

계산역학의 연구방향들

Research directions in computational mechanics

J. Tinsley Oden^{a,*}, Ted Belytschko^b, Ivo Babuska^a, T.J.R. Hughes^a

^aThe Texas Institute for Computational and Applied Mathematics, The University of Texas,
ACES 6.324A (C200), 201 East 24th Street, Austin, TX 78712, USA

^bNorthwestern University, Mechanical Engineering, 2145 Sheridan Road, Evanston,
IL 60208 / 3111, USA



박영하*



박인석**



엄기용**

*한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원
**한국도로공사 도로교통기술원 연구원

이 논문은 미 국립 이론응용역학 위원회(US National Committee for Theoretical and Applied Mechanics)에서 작성한 보고서 중의 하나에서 발췌한 것이다. 여러 역학 분야의 연구방향에 관한 정책방침서 개발을 목적으로 한 위원회 비망록 중의 일부이며 계산역학에 관한 가장 최근의 작업이다. 보고서는 Tinsley Oden(위원장), Ted Belytschko, Ivo Babuska and Thomas Hughes로 구성된 소위원회에 의해 저술되었으며 전체적으로 미국 이론응용역학 위원회(USNCTAM)의 제안들도 포함하고 있다.

1. 계산역학 : 계산과학 및 공학의 핵심분야

이론응용역학(Theoretical and applied mechanics, TAM)은 역학현상, 즉 힘을 받는 유체, 고체 및 복잡한 재료의 거동을 연구하는 응용과학의 한 분야이다. 우리의 생활과 안전 그리고 윤택한 삶에 영향을 주는 사실상의 모든 영역에서 기술적 발전이 이루어지도록 산업사회에 이론응용역학보다 더 큰 충격을 가한 학문은 거의 없었다.

계산역학(Computational mechanics, CM)은 이러한 이론응용역학의 부속 학문으로서 역학 원리들에 의해 지배되는 현상들을 연구하는 계산방법과 도구의 사용에 관한 학문이며 역학법칙에 의해 지배되는 물리적 현상과 공학적 체계를 특성화 하고 예측하고 모사하는 계산학적 접근의 사용과 관련된 계산과학과 공학에 중요한 부분을 차지하는 학문이다. 계산역학은 지난 30년간의 과학과 기술에 심오한 충격을 주어 왔다. 고전 뉴턴 이론의 많은 부분을 복잡한 체계의 예측과 이해를 위한 실용적 도구들로 변환시켜 왔고 전 세계에 걸친 현재와 미래의 기술적 진보를 모사하고 설계하는데 사용되고 있다. 계산역학은 현대 문명의 중심인 제조, 통신, 운송, 의학, 국방 그리고 많은 다

른 분야에 광범위한 충격을 가해 왔다. 양자, 분자 그리고 생체역학에 기초한 물리학 및 생물학적 체계의 새로운 모델을 편입시키면서 성장과 응용을 위한 엄청난 잠재력을 갖게 되었다.

계산역학에서의 성공적 연구는 본질적으로 타 학문분야와 연관된다. 역학, 수학, 전산학, 그리고 다른 과학적 학문분야들의 여러 영역을 걸치는 개념 및 방법, 그리고 원리들의 조합이 이에 대한 반영이다. 이 논문에서 명백해지는 바와 같이 계산역학에서의 내일의 연구는 많은 새로운 기술들과 과학분야에 걸쳐 과거 어느 때보다도 광범위해질 것이다.

이 논문의 목적은 향후 10 여 년 동안 질문의 초점이 될 계산역학에서의 주 연구영역에 관한 전망을 제공하는 것이다. 즉, 계산역학에서의 연구방향은 무엇인가? 산업계와 정부기관, 대학 연구자들, 그리고 계산역학에서의 연구결과를 도구화하고 응용하고자 하는 사람들에게 주어질 기회들이 무엇인가 하는 것이다.

2. 계산역학 : 사회적 이익

계산역학의 성공은 궁극적으로 사회적인 관심 문제를

해결하고 자연현상과 공학 체계에 대한 더욱 깊은 이해를 제공하는 효율성에 의해 판단될 것이다. 이 분야는 복잡한 물리 현상에 대한 모의실험과 공학 시스템 설계에서의 이러한 모의실험의 사용을 가능하게 하는 전례 없는 예지능력 때문에 지금까지 엄청난 성공을 이루어 왔다. 이것은 소위 컴퓨터 모델링을 통해 이루어졌다. 즉, 실제 시스템의 거동 방식을 추상적으로 추출하기 위한 디지털 표현의 제작 과정들과 디지털 계산에 적합한 역학이론들의 이산화 방법의 개발이다.

