



# THEME 04

## 유한요소 해석기술의 발전과 전망

조진래 | (주)마이다스아이티 기술연구소, 부소장 | e-mail : jrcho@midasit.com

CAE를 위해 필수적인 유한요소해석은 그 적용분야가 급속도로 확대되고 있을 뿐더러 해석기술 또한 하루가 다르게 발전하고 있다. 이러한 시점에서 유한요소해석 소프트웨어(software)의 전반적인 현황을 분석하고 향후 발전 전망에 대하여 기술하였다.

### 소프트웨어의 신뢰성과 효율성

직접 손으로 풀 수 있는 수준의 단순한 트러스 구조물의 행렬 근사화에 근간을 두고 있는 유한요소 해석 기술은, 반세기가 넘는 긴 세월을 지나면서 지금과 같이 공학과 자연과학 전 분야에 있어 중추적인 수치해석 기술로 발전하게 되었다. 이러한 발전은 컴퓨터 성능의 급신장과 유한요소 해석기술에 대한 꾸준한 노력이 뒷받침 되지 않고서는 불가능하였을 것이다. 유한요소 해석기술이 공학과 산업분야에 본격적으로 적용되면서 가장 크게 대두되었던 사안은 해석결과의 신뢰성 문제였으며, 이로 인해 산업분야에서 많은 경우 퍼스트가 아닌 세컨드 톨로서 인식되어 왔다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 벤치마크 테스트(benchmark test)를 통한 소프트웨어(software)의 검증작업, 해석결과에 대한 오차평가(error estimation)와 요소망 세밀화(mesh refinement) 기능 등을 소프트웨어에 탑재하게 되었다. 1983년 영국에서 탄생한 NAFEMS(National Agency for Finite Element Methods and Standards)는 유한요소해석에 관한 제반 정보와 기술을 제공하는 비영리 기관으로서 벤치마크 테스트를 위한 예제와 표준을 제공하고 있다. 한편, 요소망 세밀화는 소프트웨어에서 제공하는 오차정보에 따라 해석자가 직접 수행하고 있으며, 1990년대 후반에 활발히 연구되었던 자동 오차평가-요소망 세밀화(일명, adaptive hp-FEM으로도 불림)는 극히 일부 전문 유한요소 해석 소프트웨어

에만 탑재되어 있는 실정이다.

하지만 지금까지 신뢰성이라고 하면 유한요소 해석 모델을 얼마나 정확하게 계산하느냐 하는 수치해석의 정확도(numerical analysis accuracy)에만 국한되었다고 하여도 과언은 아니다. 하지만, 유한요소해석의 궁극적인 목표는 당연하고 있는 현상 그 자체에 근접한 해석결과를 도출하는 것이기 때문에, 신뢰성 역시 이러한 목표에 부합되도록 평가되어야 한다. 이러한 취

