

## 전산 구조 공학의 발전과 연구 동향

Advances and Trends in Computational Structural Engineering

최 창 근 \*  
Choi, Chang-Koon

### ABSTRACT

In this study, the current progress in computational structural engineering and research trends are discussed. The development of new finite elements, error analysis and adaptive mesh generation, material constitutive model, boundary element methods, structural optimal design, hardware/software, AI application and expert systems are particularly emphasized. The rapid development in computer technologies provides good environment for the technical advancement in computational structural engineering.

### 1. 서론

Theodore von Karman이 이학도(scientist)와 공학도(engineers)의 차이를 정의한 바에 따르면 "이학도는 존재하는 것(what is)에 대해 탐구하고 공학도는 아직 존재하지 않는 것(what has never been)을 창조하는 점"이라 하였다. 구조공학 분야에서의 창조는 바로 설계를 의미한다고 할 수 있고 정확한 구조해석은 구조설계의 판단이 된다.

지난 20여년 간의 컴퓨터 기술의 급속한 발전과 보급의 확대는 구조공학분야에도 혁신적인 변화를 가져오게 했으며 컴퓨터를 이용하는 "전산구조공학"을 새로이 부상하는 기술 분야로 만들었다. 오늘날 토목, 건축, 항공, 기계, 조선 등의 여러 공학 분야에서 구조물이 점차 대형화되고 복잡하게 되어 가는 추세에 있어 이러한 구조물의 거동을 예측하는데는 복잡하고 많은 양의 계산을 필요로 한다. 중래의 구조해석 방법으로는 이러한 욕구를 충족하기 어렵고 컴퓨터를 이용하는 수치해석 방법으로만이 가능하다.

유한요소법(finite element method)은 이러한 수치해석을 위한 강력한 도구로서 근래에 널리 알려지고 많이 이용되고 있다. 한동안 matrix method, discrete element method라고 불리우던 이 방법은 당시 Boeing 항공사에 근무하던 Ray Clough에 의해 처음으로(1960) "finite element method"로 명명되고 그 이후 컴퓨터 기술과 병행하여 급속한 발전을 이룩하였다. 즉, 그 당시 이 방법의 장래성과 중요성을 인식한 구조공학분야의 수 많은 학자들에 의해 폭발적인 연구 성과를 올리게 되었다. 1960년 초에는 유한요소법에 관한 논문이 전세계적으로 10편 정도이던 것이 1974년엔 1,400 편, 그리고 최근에는 10,000 편에 이르고 있다는 통계나<sup>1)</sup>, 이 분야 교과서도 1971년까지 Zienkiewicz의 교과서 한 종류이던 것이 지금은 60 여종에 이르고 있으며 이 분야의 전문적인 국제학술지도 15종이 넘고 있음이 그 간의 이 분야 연구 열기를 잘 설명하고 있다 하겠으며 이러한 연구열은 지금도 계속되고 있다.

유한요소법에 의한 구조 해석에서는 대상 구조물의 하중-변형 관계를 나타내는 지배미분방정식(governing

differential equation)에서 완전히 벗어나서 요소별로 가정된 비교적 간단한 변수에 의해 요소별 특성(stiffness) matrix를 구하고 이를 전체 구조물로 조합하여 근사해(절점변위)를 구한다. 초기에는 요소들에 대해 직접강성법(direct stiffness method)으로 요소의 매트릭스를 구할 수 있었으나 요소가 복잡하여 짐에 따라 개념적인 한계에 부딪치게 되었다. 이러한 어려움이 변분법(variational method) 혹은 에너지법에 의해 극복되면서 새로운 요소의 개발이 일층 가속화되었다.

유한요소법에 의한 선형구조해석이 어느 정도 정복된 후에는 비선형해석으로, 또한 구조해석만의 문제에서 구조-기초, 구조-유체의 상호작용문제 등으로 연구 방향이 전환되었으며 지금도 계속 새로운 분야에의 응용으로 확장되어 가면서 많은 학자들의 연구 대상이 되고 있다.