오늘날, 크게 성공한 국제적 기업은 해석 및 모의실험, 그리고 공산품과 시스템 설계를 위한 계산역학 소프트웨어를 판매한다. 그러한 기업의 수입은 수십억 달러지만 상품이나 서비스에 미치는 전체적인 효과는 수조 달러에 이른다. 또 시뮬레이션 소프트웨어는 의학용품, 군사용품, 교통, 그리고 실험이나 연구를 입증하고 보완하는 용도로 널리 사용되고 있다.

몇몇 계산역학 소프트웨어는 잘 알려져 있지만 나머지는 그렇지 못하다. 계산역학이 대단한 성공을 이룬 잘 알려진 한 분야는 자동차의 충돌 모의실험 시뮬레이션이다. 벽이나 장애물과의 자동차 충돌에 대한 컴퓨터 생성 시뮬레이션은 변형체 동역학에 대한 과학적 법칙들에 기초함으로써 수 백 번의 실험을 대체하여 왔고 주요 자동차 생산업체들에게 수백만 달러를 절약해 주었다. 더욱 중요한 것은, 컴퓨터 모델링과 시뮬레이션을 통해 발전된 안전장치들에 의해 수많은 생명들이 구제되었고 부상이 감소되었다는 것이다.

그림 1은 원통형 기둥에 사선으로 충돌하는 실물차량의

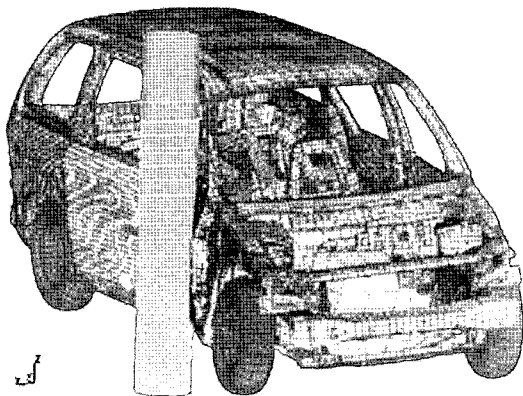


그림 1 원형기둥과 충돌하는 실물크기 자동차 모델의 경사진 충격에 대한 컴퓨터 생성 시뮬레이션. 이 시뮬레이션은 자동차의 손상을 모델링하고 차량의 다양한 구조적 설계를 위한 승객 안전에 관한 정보를 제공한다. 많은 상이한 설계변수들이 하나의 실험이 실시되기 전에 각각의 설계결정의 효과를 결정하기 위해 변화될 수 있다.

컴퓨터 생성 모의실험을 보이고 있다. 천분의 1초 안에 발생하는 전체 충돌 현상은 계산역학 시뮬레이션에서 상세하게 연구될 수 있으며 이에 의해 더 안전하고 신뢰성 있는 차량을 설계하는데, 유용한 변형, 가속도, 승객 모델에 가해지는 힘, 에너지 전달, 그리고 또 다른 현상들의 양상에 관한 정보를 제공한다.

개발 중에 있는 흥미로운 계산역학 응용분야는 수술 과정과 결과를 예측해 보는 것이다. 그림 2는 환자의 대동맥에 대한 컴퓨터 생성 영상을 보이고 있다. 생체 조직의 기하학적 형상과 속성은 MRI 영상과 다른 시험들로부터 추출되었고, 정맥과 동맥을 통한 혈액흐름의 모델을 만들어내는 컴퓨터 서버루틴에 그대로 적용 되었다. 이 예에서는 우회혈로 수술에서의 여러 대안들로부터 결과된 혈액 흐름이 계산되고 특정 환자를 위한 최선의 수술방법이 도출될 수 있도록 수술팀에게 제시된다. 많은 상이한 수술방법들이 모사될 수 있고 실제 수술에서의 한 단계가 실행되기 전에 계산역학 소프트웨어로 예측된 결과가 취해질 수 있다.

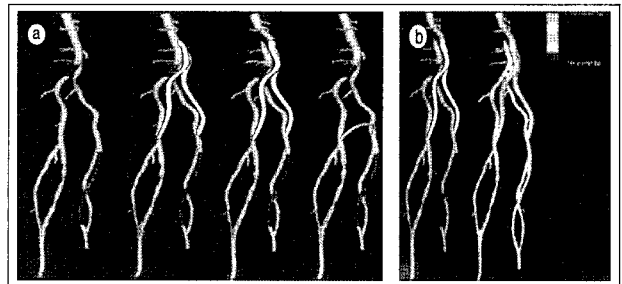


그림 2 (a) 동맥류를 포함한 인체의 대동맥, 병든 정맥과 동맥, 그늘진(어두운) 회색 형상, 그리고 영향영역 주변에서 건강한 혈액의 흐름을 위한 여러가지 대체혈관 수술절차. 혈액의 흐름은 유체역학과 유체-구조물 상호작용 원칙을 사용하여 각각의 수술절차에 대해 모델링 된다. (b) 환자 개인에게 가장 적합한 해결방법으로부터 얻어진 계산된 흐름 경로들과 혈액 흐름이 계산역학의 원리들에 의해 상세하게 선택되고 모델링 된다.