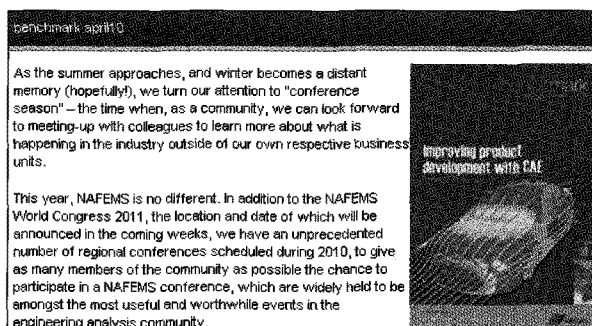


그림 1 NAFEMS에서 출간하는 benchmark에 대한 월간지

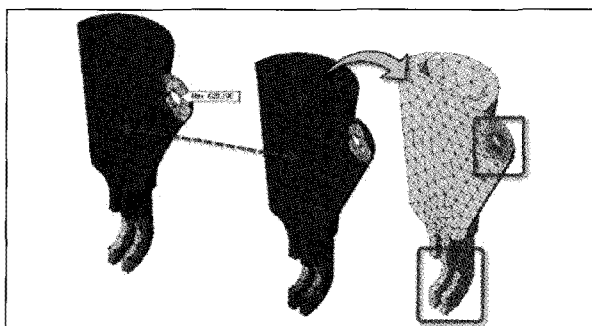


그림 2 해석자에 의한 국부적인 요소망 세밀화

지에서 2000년도 후반부터 verification & validation이 란 주제가 대두되었으며 validation은 해석결과의 유효성을 판단하는 것으로서, 해석자가 설정한 유한요소 해석모델이 목표로 하는 현상을 제대로 재현하는가에 초점을 두고 있다. 다시 말해, 하나의 유한요소 해석결과에는 대상 문제를 유한요소 모델로 표현하는 과정에서 필연적으로 수반되는 모델링 오차와 이 모델을 푸는 단계에서 수치해석 오차가 필연적으로 포함되어 있다. 해석모델의 적합성을 평가하고 최적의 해석모델을 생성하기 위한 기술이 바로 adaptive modeling으로서, 현재 전 세계적으로 활발히 연구되고 있는 멀티스케일 시뮬레이션(multiscale simulation) 기술을 탄생시켰다. 하지만 이러한 모델링 단계의 적합성을 판단하고 최적의 해석모델을 제공하는 기능은 아직 범용 소프트웨어에는 탑재되어 있지 않고 일부 특수 소프트웨어로 시판되고 있지만, Nano 그리고 Bio 산업의 발전과 더불어 향후 발전 가능성이 높은 기술 중의 하나이다.

유한요소 해석에 있어 효율성은 주로 계산에 소요되는 CPU 시간을 의미하며, 효율성은 크게 하드웨어와 수치연산 알고리즘 측면에서 향상되어 왔다. 병렬연산(parallel computing)의 경우, 상용 소프트웨어에서는 슈퍼컴이나 개인용 multi-core PC를 대상으로 한 집적 병렬연산 방식을 채용하고 있다. 그리고 시판되고 있는 거의 대부분의 상용 유한요소 해석 소프트웨어는 병렬연산 기능을 제공하고 있다. 수치연산 알고리즘 측면에서는 멀티 프론탈(multi-frontal) 행렬연산, 명시적(explicit) 시간 적분, MLS(Multi-Level Substructuring) 고유치 연산, 그리고 동해석 및 비선형 해석에 있어 반복계산 회수를 최소화시키기 위한 adaptive time stepping(혹은 adaptive increment) 기법들이 개발되어 상용 소프트웨어에 탑재되어 있다.

### 소프트웨어의 사용자 편의성

지금까지의 유한요소해석 소프트웨어 발전이 신뢰성과 효율성 향상에 집중되었다면, 최근에는 사용자의 편의성 향상에 관심이 집중되고 있다. 이러한 추세는 CAE의 저변확대에 따른 비전공 해석자의 증가와 복잡하고 난해한 해석작업을 기피하고자 하는 인간 본연의 욕구에 기인한다. 따라서 이러한 편의성 추구는 지속적으로 증가될 것으로 예상되며, 이러한 요구를 충족시키기 위한 다양한 기능들이 추가되고 있다. 대표적인 예로 해석작업을 쉽게 그리고 편리하게 처리할 수 있는 전후처리(pre-/post-) GUI환경, 특정 전문 해석작업을 지원하기 위한 해석 위저드(wizard) 및 커스터마이징(customizing), 보고서 작성 기능을 들 수 있다.

또한, 다양한 유형의 CAE 소프트웨어의 등장으로 서로 다른 CAD 및 FEM 소프트웨어 사이의 원활한 인터페이스 기능이 필수요건으로 대두되고 있다. Altair사에서 시판하고 있는 hypermesh가 그 대표적인 예로 호환성이 낮은 소프트웨어 사이의 인터페이스를 위하여 현재 널리 사용되고 있다. 벨기에에 본사를 두고 있는 LMS International사의 Virtual Lab과 같은 경우에는 하나의 플랫폼에서 여러 유형의 FEM 소프트웨어를 구