초기의 비선형해석에는 경제적인 문제와 컴퓨터 능력의 한계 때문에 제한을 받았으나 최근에는 슈퍼컴퓨터(CRAY 등)의 출현으로 이 문제는 자연스럽게 해결된 셈이다. 즉, 기하학적 비선형과 재료의 비선형이 혼합된 경우는 물론, 이에 더하여 동적하중까지 고려해야 하는 문제 등에 관심이 모아지게 되었다.

전산구조공학 분야의 학술적인 발전에 비해 실무 응용면에서는 그 발전된 기술을 제대로 소화하지 못하는 면이 있다. 이는 실무 엔지니어가 급속히 발전하는 유한요소법에 관한 지식과, 범용 package 프로그램의 내용에 대한 이해가 충분하지 않은 상태에서 이를 사용하기 때문이라고 볼 수 있다. 사실 날로 발전하는 기법을 일반 엔지니어가 따라가기 어려운 점이 있는 것도 사실이므로 최근에는 인공지능(artificial intelligence)을 이용한 전문가시스템(expert system)의 개발에 의해 이 문제의 해결이 시도되고 있다.

본 논문은 전산구조공학 분야의 지금까지의 연구 현황을 정리하고 최근의 발전 내용과 장차의 연구 동향을 소개하여 앞으로의 연구에 대한 참고 자료를 제공하고 연구 의욕을 고취하는 것을 목적으로 하고 있다. 다만 지면 관계로 전산구조공학의 전 분야를 모두 포함하기 곤란하여 특히 관심있는 몇몇 분야에 한정하여 논하였다.

\* 정회원 한국과학기술원 토목공학과 교수

## 2 새로운 요소의 개발

요소의 새로운 개발과 개량은 그 동안의 유한요소법에 관한 기술적 진보를 위한 연구중 가장 중요한 부분이었다. 그 중에서도 간단하면서 효율적인 plate 와 shell 요소의 개발은 유한요소법 개발 초기의 최대의 과제였고 지금도 소위 "defect-free shell element"의 개발을 위해 많은 연구 노력이 집중되고 있다. 초기의 간단한 3각형 요소와 4각형 요소로부터 복잡한 고차 요소(high order)로 발전하였고 1970년대초기의 Ahmad-Iron 의 degenerated shell 요소의 개발이 가장 획기적인 발전의 계기가 되었다고 할 수 있다.<sup>2)</sup> Lagrangian element 나 Serendipity element 의 어느 형태로도 가능한 이 degenerated shell은 입체 등매개요소(isoparametric element)의 두께 방향 자유도를 줄여서 구성한다. 이 요소는 Mindlin 이나 Kirchoff Shell 이론에도 모두 적용이 가능하고 임의의 기하학적 형태에 적용하는데에도 융통성이 있으며  $C^0$  연속성만을 요구하기 때문에 요소간 경계에서도 적합성(compatibility)이 유지되는 등 매우 강한 장점을 가지고 있다. 그러나 이 요소는 썸 변형에 대해 과도하게 강(stiff)한 결점을 가지고 있고 shear locking 이나 membrane locking 현상을 일으키는 문제점도 있다. locking 현상이란 요소의 변과 두께의 비가 일정한 값 이하가 될때 (예 : 1,000,000분의 1 이하) 지나치게 stiff해지는 현상을 말하며 이 경우 구해진 해가 큰 오차를 가지고 있음은 물론이다.

이와 같은 문제의 해결을 위한 방안으로 가장 보편적으로 쓰이는 방법은 감차적분(reduced integration)<sup>3)</sup> 과 비적합 모드(nonconforming mode)의 추가이다. 감차적분은 요소의 강성 매트릭스의 계산에 있어 정상적분에 비해 경제적이면서도 해의 정확도를 증가시키는 이중의 효과를 가지고 있다. 그러나 이 감차적분된 요소는 제로 에너지 모드(spurious zero energy mode)를 포함하는 경우가 있으므로 특별한 주의가 필요하다. 제로 에너지 모드란 적분점에서 계산상으로는 변형도(strain)가 영(zero)이면서도 요소자체는 변형을 일으키는 썸 피상한 현상을 말하며 이는 요소의 강성 매트릭스의 rank deficiency로 말미암은 것으로 알려져있다. 이와 같은 제로 에너지 모드를 제거하기 위하여 계산된 요소의 강성 매트릭스에 인위적인 변형을 가해 수정하는 기법들이 쓰이고 있다<sup>4,5)</sup>.

