

유한요소해석을 통한 인체의 생체역학적 평가

이 글에서는 인체의 유한요소 모델링과 해석 과정의 전반적인 소개 및 무릎관절을 중심으로 각각의 과정에 대한 적용방법을 상세히 알아보고, 유한요소해석을 통한 인체의 생체역학적 평가에 관한 적용사례를 소개하고자 한다.

배지용 전남대학교 기계공학과, 석·박사 통합과정
전인수 전남대학교 기계시스템공학부, 조교수

e-mail : wavefire@naver.com

e-mail : i_jeon@chonnam.ac.kr

생체역학이란, 생명을 의미하는 접두사 'Bio'와 힘을 받는 물체의 운동이나 형태의 변화 등을 연구하는 학문인 'Mechanics'의 두 단어가 결합된 합성어로서, 그 정의가 매우 다양하다. 그러나 일반적으로 생체, 특히 인체와 관련하여 발생하는 역학적인 현상에 관하여 연구하는 학문으로서, 체내의 혈액과 같은 유체 흐름과 압력, 속도, 유량 등의 평가와 뼈, 치아, 장기 등과 같은 고체의 인체에의 운동 및 외부 하중으로 인해 받게 되는 영향을 평가하는 연구라 할 수 있다. 이러한 생체역학은 공학과 의학이 결합된 융합과학의 한 분야로서, 급속한 경제발전으로 인한 생활수준의 향상, 건강에 대한 관심의 고조, 인간중심의 고품질 제품요구 등에 따라 나날이 발전해 왔으며, 그 범위 또한 점차 광범위해지고 세분화되고 있다.

과거로부터 현재까지 생체역학적 연구들은 매우 다양한 방법으로 진행되어 왔다. 가장 보편적이고 오랜 역사를 가진 것은 인체 또는 동물의 사체를 이용하여 실험하는 방법이 있으며, 현대에 이르러 비디오 카메라를 사용한 3차원 운동측정법, 압력센서를 이용한 압력분포 또는 힘 측정법, 생체에서 측정되는 전기적인 신호인 근전도, 심전도, 뇌전도 등을 측정하여 실험하는 방법, 초음파, X선영상, CT영상, MR영상, 핵의학 영상 및 현미경 영상 등을 촬영하여 평가하는 방법 등 다양한 연구 목적에 따라 다양한 방법들이 사용되고 있다.

그러나 이러한 실험적 방법을 통해 획득할 수 있는 데이터에는 한계가 있을 뿐만 아니라, 시편의 상태, 실험 환경 등에 크게 영향을 받으며, 이에 따라 결과의 변동폭이 크다는 단점이 있다. 따라서 이를 보완하기 위하여 실험적 연구와 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 해석적 연구가 동시에 수행되어 왔다. 다양한 컴퓨터 시뮬레이션 기법 중 유한요소법을 이용한 해석적 연구는 30여 년 전 처음 시작된 이래로 최근까지 생체역학 분야에서 매우 유용하게 쓰이고 있다. 이 방법은 적은 비용으로 실험이 가능하며, 실제 실행하기 불가능한 실험을 가상 시뮬레이션을 통하여 가능하게 한다. 또한 얻을 수 있는 데이터의 종류가 많고, 동일한 조건에서의 다양한 상황을 연출하여 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 더군다나 최근의 급속한 과학기술의 발달로 인한 고성능의 컴퓨터 시스템의 이용은 더욱 정확하고 빠른 시뮬레이션을 가능케 하고 있어, 생체역학 분야에서 필수적이며, 매우 광범위 하게 이용되고 있다.

이에 필자는 인체모델에 대한 유한요소해석의 과정을 상세히 설명하고 다양한 적용사례에 대하여 설명하고자 한다.