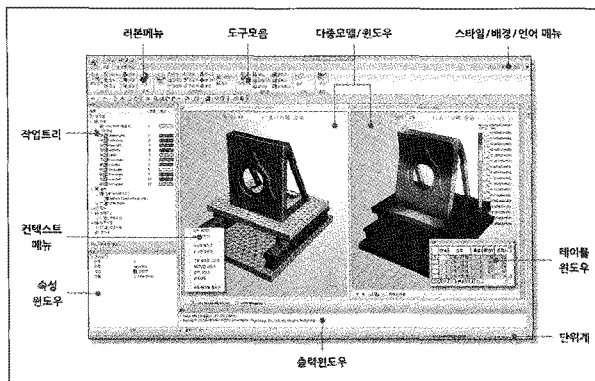


그림 3 사용자 편의성과 설계기능이 강조된 midas-NFX

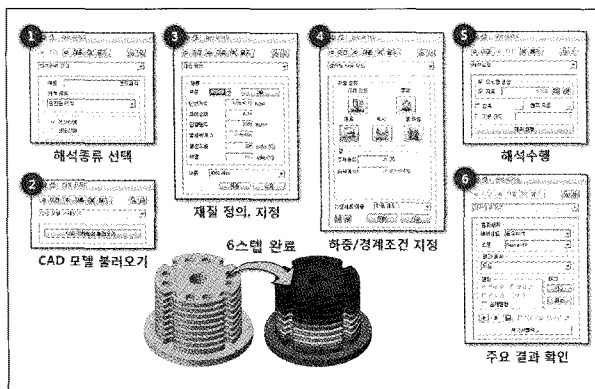


그림 4 반복 해석작업의 편의성을 위한 위저드

현할 수 있도록 하고 있다. 또 다른 발전 추세는 모델링, 해석 및 설계기능을 통합한 통합 CAD/Solver/Design 소프트웨어의 개발로서, CAD 모델링에서부터 최종 설계 도면작업을 하나의 소프트웨어 환경 속에서 처리함으로써 업무의 편의성과 효율성 극대화를 추구하고 있다.

하지만 사용자 편의성 추구를 위해서는 소프트웨어의 기능적인 측면도 중요하지만 보다 필수적인 요구조건은 공학기술과 CAE기술의 보급이라 할 수 있다. 적절한 표현인지는 모르겠지만, 소프트웨어를 오류없이 구동할 수 있다는 것과 원하는 해석결과를 도출하는 것은 전혀 다른 이야기이다. 소프트웨어가 사용자 편의 위주로 발전할수록 해석자와 설계자에 대한 공학 및 CAE기술의 보급은 앞서 언급한 세컨드가 아닌 퍼스트 툴이 되기 위한 전제조건이라 할 수 있다. 물론 각 소프트웨어 공급업체마다 사용자를 위한 다양한 기술 보급 프로그램을 제공하고는 있지만, 소프트웨어의 발전과 더불어 신 개념의 기술보급 시스템의 구축이 필수적일 것으로 전망된다.

### 유한요소 해석기술의 발전

지금까지는 해석결과에 신뢰성, 효율성 및 사용자 편의성 측면에서 유한요소해석 소프트웨어의 현황을 살펴보았다. 유한요소 해석기술에 대한 현황과 전망은 그 내용이 방대하기 때문에 개략적인 분석으로 한정하고자 한다. 유한요소 해석기술의 변천사를 획일적으로 구분하기는 어렵지만 1980년대 말을 기점으로 신뢰성에 대한 집중적인 연구가 시작되었으며, 1990년 중반에 접어들어 연계해석(coupled analysis), 병렬연산, 무요소기법, adaptive FEA에 대한 연구가 본격화 되었다. 현재 시판되고 있는 상용 소프트웨어에 탑재되어 있는 잠김현상(locking phenomenon)과 같은 문제를 해결하기 위한 MIT와 같은 특이요소, B-bar와 같은 기법에 따라 개발된 각종 enhanced element와 stabilization 기법 그리고 오차계산, 요소망 세분화, 병렬연산, 연계해석(coupled analysis)과 같은 기능들은 이러한 연구결과

의 산물들이다. 이들 중에서 무요소기법은 번잡하고 시간이 오래 소요되는 요소망 생성작업을 대체할 수 있는 새로운 패러다임으로 각광을 받았지만, 실제로는 3차원 문제로의 확대, 행렬계산과 경계조건 처리의 어려움에 봉착하게 되었다. 따라서, 무요소법은 유한요소법을 대체시킬 수 있는 소프트웨어로 발전하기보다는, 기존 유한요소법과 혼용하여 균열선단(crack tip)과 같은 고 특이성 영역에 국부적으로 적용되는 방식으로 발전할 가능성이 높다. 현재 X-FEM 혹은 G-FEM이라 불리는 해석기법은 다른 아닌 무요소기법의 개념을 유한요소법에 도입한 것으로서, 각종 구속조건 처리를 위해 요소망 내 기저함수를 편리한 형태로 변형시키는 기술이다.