비적합 모드를 추가하여 요소의 강성을 줄이는 기법은 처음에는 면내요소(inplane element)에 적용되었다가<sup>6)</sup> plate/shell의 썸(bending)요소로 그 적용이 확대되었다<sup>7)</sup>. 이 기법은 요소에 가해지는 썸하중을 전단변형에 의해 저항하면서 발생하는 과도한 강성(too stiff)을 썸변형모드를 추가하여 정상적인 변형모드로 회복시키는 방법이다. 이 방법에 의한 요소는 locking 현상을 발생시키지 않는다. 최근에는 감차적분과 비적합모드의 추가를 혼합 사용하는 요소도 개발되었다<sup>8)</sup>. 이 요소는 locking 현상과 제로 에너지 모드등이 발생하지 않는 월등히 개량된 요소이다.

지금까지의 많은 연구 노력에도 불구하고 "절대 완전한 shell 요소(defect-free shell element)"는 아직 개발되지 않았으며 앞으로도 이러한 완전한 shell 요소 개발에 대한 연구가 당분간 계속될 전망이다.

위에서 언급한 표준형 plate/shell 요소 이외에도 요소의 일부 변에 추가적인 결점을 갖는 개량된 "변절점 요소(variable node element)"도 개발되고 있다<sup>9)</sup>.

이 변절점 요소의 기본형은 degeneration을 통해 쉽게 구성될수 있으나 일반적인 degenerated element와 마찬가지로 과도한 강성 때문에 그 정확도가 매우 낮다. 따라서 이 요소를 실용화하기 위해서는 개선이 필요하다. 비적합 모드를 선택적으로 추가한 변절점 plate bending 요소의 거동이 상당히 개선됨이 확인되었으며<sup>9)</sup> 면내(inplane) 요소의 개량을 위한 연구도 현재 KAIST에서 추진되고 있다. 이 요소는 뒤에 설명할 apaptive method 와 연계하여 앞으로도 연구가 계속될 것이다.

## 3 재료의 거동 특성 모델

구조물의 궁극적인 거동은 재료의 성질에 크게 연 관되어 있으므로 재료의 비선형성이 포함된 문제의 해석에는 재료의 특성(constitutive)모델이 절대적으로 중요하다. 대부분의 구조체에는 고전적인 Von Mises 등의 constitutive 이론에 근거하더라도 별 무리는 없다고 할 수 있으나 큰 비선형 변형을 수반하는 대형구조의 정확한 거동을 파악하기 위해서는 보다 정확한 재료의 모델이 필요하다. 예를 들면, 재료 모델(비선형 포함)과 구조 해석을 위한 수치해석 모델이 모두 적합한 경우에 비로소 충돌 문제의 파괴 모델을 제대로 정립할 수 있다.

그러나 재료의 특성 모델 선정에 관한 연구는 실험적으로 관찰된 여러 비선형 현상(small strain, cyclic plasticity, hardening 등)에 입각하는 접근과 micromechanical 모델에 입각한 방법이 있겠으나 아직 안정적인 결과를 얻기 위한 연구가 더 계속되어야 한다는 것이 일반적인 견해이다.

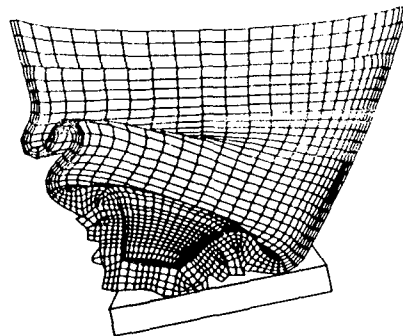


그림 1. 충격 실험과 수치해석 모델 (CRAY Research)

철근 콘크리트 부재의 거동에 대한 연구라면 당연히 실험적 연구를 연상하는 경우가 많다. 그러나 이 거동을 해석적으로 연구하기 위해 콘크리트 재료 특성 모델의 정립을 유한요소법적으로 접근하려는 노력도 지난 20여년간 지속되어 왔었다.<sup>10)</sup> 대형 철근 콘크리트 부재의 실험적 연구는 매우 어렵고 비용이 많이 들며 축소된 모델(scaled model)에 의한 실험은 그 결과의 신뢰성이 낮아 만족스럽지 못한 경우가 많다. 따라서 가장 바람직한 방법은 실험에 의한 방법과 수치해석적 방법을 연계하여 상호 보완적으로 사용하는 것이다.