계산역학은 군사적 응용분야에서 오랫동안 사용되었다. 그림 3은 시뮬레이션에 의해 무기과 갑옷의 해석과 설계를 한 예이다. 그곳에서 우리는 수 백만분의 1초에 벌어지는 매우 복잡한 현상의 컴퓨터 생성 시뮬레이션을 볼 수 있다. 경사진 초고속 충돌이다. 재료의 위상변화, 절개수술, 쪼개짐, 유산탄의 분사, 열효과 그리고 흐름에 의한 위상변화 등을 포함하는 상호작용 역학현상 등 많은 연구들이 있어 왔다. 이들은 모두 이론응용역학(TAM)의 영역 내에 있으며 계산역학으로 모델링되었다.

계산역학의 적용은 제품이나 시스템의 공학적 설계에만

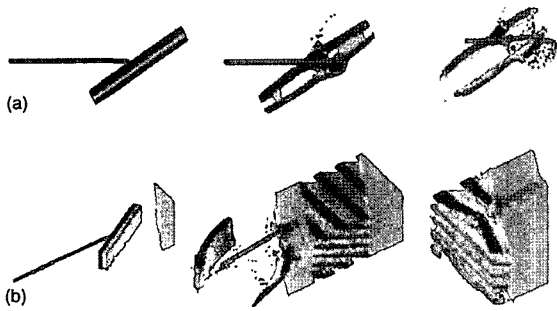


그림 3 (a) 군용 시스템의 설계에서 방탄판에 총돌, 관통하는 금속막대(관통체)에 대한 시뮬레이션 (b) 다수의 방탄판에 총돌하는 변형가능 관통체의 초고속 총돌 시뮬레이션. 이러한 계산은 방탄철갑의 구성에 대한 개선된 설계를 가능하게 한다.

국한되지 않는다. 많은 것들이 자연현상의 이해나 자연적 물리현상의 예측과 관련된다. 이 영역에서의 예들은 대기의 변화, 대양의 흐름, 강에서의 표면 흐름, 기름 저장고에서의 표면 밑 흐름, 또는 극지방 빙하나 지반 구조의 움직임과 진화와 같은 지질 현상 등에 관한 연구를 위한 계산역학의 사용을 포함한다. 하나의 시뮬레이션 예를 그림 4에서 볼 수 있다. 그림 4a는 유정 시설물을 평가하기 위해 설계된 시뮬레이션에 있어서 지형도와 기름저장고의 기층 및 기름, 물, 가스의 흐름에 대한 컴퓨터 생성 모델이다. 그림 4b는 다공성 매체의 오염물질 개선에 대한 시뮬레이션으로서 생물학적 및 화학적 핵종들의 흐름을 컴퓨터로 시각화한 것이다.



그림 4 (a) 컴퓨터로 구현된 기름 저장고의 3차원 지도와 복합 다공성 매체를 통한 기름, 가스, 물의 흐름. (b) 생화학적 반응이 뒤따르는 다공성 기층에서의 오염물질 분산 모델. 복잡한 구조 내의 상이한 색들에서 보여지는 다양한 핵종들의 집중화

이러한 일반적 영역에서의 계산역학 시뮬레이션의 또 다른 예를 그림 5a와 b에서 볼 수 있다. 여기서 우리는 초신성, 별의 폭발, 그리고 지구로부터의 10억 광년 거리를 발견한다. 유체역학과 가스 동역학, 열역학의 원칙들이 지구 대기권 밖 현상의 계산 모델 구축에 사용되었고, 팔목 할만한 시뮬레이션들이 초신성의 구조와 진화, 시스템의 질량, 파편의 속도, 그리고 그 현상의 유발 메커니즘을 제시하는 다른 자료들에 관한 새로운 정보를 제공한다.