연계해석기법은 크게 집적법(monolithic method)과 시차제법(staggered method)으로 대별할 수 있다. 전자는 여러 물리현상에 대한 수치 근사화를 하나의 행렬방정식으로 구성하여 푸는 반면, 후자는 각 물리현

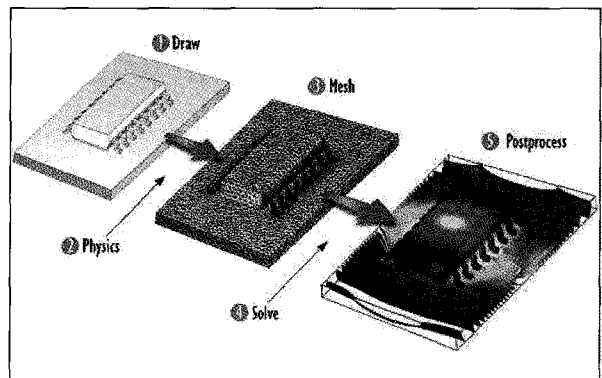


그림 5 다중 물리현상 재현을 위한 multiphysics

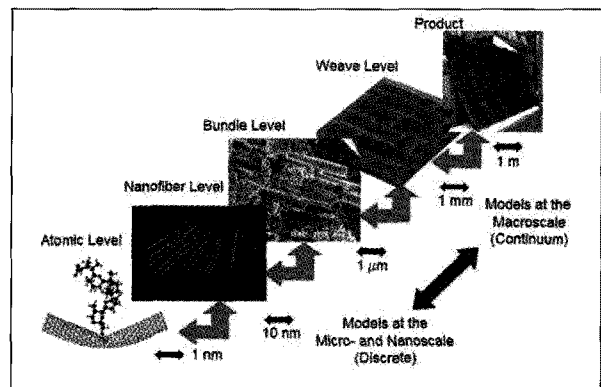


그림 6 Multiscale 시뮬레이션을 활용한 제품설계

상에 대한 분리된 행렬방정식을 지그재그 방식으로 연계시켜 풀게 된다. 유한요소해석 소프트웨어는 솔버라 불리는 처리기를 점진적으로 추가하는 방식으로 개발되어 왔기 때문에, 현재 사용되고 있는 거의 대부분의 연계해석은 이 방식을 채용하고 있다. 현재 시판되고 있는 상용 소프트웨어의 연계기능은 유체-구조, 열-구조, 유체-열-구조, 전자기-구조와 같이 연계범위가 좁지만, 향후 하나의 해석문제에 내포되어 있는 모든 물리현상을 모두 반영시키는 것을 목표로 하는 다중 물리해석(multiphysics)으로 발전할 것으로 본다. 한편, multiscale 시뮬레이션이라 불리는 기법은 1990대 후반에 소개된 hierarchical 혹은 adaptive 모델링에 근간을 두고 있으며, 지금까지 연속체역학에 한정되어 있는 유한요소법의 범위를 Nano 수준으로의 확장과 적합한 수준의 해석 모델을 선정하는 것을 목표로 하고 있다. Multiscale과 multiphysics는 세계적인 산업구조의 변천과 더불어 급

속도로 발전할 것으로 예상되며, 현재 특수한 소프트웨어에만 한정되어 있지만 가까운 미래에 범용 소프트웨어의 필수적인 모듈로 등장할 것으로 본다.