철근 콘크리트 부재의 균열, bond 등을 합리적으로 표현 모델링하여 grid size 에 영향을 받지않고 부재 내 응력상태를 정확히 구하는 것이 많은 관심을 끌고 있는 분야중의 하나이다. 또한 새로운 재료, (예컨대 복합재료) 의 개발에 따른 재료적 특성 규명과 수치 해석 모델의 정립도 관심을 끄는 분야이다.

#### 4 오차 평가 및 Adaptive Mesh Generation

A : "이 계산은 정확하나요?"  
 B : "이건 컴퓨터에 의한 결과이므로 틀림없습니다."  
 A : "그래요 ...!!!!!!?"

유한요소법의 응용 범위가 확대되면서 위와 같은 대화가 도처에서 생길 수 있게 되었으며 이 대화는 유한요소법의 특성과 그에 따른 문제를 바로 제기하고 있다 하겠다. 유한요소법이 근본적으로 근사해법이라는 특성때문에 다음과 같은 두 문제가 당연히 제기된다.

- (1) 그 해석 결과에는 어느정도의 오차가 내포되어 있느냐 하는 문제
- (2) 이 오차를 최소화하고 요구되는 정확도를 어떻게 달성하느냐 하는 문제

지금까지의 통상적인 방법으로는 첫째 문제는 기존의 정확한 해나 믿을만한 실험 결과가 존재할 경우에는 근사해와 비교하여 그 오차를 평가할 수 있고, 두번째 문제는 경험에 의해 mesh를 조정하거나 고차요소를 선택하여 보다 수렴된 해를 구한다. 그러나 구조체 뿐만 아니라 하중과 경계 조건등이 복잡한 경우에는 두 방법 모두가 만족스럽지 못하다. 따라서 최근에는 새로운 "오차 평가와 adaptive mesh generation" 기법을 통해 이 문제를 보다 적극적으로 체계적으로 해결하여 유한요소법에 의한 해의 정확도와 신뢰도를 높이는 경향이 나타나고 있다.<sup>11,12)</sup>

오차의 평가는 일단 예비 해석 (유한요소해석)을 수행한 뒤 정확한 해와 수치 해석으로 구한 근사해와의 차이에 의해 계산되는 energy norm 으로 나타내는 것이 보통이다. 그러나 정확한 해를 구할수 없는 경우 (대부분의 경우)에는 별수 없이 가정된 정확한 해에 의할수 밖에 없다. 이 오차 계산에 Babuska<sup>11)</sup> 은 수학적인 접근 방법을 쓰고 있고 Zienkiewicz 와 Zhu<sup>12)</sup> 은 간단한 실용적인 근사법에 의하고 있다.

오차 해석 결과에 따라 자동적으로 mesh를 다시 구성하여 목표로 하고 있는 정확도 (예: 5% 이내 오차)를 얻기 위한 adaptive approach에는 근본적인 두 방법이 있다. 즉 오차가 큰 부분은 극지적으로 요소의 크기를 작게하고 많은 수의 요소를 사용하는 반면 오차가 작은 부분에는 큰 요소를 사용하는 h-method<sup>12)</sup> 와 처음에 결정한 mesh는 그대로 둔채 오차가 큰 부분에는 고차요소(high order element)를 사용하는 p-method<sup>13)</sup> 가 있다. 최근에는 이 두 방법을 혼합 사용

하는 hp-method<sup>14)</sup>에도 관심이 모아지고 있다.