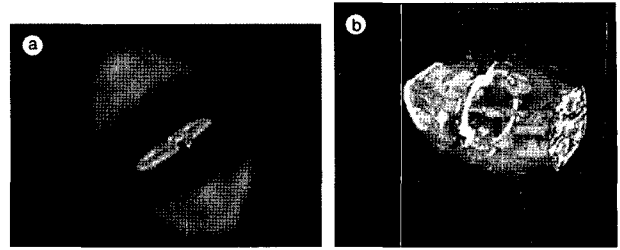


그림 5 (a) 가스동역학과 다중 위상의 압축성 매체에 관한 이론들이 먼 거리에 있는 별의 폭발을 모델링 하는데 사용된다. 색상은 질량밀도와 온도의 변화를 나타낸다. (b) 자세히 들여다 본 초신성의 진화

3. 계산역학의 신뢰도

컴퓨터로 재현된 예측의 신뢰도가 계산역학 전문가들에게 있어서의 가장 큰 관심거리 중 하나이다. 시뮬레이션의 정확성에 대한 적절한 확신이 없다면 시뮬레이션의 가치는 명백히 저하된다. 오늘날, 많은 응용분야에서 주목할 만하게 정확하고 신뢰성 있는 시뮬레이션들이 만들어지고 있는가 하면 어떤 것들은 잘 해야 단지 물리적 현상의 경향을 묘사하는 정도이거나 정성적 수준에 머문다.

신뢰도에 대한 이러한 염려는 확인(validation)과 검증(verification)이라 불리는 도전적인 기술적 영역의 창출로 이어졌다. 즉, 계산역학에 기초한 기법과 프로그램의 예측 가능성을 평가하는 도구의 창출과 연구 및 문서화다. 확인은 시뮬레이션 도구를 개발하는데 사용된 과학적 원리들과 수학의 타당성을 판정하는 것과 관련된다. 검증은 최종 도구가 의도한대로 기능하는지 여부와 검증 도구가 기초한 모델과 일치하는 결과를 정확히 산출할 수 있는지 여부를 판정하는 것과 관련된다.

확인 방법론은, 가능할 경우, 계산역학에 의한 예측의 결과와 관찰 및 물리적 시험 및 경험 사이의 실제 비교를 포함한다. 그렇게 함에도 불구하고 이러한 비교들은 단지 제한된 범위의 매개변수들에 대해서만 만들어질 수 있고, 일반적인 계산 모델링 방법에 의해 포용될 수 있는 가능성들의 전 영역을 포함하지 못한다. 최근의 확인 방법론들은 다양한 모델링 기법들의 한계를 정의하기 위해 노력하고 있고, 이상적으로는, 이러한 한계들이 도달되고 극복될 수 있는 시점에 대한 식견을 제공하고자 노력하고 있다.

검증의 방법론들은 숙련된 전문가가 수년간의 작업 끝에 개발한 벤치마크 시험 도구의 사용이나 프로그램 작성 오류를 최소화 하고 계산능력과 프로그램 설계를 최적화하기 위한 소프트웨어 공학이론의 수행을 포함한다.

과학과 공학의 많은 분야에 걸쳐서 계산역학의 사용이

급속히 확장함에 따라 “V and V”가 오늘날의 계산역학 연구에서 필수불가결의 결정적 요소가 되었다. 새로운 V and V 도구들은 세련된 계산 모델링의 신뢰도를 극적으로 증가시킬 수 있는 시야에 올라 있다. 이 논문의 뒤 쪽에서 몇 가지 도구들이 논의된다.

4. 계산역학 : 향후 10년과 다음 천년

실질적으로 우리의 생활은 거의 모든 면에서 계산역학에 의해 영향을 받고 있다고 자신 있게 말할 수 있다. 지금도 이 분야는 빠르게 발전, 변화하고 있고, 새로운 쟁점들이 남겨져 있다.

앞으로 10년 동안, 계산역학 분야는 오늘날의 계산역학 분야가 갖고 있지 못한 능력을 요구하는 극적인 변화를 겪을 것이다. 중요성과 활동 면에서 불과 수년 전에조차 상상할 수 없었던 전례 없는 성장이 기대된다. 또한, 산업사회의 요구와 맞물린다면 다음 세기에는 계산과학에서의 패러다임의 변화는 필수적이다.

앞으로의 10년 동안 계산역학 분야의 괄목할 만한 국면은 영상화, 다양한 단층촬영 물리요법, 가시화, 시험, 실험실 실험 등의 지원기술들이 다양해지면서 계산법 및 장치들의 새로운 상호작용을 요구하게 될 수도 있다. 새로운 계산역학에서는 “역학”이 양자역학, 분자역학, 재료과학, 생물의학, 생체시스템 등의 학문분야와 상호적으로 작용하게 될 것이다. 수조 분의 일초에 일어나는 미시적 현상의 연구도 포함할 것이다. 공학적 재료 뿐 아니라, 생물학적 시스템과 초미세 장치, 그리고 로봇을 연구하기 위해 수많은 기술적 도구들이 역학 해석으로 통합될 필요가 있다. 이러한 광범위한 적용은 예측능력과 우리의 생활 형태, 개인의 건강 그리고 장수에 영향을 미칠 것이다.