인체모델의 재구축

일반적으로 인체모델의 재구축 방법은 CT영상, MR영상, 방사선 사진 등과 같은 2차원 영상으로부터

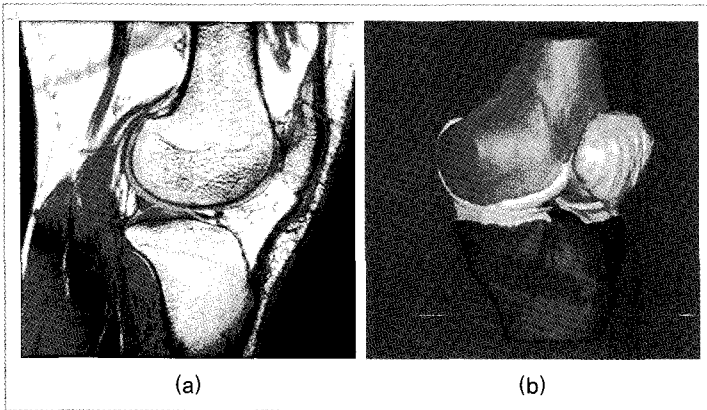


그림 1 MR 영상을 이용한 무릎관절의 (a) 외곽선 추출과정, (b) 재구축 모델

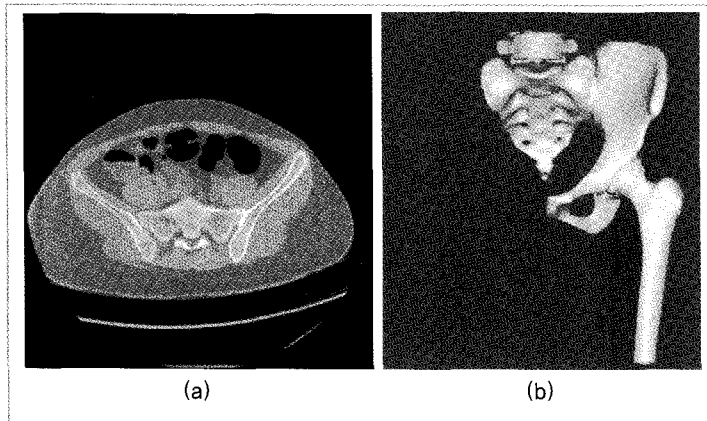


그림 2 CT 영상을 이용한 고관절의 (a) 외곽선 추출과정, (b) 재구축 모델

이진화 방법을 사용하여 모델의 외곽선을 추출하고, 추출된 외곽선을 적층하여 3차원 모델로 만드는 방식을 사용한다. 여기서 사용된 이진화 방법은 특별한 알고리즘을 통하여 물체와 배경을 분리하거나, 임계값을 기준으로 일정한 명도 이상의 픽셀을 추출해 내거나, 영상을 단순화시키는 등 광범위하게 사용되고 있는 영상처리의 방법 중 하나이다. 물론 단순히 이진화 방법을 거쳐 바로 정밀한 외곽선을 얻을 수 있는 경우는 아주 드물다. 많은 수의 영상을 하나의 임계값으로 구분하기에는 무리가 있기 때문이다. 그러므로 최대한 오차가 없는 임계값을 선택하여 이진화한 후 각 영상마다 세밀한 수정작업이 이루어진 후에 외곽선을 추출하게 된다.

CT영상의 경우 명암이 확실하여 수정작업이 많이 필요치 않지만 MR영상의 경우 연조직, 경조직, 윤활액, 신경조직 등의 경계가 매우 모호하며, 각 조직의 특성을 명암별로 구별할 수 없기 때문에 이진화 방법으로 모델링 하기에는 한계가 많다. 이때에는 각 영상별

로 원하는 조직의 외곽선을 직접 그려 나가야 하기도 한다. 그래서 MR영상을 기반으로 한 인체모델의 재구축은 연조직과 경조직을 한 번에 모델링이 가능하고, 각 조직을 오차 없이 위치시킬 수 있는 장점이 있지만, 이와 반대로 많은 시간과 노력이 필요하며, 정확한 해부학적 지식을 가지고 있어야 가능하다. 이러한 방법으로 추출된 외곽선을 단층 촬영된 간격으로 적층하여 렌더링하게 되면 비로소 3차원 모델이 생성된다. 재구축된 모델을 유한요소 형성 작업이 가능한 기하학적 솔리드 모델로 제작하여 최종적인 재구축 작업을 마친다.

이러한 재구축 모델은 유한요소 모델 제작의 기반이 되기 때문에 재구축 과정에 있어서 가장 중요한 것은 실제 인체정보에 대한 왜곡을 최대한 줄이는 것이다. 정밀한 작업을 위해서는 높은 선명도와 정밀도를 가진 영상데이터의 획득이 중요하며, 촬영간격을 좁게 설정하여 많은 수의 영상데이터를 확보하는 것이 좋다.