h-method에 있어서 mesh를 점진적으로 작게하는 데에는 처음의 mesh를 그대로 두고 그 내부에 새로운 refined mesh를 구성하는 mesh enrichment, 오차 해석의 결과에 따라 각부분별(결점별) 요구되는 요소의 크기를 먼저 구하고 처음의 mesh와는 상관없이 완전히 새로운 mesh를 구성하는 mesh-regeneration, 그리고 결점을 이동시켜 요소의 수를 증가시키지 않은채 mesh를 재구성하는 moving mesh 등의 기법이 쓰인다. 이와 같은 mesh의 구성은 요구되는 허용 오차 범위까지 단계적으로 진행시키는 방법이 보편적으로 많이 쓰이지만, 한번의 근사해를 구하고 그에 따른 오차 해석에 (mesh regeneration 기법) 의해 요구되는 정확도를 줄 수 있는 mesh를 자동적으로 구성하는 기법도 개발되었다<sup>15)</sup>. 이 경우 효율적인 mesh-generator(프로그램)가 판단이 쉬운 물론이다. 지금까지는 mesh generation에 3각형 요소가 주로 쓰였으나 앞으로 일과성(transient)문제 등에는 4각형 요소를 이용하는 mesh generator의 개발도 필요하다.

비록 컴퓨터 하드웨어의 급속한 발전으로 구조 해석상의 컴퓨터 계산량의 문제는 제거되었다 하더라도, 오차평가와 adaptive mesh generation 기법은 유한요소법의 경제성, 정확도 및 신뢰도를 높이는데 크게 기여할 것이다. 특히 대형의 복잡한 구조물의 해석에는 이 기법이 매우 효과적으로 이용된다. 이 분야의 연구는 특히 구조-유체의 상호 작용(공기중을 초고속으로 날으는 구조체)의 2차원적 내지는 3차원적 해석에 매우 유용하게 응용될 것이고 비선형 접촉, 충돌 문제 등에도 응용될 수 있다.

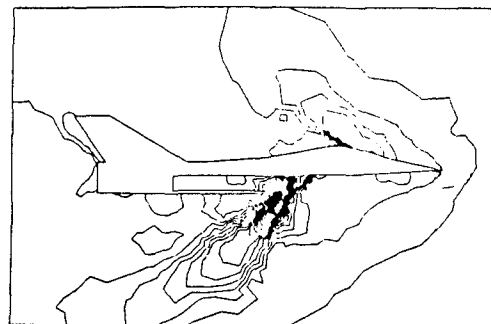
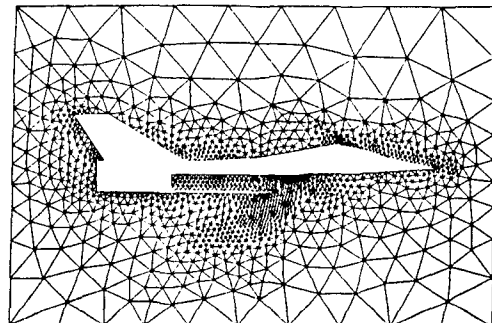


그림 2. Adaptive Mesh에 의한 압력 분포 해석 (Peraire)

## 5. 타 수치 해석법

지금까지는 유한요소법에 관해 주로 논하였으나 경제요소법에 의한 구조해석도 그 관심도가 날로 증가하고 있다. 경제요소법이 유한요소법을 완전히 대체할 것이라는 일부의 주장은 너무 성급한 일면이 있다. 유한요소법은 경제요소법등 다른 수치해석 기법의 발전에도 불구하고 구조해석의 강력한 도구(tool)로서의 부동의 지위를 유지하고 있고 다른 어떤 방법도 가까운 장래에 이를 대체한다는 것은 상상하기 어렵다. 그러나 최근에 이르러 경제요소법에 관한 기술적 진보에 따라 유한요소법을 완전히 대체하지는 않더라도 또 다른 강력한 구조해석 tool로 인식되어 가고 있는 것도 사실이다.

경제요소법은 70년대 초 경제적분방정식의 해에 유한요소법을 이용한데서 비롯되었다. 경제요소법은 구조체 전체보다 경제상의 현상(변위, 응력)등이 필요한 문제에 매우 적합하고 경제상에서만 모델링하기 때문에 모델링이나 input 준비가 간단하고 컴퓨터의 용량이 제한되어 있는 경우에는 경제적으로 구조해석을 수행할 수 있는 이점이 있다. 그러나 최종적으로 구해지는 matrix는 비대칭이므로 해를 구하는 노력이 대칭 matrix 때보다 더 필요하게 된다.