기존의 Lagange 혹은 hierarchical 기반의 기저함수를 이용한 유한요소법의 한계(형상 모델링 및 요소망 세분화)를 극복하기 위한 방안으로 B-spline이나 NUBR 곡면을 이용한 iso-geometric FEM의 등장도 주목의 대상이 된다. 건축, 조선, 항공뿐만 아니라 미적인 감각에 대한 인간의 끝없는 욕구를 충족시키기 위해, 향후 제품 디자인은 보다 유연한 곡면이 대세를 이룰 것이다. 따라서, 해석모델의 곡면 유연성을 CAD모델 수준으로 끌어올려야 함은 당연한 요구조건이 될 것이다. 유한요소해석 소프트웨어가 이러한 수준에 이르렀을 때, CAD와 FEM 소프트웨어의 구분은 어찌면 모호하게 되어 CAD/Solver/Design이라는 통합 소프트웨어로 발전할 가능성도 배제할 수 없다.

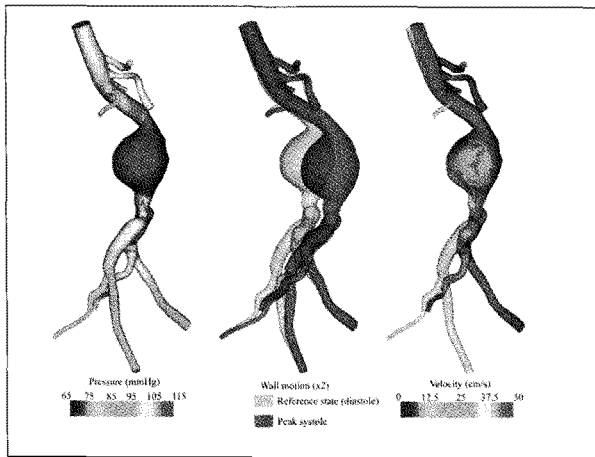


그림 7 인체 혈관에 대한 바이오 시뮬레이션



그림 8 멕시코만 유출 원유의 이동경로 예측 시뮬레이션

### 적용분야의 확대

CAE는 산업발전과 매우 밀접한 관계가 있고 산업은 자원과 환경변화의 영향과 더불어 궁극적으로 인간의 삶의 질을 향상시키는 방향으로 발전하고 있다. 지금까지 유한요소 해석기술은 공학분야에 한정되어 왔지만 흔히 6T로 불리는 미래 성장동력산업으로의 변천에 따라, 유한요소 해석기술 역시 매우 다양한 분야로 확대되고 있다. IT산업의 급성장으로 반도체와 통신분야에서의 시뮬레이션의 요구가 급증하고 있으며, 인터넷의 발전으로 동일한 공간 내에서 수행되었던 CAE작업이 글로벌화 되어가고 있다. 이러한 원거리 CAE를 위해 데이터(data) 전송은 물론 소프트웨어의 호환성이 급속도로 향상되고 있다.

나노·바이오는 물론 신재생 에너지 개발 그리고 기후예측에 이르기까지 유한요소법을 활용한 시뮬레이션과 이를 토대로 한 제품설계 및 예방기술이 활발히 개발되고 있다. 그야말로 얼마 전까지 미래기술로만 여겨졌던 virtual reality가 현실로 다가오고 있다고 말할 수 있다. 나노·바이오 분야로의 확대는 지금까지

연속체 역학에 기초한 유한요소 해석기술의 범주를 뛰어넘어, MD(Molecular Dynamics) 심지어 나노역학에 이르기까지 매우 다양한 스펙트럼의 자연과학에 기초한 해석기술이 소프트웨어로 구현되고 있다. 그리고 풍력, 태양광, 수력, 연료전지로 대표되는 신재생 에너지 개발을 위해 유한요소 해석기술이 요구되고 있으며, 이러한 요구를 충족시키기 위한 해석 모듈들이 속속 개발되어 소프트웨어에 탑재되고 있다. 한편, 지진과 기후변화 예측 그리고 대형 자연재해에 따른 피해를 예측하고 예방하기 위한 virtual reality 기술은, 한 단계 높은 슈퍼컴퓨팅과 visualization 기술을 요구하고 있으며 그리 멀지 않은 장래에 보편화 될 것으로 전망된다.