5. 자원 : 컴퓨터과학과 계산과학

일반적으로 컴퓨터과학(computer science)과 계산과학(computational science)의 미세한 차이점들은 인식되고 있지 않다. 그러나 명백한 차이가 기초연구를 위한 자원 분배에 중대한 영향을 끼쳐 왔다. 컴퓨터과학은 계산이 실행되는 계산 장치인 컴퓨터와 관련된 과학과 기술을 의미한다. 반면 계산과학은 과학과 공학에 있어서의 모델링 기술, 알고리즘, 소프트웨어, 그리고 그와 연관된 특정 문제들과 관련된다. 훌륭한 계산과학이 수행되는 필수 도구로서 컴퓨터과학은 투자를 촉진하는 경향이 있다. 그러나 필적할 만한 전통적 자금 지원이, 중요한 응용을 수행하는데

필수적으로 중요한 계산과학에는 지원된 적이 없었다. 좋은 예가 PITAC (President’s Information Technology Advisory Committee (in the United States))이다. 계산과학자들에 대비되는 사람들로서의 컴퓨터과학자들이 대다수를 이루는 이 위원회는 순수 컴퓨터 과학, 네트워킹, 하드웨어와 같은 “정보과학”의 새로운 연구에 10억 달러가 넘는 돈을 투자하도록 권고하였다. 하지만 이 프로그램의 가치를 미국의회에 설명하는데 있어서는 계산과학에의 투자 부분에 의한 막대한 이득만 강조되었다. 그러나 계산과학에는 자금이 거의 할당되지 않았다. 비슷한 상황은 유럽이나 아시아에도 존재한다.

산업계의 필요에 맞추기 위해서는 계산과학에 대한, 특히 계산역학에 대한 새로운 집중적 관심이 필요하다. 그러나 인상적인 투자가 이 분야에서 전혀 없었다고 말하는 것은 아니다. 사실, 계산모델링 분야에서 기치를 올릴 야심찬 프로그램들이 진행 중이다. 고도로 동조화 시킨 컴퓨터 모의실험으로 전통적인 핵실험과 저장 방법을 대체하는 것을 목표로 하는 ASCI(Accelerated Scientific Computation Initiative) 프로그램도 그 한 예이다. ASCI의 많은 목표들이 달성되느냐 여부는 확인되어야 할 것으로 남아 있다. 그러나 이 프로그램은 의심할 바 없이 계산역학과 연관 과학에서의 중요한 진보를 창출할 것이다. 이러한 프로그램들은 계산과학을 지원하는 모든 분야의 확대와 일반화를 촉진하며 의미 있는 시뮬레이션을 만드는 지원기술들을 발전시키는 고유적 특성을 갖는다.

이 논문의 나머지는 계산역학 분야에서 중요한 연구 기회들이 있는 몇 개의 영역들을 개략적으로 요약한다.

- 가상설계
- 분자, 원자, 연속체 모델들의 연계를 포함하는 다중 스케일 현상
- 모델 선택과 적응성(adaptivity)
- 거대규모 병렬계산
- 생물의학에의 응용 : 결과를 예측하는 수술과 세포, 뼈, 신경 등 생체 연구에 대한 역학의 응용
- 불확실성의 조정 : 확률론적 방법

6. 다중 스케일 현상

실험 과학의 전통적인 방법들에 대한 컴퓨터 시뮬레이션의 큰 강점 중 하나는 모든 가능한 공간적, 시간적 척도들을 사용하여 모든 범위의 물리 현상에 대한 연구에 이것을 적용할 수 있다는 점이다. 단지 10-9초의 시간이 걸리

는 사건들의 발생 속도를 늦추고 어느 정도 자세하게 이들을 연구하거나 과거 몇 만 년 혹은 몇 십만 년 전에 발생하기 시작한 사건들의 전개 과정을 살피거나 또는 사건들이 앞으로 어떻게 전개될 것인가를 추정하고 몇 천 년 후에 있어서 이들의 구조적 효과와 특성을 예측하는 것 등은 원칙적으로 컴퓨터 시뮬레이션으로 모두 가능하다. 이에 대응하여 전자와 양성자의 전위와 같은 원자적 수준에서 발생하는 공간적 척도들을 지니는 역학적 사건들에 대한 연구, 초미세 장치에 대한 분석, 난류와 같이 다른 많은 척도들의 상호작용을 내포하는 사건들에 대한 연구 그리고 태양계, 은하계와 거대 규모의 시스템 거동에 대한 특성 파악 연구 등은 또한 미래에 계산역학의 활동 범위에 속한다.

