해서는 인체 모델을 단순하고 인터랙티브하게 원하는 위치와 자세에 위치시킬 수 있는 기술이 있어야 한다.

디지털 인체 모델의 자세는 인체를 이루는 골격들의 상대적인 위치 관계를 설정해 놓은 것으로서 여기에는 몇 가지 기준 조건들을 만족시켜야 한다. 우선 각 관절 조인트의 동작 범위를 벗어나지 않아야 하며, 인체를 구성하는 세그먼트들이 상호 침범을 하지 않도록 해야 한다. 또한 힘의 평형과 같은 물리적 법칙들을 만족시켜야 한다. 한편, 자세 선정에 영향을 미치는 요소로서 인체 모델의 과도한 자유도, 본질적으로 불안한 평형상태, 근골계 시스템의 복잡성, 그리고 수많은 개인 특성(즉, 성별, 연령, 근육 강도, 경험 등)과 같은 것들이 있다.

인체 모델의 자세를 제어하기 위해서는 주로 로보

틱스 분야에서 널리 연구되는 역기구학(inverse kinematics) 이론을 디지털 인체 모델에 적용할 필요가 있다[10]. 예를 들어 손이 어떤 위치로 갈 때 몸의 각 관절에서 얼마만큼 뼈가 회전해야 하는지를 역으로 계산하는 과정이 필요하다. 그러나 로봇과 달리 인체는 근본적으로 redundant한 자유도를 갖는 다관절 시스템이기 때문에 무수히 많은 해가 존재하게 된다. 가장 자연스러운 자세를 찾기 위하여 다양한 최적화 기법과 경험적인 기법을 동원하고 있으며 아직도 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

#### 4. 맺음 말

본 글에서는 디지털 인체 모델의 응용 분야 그리고 디지털 인체 모델과 관련된 요소 기술들에 대하여 간략히 소개하였다. 현재는 각 응용 분야별로 각각 필요한 수준의 인체 모델을 개발하여 이를 한정된 분야에 사용하고 있으나 보다 효율적인 인체 모델링 및 시뮬레이션을 위해서는 이를 통합시키는 작업이 필요하다. 즉, CAD의 인체 모델과 CAM, CAE의 인체 모델 사이의 공유가 가능하도록 함으로써 일관되는 설계 해석 과정이 수행될 수 있어야 한다. 만일 이러한 환

경이 구축된다면 Fig. 11에서와 같이 자동차 초기 설계 단계에서 Human CAD 시스템을 이용한 패키지 작업 수행 후 여기서 사용된 인체 모델과 제품 모델을 바로 충돌 해석을 위한 CAE 시스템의 입력 자료로 활용할 수 있게 된다. 필자들은 이러한 환경 구축을 연구 목표로 하여 현재 인간 친화적 미래형 자동차 설계를 위한 디지털 인체 모델링 및 시뮬레이션 시스템 개발을 위한 과제[11, 12]를 수행하고 있으며 이러한 연구가 보다 널리 확산되어 보다 인간에게 편리하고 안전한 생활 환경이 하루빨리 구축될 수 있기를 기대한다.

#### 참고문헌

1. Xudong Zhang and Don B. Chaffin, "Digital human modeling for computer-aided ergonomics", <http://www.mechse.uiuc.edu/research/xudong/>, 2005.
2. Biomechanics Research Group Inc., <http://www.lifemodeler.com/>
3. [http://www.mscsoftware.com/products/adams\\_cfm](http://www.mscsoftware.com/products/adams_cfm)
4. <http://www.musculographics.com/>
5. <http://www.sdfast.com/>
6. <http://www.human-solutions.com/>
7. [http://www.safework.com/safework\\_pro/sw\\_pro.html](http://www.safework.com/safework_pro/sw_pro.html)
8. [http://www.ugs.com/products/teconmatix/human\\_performance/jack/](http://www.ugs.com/products/teconmatix/human_performance/jack/)
9. <http://lh-anim.org/>
10. <http://hms.upenn.edu/software/ik/>
11. 이견우 외, "인간 친화적 미래형 자동차를 위한 인체 모델링과 시뮬레이션 시스템 개발", 최우수실험실지원사업 중간보고서, 2006. 8.
12. 정문기, 이견우, 조현덕, Ma Yanzhao, "인간 친화적 설계 시스템을 위한 디지털 인체 모델 생성", 2007 한국 CAD/CAM학회 학술발표회 논문집, 2007. 1.31-2.2.
13. Brett Allen, Brian Curless, Zoran Popovic, "The space of human body shapes: reconstruction and parameterization from range scans", *ACM Transactions on Graphics (ACM SIGGRAPH 2003)*, 22, 3, 587-594.

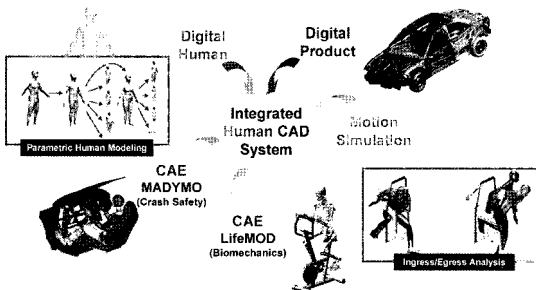


Fig. 11. Integrated human CAD/CAE system [12]