위에서 설명한 작업들을 쉽게 할 수 있는 3차원 재구축 전용 소프트웨어로는 MIMICS, 3D-Doctor, Amira, Simpleware 등이 있으며, 다양한 형태의 파일로 저장이 가능하기 때문에 현재 널리 쓰이고 있다.

인체 유한요소모델링

인체 유한요소모델링은 기하학적, 해부학적, 역학적으로 매우 복잡하기 때문에 인체의 모델링에 대한 연구는 현재까지 많은 연구자들에 의해 연구되고 있으며, 아직도 해결해야 할 과제가 많아 생체역학 연구자들이 어려움을 느끼고 있는 분야이다. 따라서 인체 유한요소모델링은 해부학적, 역학적으로 많은 경험과 지식이 필요하며, 해석하고자 하는 목적을 뚜렷이 해야 한다. 모든 유한요소해석이 그러하듯 인체의 유한요소 해석에서도 마찬가지로 경우에 따라 단순화 과정이 필요하며, 해석에 필요한 적절한 요소의 선택, 실제와 가까운 경계조건과 물성치 적용 등이 매우 중요하다.

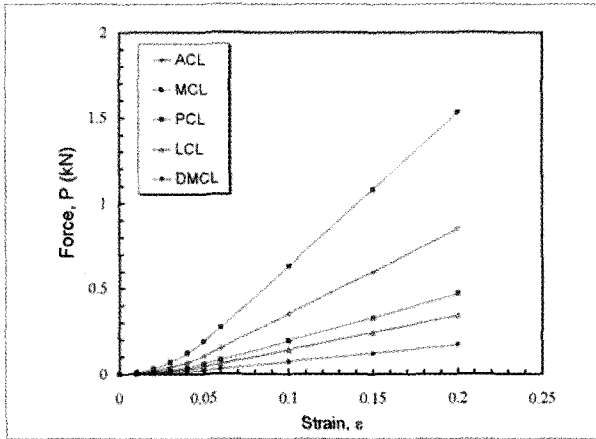


그림 3 무릎관절 주요 인대의 힘 - 변형률 곡선

무릎관절에 대한 유한요소모델링의 과정과 고려사항을 예로 들면 다음과 같다. 먼저, 해석하고자 하는 목적을 정확히 해야 하며, 무릎관절의 생체역학적 기능과 해부학적 구조를 정확히 알아야 한다. 무릎관절은 인체의 거동과 관련 있는 주요기관 중 하나이지만 매우 불안정한 관절구조이다.

그래서 이를 안정적으로 지탱하기 위해 인대, 힘줄, 근육 그리고 다양한 섬유조직과 활액 등이 무릎관절을 구성하고 있

다. 뼈 같은 경우에 성별, 나이, 병변의 유무, 살아온 환경, 골밀도의 차이 등의 개인적인 차이로 인해 다양성을 가질 수 있으며, 그 구조 또한 불균일(non-homogeneous)하고 비등방성(anisotropic)을 갖는 복합 구조(composite structure)이기 때문에 해석목적에 따라 적절한 물성치의 적용이 고려되어야 한다.

무릎관절 운동에 중요한 역할을 하는 인대, 힘줄, 근육의 경우 각각의 생체역학적 역할, 해부학적 부착 위치, 물

성치, 모델링 할 요소의 종류를 특히 중요하게 고려해야 하며, 경우에 따라 기하학적 형태 또한 신중하게 고려해야 한다. 무릎관절 내에서의 충격흡수, 적절한 하중의 전달과 분배, 윤활작용의 촉진 등의 역할을 하는 관절연골과 반월상 연골의 경우는 기하학적 형태, 위치, 물성치에 따라 결과가 다르게 나올 수 있어 이에 유념해야 한다. 위에서 각 조직별로 언급을 했지만, 인체 유한요소해석에서는 특히 물성치 적용에 있어서 매우 신중하게 고려되어야 한다. 어떤 물성치를 적용하느냐에 따라 결과는 크게 달라질 수 있으며, 모델링 방법도 달리 해야 하기 때문이다.