현 단계에서 경제요소법의 가장 효율적인 응용은 유한요소법과의 혼합 사용일 것이다. 각각의 장점을 최대한 활용하고 단점은 서로 보완하게 되기 때문이다. 응력의 집중이 있는 부분에서는 유한요소법 모델을 사용하고 응력의 변화가 적은 부분에서는 경제요소법으로 모델링하여 해를 구하는 것이 가장 전형적인 문제이다.<sup>16)</sup>

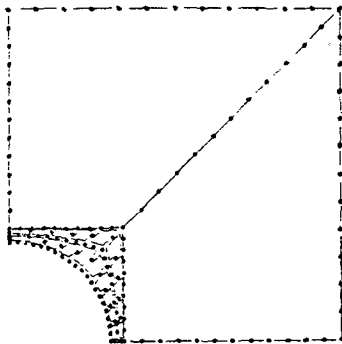


그림 3. FE/BE Mesh(Wearing et al)

최근에는 복잡한 구조물의 모델링에 필요한 특수한 유한 요소의 강성 매트릭스(대칭)를 구하는데 이 경제요소법이 유한요소법과 연관되어(coupled) 응용되기도 했다. 즉, 개구부를 가진 plate 요소<sup>17)</sup>의 강성 매트릭스 계산에 응용된 것이 한 예가 있다. 먼저 개구부를 가진 내·외부 경계를 각각 4 개의 경제요소로 모델링하여 그 matrix를 조합한 뒤 이 matrix를 유한요소법에 사용하는 대칭 matrix로 전환하였다.

터널 해석문제나 반 무한 영역 문제 해결에 효율적으로 쓰이는 무한요소(infinite element)도 유한요소법과 보완적으로 쓰일 수 있는 요소이다. 또한, crack, 큰 응력집중 등에 관한 비선형 해석에도 이 무한 요소가 순수한 유한요소보다 효율적으로 쓰인다.

## 6. 최적 설계

최적설계는 엔지니어가 창조(설계) 활동을 통해 오랫동안 추구해오던 목표라 할 수 있다. 구조공학 분야에서는 항공, 우주 관련 구조물의 최적화가 가장 필요하다는데는 이의가 없겠으나 토목, 건축 구조물도 경제적인 면에서 최적화가 필요한 분야이다.

최적설계란 목적함수(비용)를 최소화하는 설계변수를 구하는 것으로 요약할 수 있다. 이론적인 최적화 기법에서는 이 설계변수를 연속적이라고 가정하지만 실제의 토목, 건축 구조물은 상용화된 단면(강구조)을 쓰거나 어느 정도 규격화된 단면(철근 콘크리트)으로 구성되므로 불연속적인 설계변수(discrete)에 의한 최적화 기법의 개발이 필요하다. 이와 같은 기법은 2단계로 나누어 첫단계에서는 부재의 최적화를 기하고 다음 단계에서 전체 구조의 최적해를 구하게 된다.<sup>18)</sup>

부재의 최적화를 위해 먼저 상용화된 강구조 단면이나 미리 정해진 철근 콘크리트 단면을 database화하고 단면 번호와 단면의 저항능력(예: 단면 계수) 간의 상관 관계를 나타내는 식을 회기분석을 통해 구해야 한다. 그리고 일단 가해지는 하중(혹은 부재력)이 결정되면 이 상관 관계식에 따라 바로 연속해로서의 부재 번호가 계산되고 이 연속해 근처에 불연속해가 존재한다는 가정하에 기존 database에서 직접 탐색법(direct search)에 의해 1차적으로 최적 부재 단면을 구한다.

구조물 전체의 최적화는 1단계에서 최적화된 단면의 조합으로 가정하고 구조물에 가해지는 제한조건(예: 변위제한)을 만족하지 않을때는 민감도 해석을 통해 가장 민감한 부재, 즉 최소한의 설계변수의 변경으로 최대의 효과를 낼 수 있는 부재부터 차례로 한단계씩 바꾸면서 전체 구조물의 최적해를 구한다. 이와 같은 방법에 의한 최적화에는 부재 및 전체 구조물의 최적화 단계에서 진동(oscillation)때문에 최적해로의 수렴이 보장되지 않을 경우도 있으므로 수렴 여부의 판단과 진동 현상이 있을때의 통제 방법등에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 또한 재 1단계에서 최적화된 부재의 조합과 구조물 전체의 최적해와의 관계를 정립하는 기법의 개발이 필요하다.