계산역학이 미래에 갖게 될 주요한 난제는 현저하게 다양한 척도들이 단일 체계 또는 현상에서 핵심이 되는 사건들을 모델링하는 것이다. 그리고 다중 스케일의 현상들을 예측할 수 있도록 이들을 동시에 모델링하는 것이 필요하다. 다중 스케일 현상의 해석은 비록 분명히 현재의 능력 너머에 있지만 앞으로 10년 이상 동안 연구의 가장 근본적인 난제들 중의 하나일 것이다. 역학 현상들에 대한 신중한 특성 파악이 모델에 대해 둘 이상의 척도에서 발생한 사건들의 표현을 연결시킬 것을 요구하는 소위 “척도연결(scale bridging)”은 다양한 새로운 기술과 방법의 발전을 요구한다. 이 분야에서는 계산적인 방법들과 경험적 또는 탐지적 장비들을 갖춘 기기들 사이의 통합이 중요하다. 적합성이 높은 시뮬레이션과 계산 역학에는 X-ray 단층촬영, 전자 현미경, 음파 형상화 그리고 다른 많은 것들의 혁신적이고 효율적인 사용이 수반되어야 한다. 마찬가지로 의미 있는 예측들의 획득을 위해서는 기후 변화, 날씨 상태 그리고 바다와 대기의 상호작용과 같은 현상들을 모델링함에 있어서 인공위성이 내놓는 자료들을 뚜렷한 모델들 안으로 이음새 없이 통합하여야 한다. 계산역학은 이러한 기술들의 사용을 포함하기 위하여 증대하게 확장되어야 한다. 그리고 이 주제의 본질적인 상이분야 제휴의 속성은 확장되고 강화될 것이다.

7. 모델 선택과 적응성(adaptivity)

모든 수학과 컴퓨터 과학에 있어서 컴퓨터 모델링의 최초의 그리고 가장 근본적인 절차는 수학적이고 컴퓨터적인 모델 그 자체의 선택이다. 모델 선택은 모델링 작업자의 판단과 경험 그리고 시험과 실험에 기반을 두고 행해지는 매우 발견적인 과정이다. 하지만 이것은 종종 전적으로 주관적인 시도이다. 다른 분석가는 동일한 물리 현상을 기

술하기 위해 다른 모델을 선택할 수도 있다. 우리가 보통 편미분, 적분 혹은 상미분 방정식, 알고리즘, 물리적이고 기하학적이고 위상적인 특성들 그리고 경계 조건과 초기 조건 등의 선택을 의미하는 모델의 선택은 물리 현상에 대한 적절한 컴퓨터 시뮬레이션을 획득함에 있어 아주 종종 단일하며 가장 중요한 절차이다.

최근에 모델 선택을 돕는 이론적이고 컴퓨터적인 기법들의 선택에 있어 상당한 발전이 이루어졌고 다양한 기법들이 연구 중이다. 이들 중 일부는 주어진 모델들을 물리적 체계의 거동에 대하여 보다 미세하고 상세하게 표현할 수 있는 더 정교한 모델들의 더 큰 부류에 끼워 넣는 것을 포함한다. 일단 그러한 자료가 확인되면 모델링 오차에 대한 인지는 다양한 수단에 의해 정확하게 이루어질 수 있고, 그러한 모델링 오차는 적응모델링(adaptive modeling) 과정을 통해 제어될 수 있다. 적응모델링이 큰 효과를 주는 분야는 복잡계, 불안정 난류와 유체의 다상 흐름 등에 대한 연구와 특성 파악의 분야이다. 모델 적응화를 위한 다른 기법들은 시험과 영상 데이터의 사용과 통합, 실험과 측정으로부터의 피드백 그리고 이러한 방법들의 다양한 조합 등을 포함한다.

모델 선택은 공학적 해석의 자동화에 있어 결정적인 요소이고 그 응용은 제한되지 않는다. 이것은 연속체 모델에 대해 원자 또는 분자적 모델을 사용하여 모델링된 사건에 대해 체계적이고 통제된 시뮬레이션을 가능케 하는 등 다양한 공간 척도와 시간 척도를 갖는 모델들을 상상할 수 있는 만큼 포함할 수 있다. 모델 선택, 모델 오차 추정 그리고 모델 적응성은 계산역학의 흥미로운 분야들이고 향후 10년 이상 동안 활발하게 연구될 것으로 예상된다.