표 1에서는 무릎관절에서 사용되는 물성치의 예를 보여주고 있다. 표 2와 그림 3에서는 무릎관절의 주요인대를 변형에 따른 힘에 의한 관계식에 의하여 그래프로 정의하여 비선형으로 표현한 예를 보여주고 있다. 이와 같이 일반적으로 알려진 물성치를 적용할 수도 있

표 1 무릎관절에서의 각 조직의 물성치

조직 이름	물성치
대퇴골, 경골, 슬개골	선형탄성, 등방성 =10500.0 MPa, $\nu=0.30$
대퇴골/경골 연골	=5.0MPa, $\nu=0.46$
슬개골 연골	=7.0MPa, $\nu=0.47$
내측/외측 반월상 연골	=59.0MPa, $\nu=0.49$
대퇴사두근	선형탄성, 등방성 =303.9MPa, $\nu=0.30$, PCSA=64.60mm ²
슬개인대	=459.3MPa, $\nu=0.30$, PCSA=36.80mm ²
관상인대	=416.0MPa, $\nu=0.30$, PCSA=2.05mm ²
무릎가로인대	1차원 선형 스프링 =900N/mm
전,후방 각의 접착부위	=2000N/mm

표 2 무릎관절 주요 인대의 물성치

인대	물성치	k
전방십자인대(ACL)	Anterior bundle	5000N
	Posterior bundle	
후방십자인대(PCL)	Anterior bundle	9000N
	Posterior bundle	
외측측부인대(LCL)	Inferior bundle	1차원 비선형 스프링 2000N
	Posterior bundle	
내측측부인대(MCL)	Anterior bundle	4000N
	Inferior bundle	
심부관절낭인대(DMCL)	Posterior bundle	1000N
	Anterior bundle	

으나, 경우에 따라서 해석자가 직접 실험하여 필요한 물성치를 얻는 것도 하나의 방법이라 할 수 있다.

최종적으로 유한요소 모델링이 끝이 나면 모델의 정확성을 검증하여야 한다. 다양한 경계조건을 적용하여 실제 실험값 또는 이미 발표된 논문과 비교하거나 수렴성 테스트(convergence test)를 하는 방법 등이 있다.

인체 유한요소해석 적용 사례

서론에 언급하였지만 유한요소해석을 통한 해석적 연구는 생체역학 분야에서 매우 광범위하게 사용되고 있다. 따라서 모든 사례를 일일이 열거할 수는 없지만 대표적인 몇 가지 사례를 들면 다음과 같다.

첫 번째로, 임플란트와 같은 의료보조기구에 대한 설계에 있어 유용하게 쓰이고 있다. 이러한 임플란트에는 인공관절, 인공치아, 인공뼈, 의료용 고정나사, 고정 플레이트, 혈관 스텐트 등이 있으며, 인공심장이나 인공내이 같은 전자회로를 내장한 것들도 있다. 이렇게

다양한 임플란트는 구조/강도/진동/피로 등의 유한요소 해석을 수행하여 개발되고 있으며, 최종적으로는 개발된 임플란트를 직접 인체에 삽입하고 가상 시뮬레이션 하여 그 적합성을 판단하기도 한다.

두 번째로, 어떠한 병리적 현상의 원인과 그 해법을 알아내고자 하는 목적으로 사용되기도 한다. 특히 관절운동의 안정성, 장애치료를 위한 시술 후의 보행 또는 시술의 완성도나 재활의 정도를 예측하고 분석하는 것은 임상적인 측면으로도 매우 중요한 의미를 갖는다. 예를 들어, 무릎관절의 반월상 연골절제술에 대한 생체역학적 평가를 하고자 한다면, 무릎관절에 대한 유한요소 모델을 이용하여 유한요소해석을 바탕으로 한 가상 수술을 실시하고 해석의 결과 값을 이용하여 실제 수술에 사용될 정보를 제공함으로써 실제 수술에 앞서 수술 예비계획의 목적으로도 사용될 수 있다. 즉, 수술 예비계획에서 환자의 질환에 적합한 수술방법을 결정하고, 유한요소 해석을 통하여 가상으로 수술을 수행함으로써 수술 후의 환자의 골격 형상 변화와, 골격 형상의 변화가

접촉압력, 압력분포, 내부응력 등과 같은 역학적 인자에 미치는 영향을 분석할 수 있다.

세 번째로, 운동화, 구두, 등산화 등과 같은 신발의 인체공학적인 설계를 위하여 사용될 수 있다. 연령별, 성별, 보행 시, 운동 시 등의 각 상황을 유한요소해석을 통해 시뮬레이션 하여, 가장 취약한 부분을 찾아내어 Database화한 후 이에 따라 최적 신발 설계를 위하여 적용할 수 있다.