상향식 기술발전과 더불어 top-down방식의 저변확대에 따라 지금까지의 소프트웨어와는 차원이 다른 새로운 패러다임의 유한요소해석 소프트웨어의 개발이 전개될 것으로 본다. 다시 말해, 해석 설계업무에 유한요소해석 소프트웨어를 적용하지 않았던 중소기업체의 저변확대는, 날로 치열해지는 기술과 제품단가 경쟁력 확보를 위해 어찌면 필연적인 추세가 될 것이다. 따라서, 상향식 기술발전에 따른 소프트웨어와는 달리, 최소한의 CAD 기능을 탑재한 저가의 맞춤형 유한요소해석 소프트웨어가 요구될 것으로 전망된다. 이러한 추세는 CAD-embeded 소프트웨어가 안고 있는 프로그램 구동을 위한 전문성과 프로그램 구매에 대한 부담을 해소시킬 수 있을 것이다.

### 해석설계 통합 솔루션

지금까지 CAE를 활용한 제품개발 업무의 가장 두드러진 특징을 들자면 해석과 설계업무의 분리 그리고 해석업무의 세분화이다. 이러한 개발업무의 분리는 전문성을 요구하는 업무의 특성상 필연적이라고도 볼 수 있지만, 제품개발 프로세스에 있어 부서 그리고 사용하고 있는 소프트웨어 사이의 의사소통에 있어 적지 않은 불편함을 초래하였다. 해석자와 설계자라는 용어가 CAE 분야에 있어 오랫동안 통용되어 왔던 것 역시

이러한 배경에 기인하고 있다. 하지만, 최근 들어 CAE 업무에 있어 하나의 대체는 부서간 의사소통을 해소시키고 모듈 단위로 관리되어 왔던 제품개발 방식을 해석설계 통합 솔루션으로 전환시키고자 하는 추세이다. 이러한 추세는 대기업으로 갈수록 심화되고 있으며, ERP라는 전산화 작업에 따른 PLM, PDM, BIM, SLM(Simulation Lifecycle Management) 그리고 SDM(Simulation Data Management)을 구축하기 위해 필수적이다.

해석설계 통합 솔루션을 위해 현재 \*Works라는 이름으로 많은 소프트웨어들이 출시되고 있지만, 근본적인 취지에 비추어 아직 미흡한 단계에 머물고 있는 실정이다. 해석설계 통합 솔루션은 현재 전 세계적으로 거의 모든 소프트웨어 개발업체가 가장 심혈을 기울이고 있는 제품이다. 이러한 통합 솔루션 개발을 위해 CAD, FEM, CAM 소프트웨어 개발업체들 간의 합병이 지속적으로 이루어지고 있으며, Dassault가 Solid Works, SRAC 그리고 ABAQUS를 순차적으로 인수한 일이 가장 대표적인 예라 할 수 있겠다. 하지만, 해석설계 통합 솔루션은 지금까지 개발된 해석설계 모듈을 add-on하는 방식으로 개발하기에는 소프트웨어의 기초가 되는 플랫폼이 서로 다르기 때문에 한계가 있다고 말할 수 있다. 따라서, 통일된 프레임워크를 기초로 CAE 모듈을 개발하고 통합하는 작업이 필요하며, 이러한 작업은 단기간 내 완성하기가 쉽지 않을 것으로 예상된다.

### 향후 발전 전망

CAE의 발전방향을 전망한다는 것은 매우 힘든 일로서 극히 중단기적 전망에 한정한다 할지라도 예측의 정확도는 불투명하다. 왜냐하면 CAE의 발전은 산업발전과 불가분의 관계에 있기 때문에 CAE에 대한 전망은 결국 산업구조의 혁신과 발전을 예측하는 것과 동일하다고 볼 수 있다. 유한요소 해석기술에 한정하면, 1990년대 중반에 대두된 하나의 화두는 “유한요소 해석기술의 발전은 이미 한계에 도달하지 않았나?” 였는데, 그

로부터 20년이 지난 지금의 상황은 향후 CAE 발전에 대한 전망의 불확실성을 대변해 주고 있다. 그럼에도 불구하고 굳이 발전 방향을 전망한다면 향후 CAE는 크게 상향적 기술발전, 수평방향으로의 기술확대와 통합화 그리고 저변확대에 따른 top-down 방식의 보급화라는 큰 줄기로 발전할 것으로 예상된다.