8. 불확정성 취급: 확률론적 방법들

물리 현상들이 갖는 많은 특징들의 임의적인 속성은 산업체와 연구자들에게 널리 알려져 있다. 물리 체계들을 작동시키는 자연적인 자극들이 결정론적 모델들에 의해 완벽하게 예측될 수는 없다: 돌풍의 임의성, 역학 체계의 경계 조건과 초기 조건에서의 힘들에 대한 특성 파악, 공학 재료의 임의적인 미세 구조 특징들 그리고 온도, 습도와 다른 환경 변수들의 임의적인 변동들 때문에 결정론적 역학 모델에 의해 제시되는 특성 파악이 그들의 예측 가능성 측면에서 덜 만족스럽게 된다.

다행히도 불확정성을 갖는 모든 주제는 수학적으로 정확하고 과학적인 방식으로 표현될 수 있고 자연의 임의적인 특성들은 컴퓨터 모델들로 표현될 수 있다.

향후 10년 동안 역학 문제들에 대한 확률적 모델링은 큰 중요성과 흥미가 있는 주제가 될 것이다. 확률적 특징들을 컴퓨터 모델에 포함시킴으로써 물리적 사건들의 실제적인 시뮬레이션들이 가능할 뿐 아니라 분석가는 예측들의 원인일 수 있는 확률에 대한 특정 정보를 제공받을 것이다. 따라서 분석가는 예를 들어 확률적인 역학 모델들을 사용하여 자료들의 불확정성 측면에서 예측할 수 있는 관심 있는 양에 대한 상한계와 하한계를 결정하기 보다는 오히려 설계 중인 기계의 특정 부위에서 최대 응력이 얼마가 될 것인가를 결정할 수 있다. 특히 분석되고 설계되는 하위 체계의 파괴 확률이 얼마일까? 불확정성을 다루는 새로운 방법들은 사실상 거의 모든 역학 분야들에서 중요해질 것이다: 유체역학, 재료역학, 고체역학 등은 공학 체계에서의 불확정성을 분석하는 새로운 계산 기법들의 발달을 또한 증진시킬 것이다.

9. 오차 추정과 적응성(adaptivity)

컴퓨터 시뮬레이션에서의 수치 오차에 대한 계산적 추정은 새로운 것이 아니다. 이 주제에 대한 진지한 작업은 1980년대에 시작되었고 현재 후 오차 추정(posteriori error estimation)은 대학 연구 환경에서 흔한 주제이다. 오차 추정에서 수치 시뮬레이션들의 질을 결정하기 위한 양적인 수단이 제공된다. 결과의 질을 향상시키기 위해 오차 추정은 이산 모델의 특징들 (예를 들어 요소망이나 근사 차수)을 적합하게 해주는 토대를 제공해 준다.

대부분의 후 추정(posteriori estimation)은 선형이론으로부터 크게 이끌어졌는데 상당히 좁은 부류의 문제들에 한정되어 왔고 산업체 연구소나 정부 연구소에서 사용되는 보다 복잡한 컴퓨터 시뮬레이션에는 충분히 활용되지 않았다.

후 오차 추정과 부합성 문제가 향후 10년 동안 계산역학에서의 모든 중요한 컴퓨터 시뮬레이션들에서 공통된 구성요소가 될 것으로 예상된다. 시뮬레이션의 신뢰성에 대한 새삼스럽고 활발한 관심으로 인해 시뮬레이션에서의 오차 추정 계산은 관심 있는 물리적 양에 대한 어떤 다른 추정만큼이나 시뮬레이션의 자연스런 한 특징이 될 것이다. 이 분야에서의 중요한 발전은 국부적 근사 오차의 상한치와 하한치를 결정하는 방법들에 대한 최근의 발견이고 그 결과로 일단 어떤 주어진 시뮬레이션에서 특정 모델이 선택되면 계산된 관심 있는 양들의 상한치와 하한치를 내주는 계산 가능한 경계들이 모든 시뮬레이션에서 자연스런 부산물로 나올 수 있다. 오차 추정 계산은 연구 항목

들이 많은 분야로서 향후 10년 동안 중대한 연구가 행해질 것이다.

10. 거대규모 병렬계산

향후 10년 동안 계산역학에서 연구자들이 부딪힐 가장 어려운 주제 중 하나는 순진히 개념적인 것이다. 이것은 이 기간 동안 발전될 엄청난 계산 도구들을 연구자들이 효율적으로 사용할 수 있도록 해주는 교육, 접근과 인식의 재조정이다. 오늘날, 공학적 해석과 설계를 위한 계산 도구들을 사용하는 기계 기사들은 500,000~10,000,000개의 자유도를 갖는 컴퓨터 모델들을 기계적인 순서에 따라 구성할 수 있다. 오늘날 이만한 크기의 문제들은 최신의 워크스테이션으로 풀리고 있다. 그럼에도 불구하고 이 최신의 모델들은 재료, 기하, 경계 조건, 파괴 기준과 다른 많은 중요한 특징들을 오히려 불완전하게 특성화하고 모델링하고 있다. 이는 이러한 상세들이 현대적 계산 도구들의 능력을 초과할 만큼 크고 복잡한 계산문제를 야기할 것이라고 당연히 생각되어지고 있다는 데에 이유를 두고 있다.