마지막으로, 자동차 충돌해석이나 보행 시 모션측정 등 인체의 다양한 운동모션 시뮬레이션에 사용된다. 인체 외부의 운동 및 인체 외부관절에 작용하는 힘과 모멘트를 측정할 수 있을 뿐 아니라, 인체 내부에서 일어나는 다양한 근육

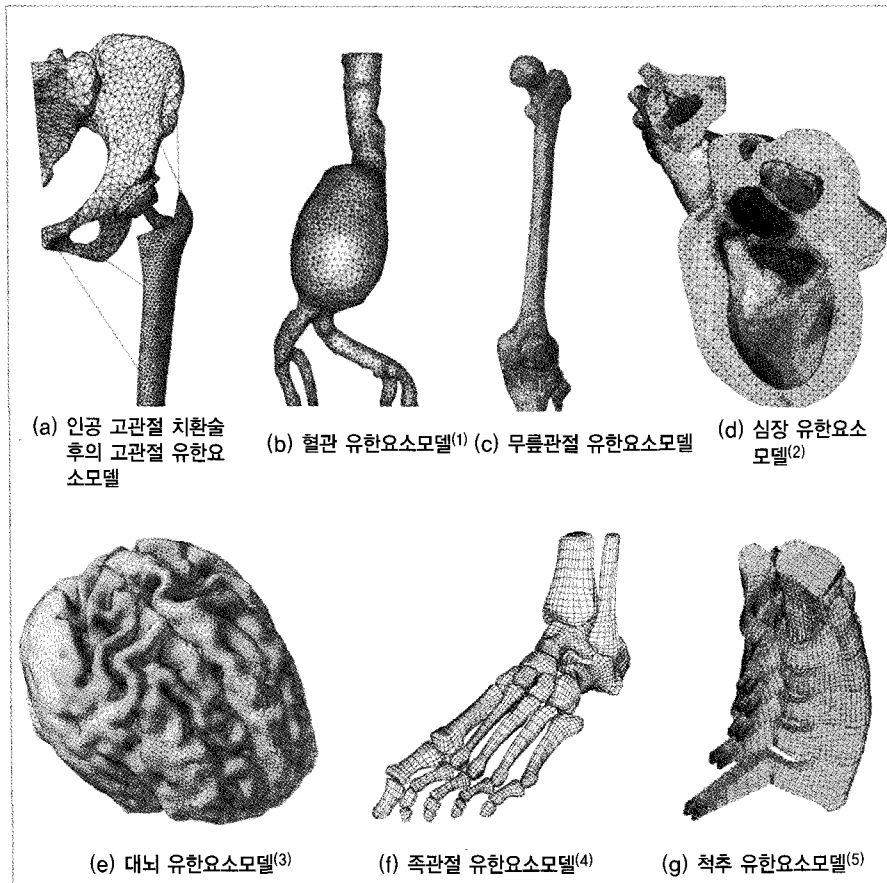


그림 4 인체 부위의 유한요소모델

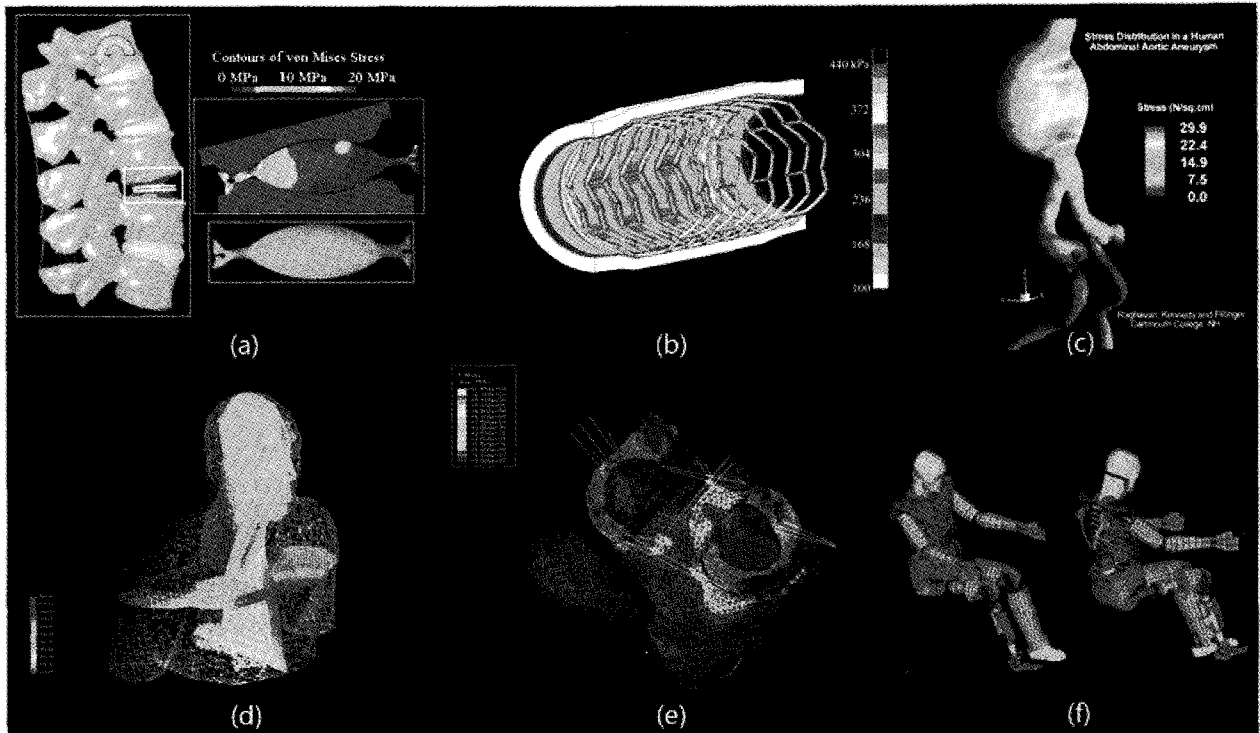


그림 5 다양한 인체 유한요소해석 적용 사례 (a) Exponent 사의 척추 임플란트 해석⁽⁶⁾, (b) 혈관 stent의 구조해석⁽⁷⁾, (c) 복부 대동맥의 응력 해석⁽⁸⁾, (d) 인체의 전기적 자기장의 해석⁽⁹⁾, (e) 반월상 연골의 생체역학적 평가를 위한 해석, (f) 차량충돌해석을 위한 더미⁽¹⁰⁾

격계의 상호운동, 작용 힘, 모멘트, 응력 등을 알아 낼 수 있어, 비디오 카메라를 사용한 3차원 측정법과 함께 사용되고 있다.

맺음말

이와 같이 유한요소해석을 통한 인체의 생체역학적 평가 방법은 최근 들어 생체역학 분야에 있어 매우 중요한 기법으로 자리잡고 있다. 하지만 인체에 대한 유한요소모델의 제작은 기하학적, 그리고 해부학적으로 그 구조가 매우 복잡하여 현재에는 완벽한 모델을 얻는 것에 한계가 존재하기 때문에 이러한 모델을 이용한 해석의 결과값을 무조건 맹신하는 것은 곤란하다. 따라서 모든 인체의 유한요소모델을 이용한 해석을 위해서는 실험적 데이터를 고려하거나, 또 다른 방법의 실험을 병행함으로써 그 신뢰도를 높여야 할 것이다.

이미지 출처

- (1) Mimics, Materialise Software의 소개자료.
- (2) <http://cvcweb.ices.utexas.edu/cvc/projects/>

medx/meshing/heart/index.html.

- (3) http://me-wiki.eng.uab.edu/etlab/?page_id=37.
- (4) Daniel L.A., William R. L., et al. (2002). "A three-dimensional, anatomically detailed foot model: A foundation for a finite element simulation and means of quantifying foot-bone position", JRRD. Vol. 39 No. 3, Pages 401-410.
- (5) <http://www.uic.edu/labs/brl/cervical1.htm>.
- (6) http://www.exponent.com/finite_element_analysis_for_medical_devices/.
- (7) <http://www.mscsoftware.com/Solutions/Success-Stories/Detail.aspx?storyid=108>.
- (8) http://www.tecplot.com/showcase/studies/case_study.aspx-issue=3&article=1.
- (9) http://www.nlm.nih.gov/research/visible/vhp_conf/mueller/paper.htm.
- (10) <http://www.volpe.dot.gov/safety/biomodeling.html>.