신성장 동력원에 대한 세계적인 노력은 현재로서는 예측하기 힘든 신산업을 창출하게 될 것이고, 이러한 신성장 동력산업에 따른 신제품 개발을 뒷받침할 수 있는 CAE 기술과 소프트웨어를 탄생시킬 것이다. 상향적 발전에 따라 탄생하게 될 해석기술은 특성상 초기에는 특수한 전용 소프트웨어로 제공될 것이며, 모듈 형태로 범용 소프트웨어에 탑재될 것인가는 해당 산업발전의 지속성과 저변확대에 좌우될 것으로 본다. 수평방향으로의 확대와 통합화는 향후 가장 활발한 개발이 예상되며, 특히 CAD와 FEA가 결합된 통합 해석

설계 시스템, NT/BT/CT 분야에서의 전용 소프트웨어 그리고 슈퍼컴퓨팅과 multiphysics를 바탕으로 한 virtual reality의 확산이 주목된다. 한편, 향후 CAE의 저변확대에 따른 중소규모 수요자층의 급부상은 또 다른 유형의 소프트웨어 시장을 형성할 것으로 예상된다. 공학과 CAE 기술의 일반화는 물론 사용자 편의성과 필요한 최소한의 기능들을 탑재한 보급형 소프트웨어의 필요성이 대두될 것으로 본다.

하지만, 이러한 CAE의 발전에 있어 가장 큰 애로사항은 백만 라인에 달하는 소스 코드를 지속적으로 관리하고 또한 새롭게 개발하는 일이라 하겠다. 특히, CAE 분야의 후발주자로서 아직도 외국 소프트웨어에 대한 의존성이 높은 국내 현실을 감안할 때, 해석기술 전문인력의 육성과 소프트웨어의 국산화는 국내 CAE의 발전과 저변확대를 위해 시급한 과제라 할 수 있겠다.



### 기계용어해설

#### 라이프 사이언스(Life Science)

생물학, 생화학, 동물행동학, 고고학, 인류학, 언어학, 사회학 등의 여러 학문을 종합해서 생명을 해명하고 생명의 유지, 보호를 도모하는 기술분야.

#### 비례한도(Limit of Proportionality)

물체에 하중을 가하면 변형하여 응력과 변형을 일으키고, 이 양자는 응력이 일정 값에 달하기까지 정비례하며, 그 관계가 유지되는 최대 한도.

#### 액체 호닝(Liquid Honing)

금속제품이나 재료에 미립자의 연마제를 첨가한 물 또는 그에 적당한 부식 억제제를 첨가한 것을 고속으로 뿜어서 균일한 스테인 다듬질을 하는 동시에 깨끗하게 하는 표면연마 가공법.

#### 선형 계획법(Linear Programming)

서로 관련되는 몇 가지의 활동에 대하여 전체적인 견지에서 최적의 처리법을 찾아내는 데 쓰이는 계산방법.

#### 액체침투탐상검사(Liquid Penetrant Test)

도포된 액을 표면개구 결함부위에 침투시킨 후 표면의 침투액을 제거하고, 내부 결함 속의 침투액을 뽑아내어 직접 또는 자외선 등으로 비추어 결함의 장소와 크기를 알아내는 방법.

#### 액화석유(Liquefied Petroleum Gas)

LPG로 약기. 프로판, 프로필렌, 부탄, 부틸렌 등의 혼합물로서, 가스 절단, 연료로 쓰이는 경질 탄화수소의 총칭.

#### 액체침탄법(Liquid Carburizing)

청화 칼리나 청화 소다를 주성분으로 하고 식염이나 염화 칼리 등을 첨가한 침탄용 염욕 속에서 강을 가열하여, 750~900℃에서 30~60분 동안 침탄하는 방법.

#### 액체 헬륨(Liquid Helium)

기체의 온도를 떨어뜨렸을 때 가장 낮은 온도에까지 기체상태로 남으며, 끓는점은 -268.9℃로, 극저온을 만드는데 쓰이는 것.