이 주장은 더 이상 정확하지 않다. 21세기의 시작과 더불어 초 당 5조 번의 연산을 수행하고 1000조 바이트의 데이터를 저장하는 계산 장치들이 사용되고 더 큰 기계들이 개발되고 있다. 10년 내에 이 수준보다 10배의 능력을 갖는 기계들이 이용 가능할 수도 있다. 그러한 조 단위의 계산 능력을 갖는 도구가 곧 대다수의 공학자와 기계 기사들의 수중에 놓일 것이고 그리하여 단지 10년 전에는 결코 상상할 수 없었던 수준으로 상세하고 복잡한 모델들의 구성이 가능하리라 예상된다.

이 대단한 툴킷의 적절한 사용은 그 자체로 상당한 난제가 될 것이다. 역학 원리들뿐 아니라 계산 도구들의 사용 또한 숙달할 것이 요구되는 다음 세대 공학자들과 기계 기사들에 대한 교육이 이 난제에 포함된다.

모델링과 병렬 계산에서의 이 새로운 역량과 발전은 궁극적으로 과학과 공학 교육에 주목할 만하고 돌이킬 수 없는 영향력을 행사할 것이다. 단순화된 모델과 근사 이론은 이해를 향상시키는 데에는 여전히 중요하지만 학생들이 더 이상 단지 이상화된 상황들을 연습해 익힐 필요는 없다: 이제 그들은 더 실제적인 모델들에 뛰어 들 수 있다. 이 논문의 다른 곳에서 언급된 소프트웨어 발전과 함께 하는 고속의 병렬 계산은 공학적 분석과 궁극적으로는 대학 교육에서 이것이 교육되는 방식에 혁명을 불러올 것이다. 10년 전만 해도 많은 이들이 현대적 계산 방법들과 기계들을 사용하는 것은 상식과 판단 그리고 추론을 대가로 하여 공

학자들에게 과신을 줄 것이라고 걱정하였다. 이제는 현대적 계산 방법들과 도구들이 갖는 역량에 대하여 과소평가하거나 중요한 시뮬레이션, 분석과 설계에 이들을 덜 활용하는 것이 새로운 우려가 되었다.

11. 계산역학 : 결론

계산역학은 현대 과학과 기술에 있어 더 큰 이해와 발전을 가져 온 중추적인 권능 부여 분야가 되었다. 이것은 최근의 수많은 중요한 발전들의 기초가 되어 왔고 계속해서 산업 발전과 경쟁력, 안전과 방위 그리고 자연과 사회에서 발생하는 다양한 물리적 생물학적 체계의 이해에 결정적인 역할을 할 것이다. 계산역학의 많은 연구 문제들이 해결을 기다리고 있고 미래의 연구에 상당한 난제들을 제시할 것이다. "과거가 서막"이라면 지식의 발전과 지구촌의 이익에 계산역학이 미래에 훨씬 더 큰 공헌을 할 것이라 기대해도 좋다.

감사의 글

이 글은 미 국립이론응용수학 위원회(US National Committee for Theoretical and Applied Mathematics)에 속한 한 상설 분과위원회인 역학의 연구 방향에 관한 분과위원회(the Subcommittee on Research Directions

in Mechanics: SCORDIM)가 작성한 일련의 글들 중 하나이다. 이 연속 간행물의 이전 간행물들은 다음과 같다.

1. J.T. Oden (Ed.), Research Directions in Computational Mechanics, National Research Council, National Academy Press, Washington, DC, 1991.
2. J.L. Lumley, A. Acrivos, L.G. Leal, S. Leibovich, (Eds.), Research Trends in Fluid Dynamics, American Institute of Physics, Woodbury, New York, 1996.
3. G. Dvorak (Ed.), Research Directions in Solid Mechanics, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1999.

삽화를 제공해준 다음 분들께 감사를 표한다.

- Fig. 1 : Ford Motor Company.
- Fig. 2a and b : Professor Charles Taylor, Department of Mechanical Engineering, Stanford University.
- Fig. 3a and b : Dr. David Littlefield, IAT, The University of Texas.
- Fig. 4a and b : Professors Chandrajit Bajaj and Mary F. Wheeler, TICAM, The University of Texas.
- Fig. 5a and b : Professors Chandrajit Bajaj TICAM, and Paul Shapiro, Department of Astronomy, The University of Texas. 