## 7. 하드웨어

최근 컴퓨터 기술의 급속한 발전에 힘입어 컴퓨터 하드웨어의 가격은 급격히 하락(계산능력 대비)하는 추세이지만 소프트웨어 개발에는 고급인력과 장시간이 소요됨으로 말미암아 하드웨어와는 반대로 급상승하는 추세에 있다. 그러나 컴퓨터의 진정한 의미는 하드웨어와 소프트웨어의 결합에서만 찾을 수 있음은 재론의 여지가 없다.

하드웨어 면에서 슈퍼 컴퓨터(CRAY X-MP, CRAY-2, CDC CYBER 205 등)의 등장은 컴퓨터 계산능력의 획기적인 증가를 가져오고 계산환경을 일신했으며 구조해석과 설계에 새로운 전기를 가져 왔다고 할 수 있다. 즉, 여태까지 비선형, 동역학 문제등 복잡하고 계산량이 많은 문제에서 느껴오던 컴퓨터의 계산능력의 한계를 허물었으며 이 슈퍼 컴퓨터의 능력은 앞으로 더욱 빠른 속도로 더욱 향상될 것으로 기대되고 있다.

병렬(Parallel) 시스템에 관한 기술적 진보도 계산능력의 획기적인 향상에 기여하고 있다. 병렬시스템이란 한가지 계산을 여러개의 processor가 한 통째 하에 병

열적으로 동시에(혹은 동시가 아닐 수도 있음) 처리하는 시스템이다. 현재에도 수만개(혹은 64,000까지)의 processor가 병렬된 시스템이 출현하고 있으며 점차 다단계(multi-level) 병렬로 더욱 고도화된 시스템도 가능할 것이다.

컴퓨터 계산에서 마이크로(micro) 컴퓨터가 가지고 있는 역할과 중요성도 간과할 수 없다. 즉, 슈퍼 컴퓨터와 마이크로 컴퓨터는 서로 완전히 다른 영역에서 보완적으로 활용될 수 있기 때문이다. Engineering workstation은 특별히 복잡한 문제가 아닐 때에는 구조공학 분야 실무와 연구에 종사하는 엔지니어에게 매우 실용적이고 간편한 시스템으로서 사용자에게 편리한(user friendly) 소프트웨어와 하드웨어 interface 등에 의해 최대의 생산성 제고를 기할 수 있다. 장차 이 workstation이 성능이 더욱 향상되어 명실 상부한 "Desktop Computer"가 되어 실무 엔지니어의 필수불가결의 도구가 될 것으로 전망된다. 지금도 mouse로 간단히 제어되는 multiwindow기능, Local Area Networks (LAN) 기능들은 매우 유용한 기능이다.

개인용 컴퓨터(PC)는 가장 기초적이고 가장 많이 보급된 하드웨어라 할 수 있다. 최근에는 그 성능이 향상된 모델이 많이 출현하고 있으며 workstation등과 연계되어(network) 사용될때 매우 효과적이다.

#### 8. 소프트웨어

컴퓨터 하드웨어의 계산능력이 급속히 향상됨에 따라 향상된 하드웨어의 능력을 최대한 활용키위한 소프트웨어의 개발이 요망되고 있다. 구조의 해석/설계, CAD등의 소프트웨어 개발에는 많은 노력과 장시간이 소요되기 때문에 하드웨어의 발전속도를 제대로 뒤 따르지 못하고 있는 실정이다. 앞으로의 이분야 소프트웨어는 기능별 분산된 형태가 아닌 일괄 시스템(구조 계획, 해석, 설계, 도면작성, 견적, 보고서)으로의 통합되는 경향을 가지고 있다. 이러한 시스템의 효율적인 이용에는 소프트웨어의 infrastructure 격인 database의 구성과 그 효율적인 관리(management) 기법의 개발이 매우 중요하다. 강력한 graphic 기능을 가진 workstation environment와 연계되어 실용화되는 시스템이 개발되어야 한다.(BUILDS 개발을 예로 들 수 있다.)

최근의 인공지능(artificial intelligence)을 이용한 전문가 시스템(expert system)의 개발이 구조공학의 최신 기술분야로 인식되어 많은 관심을 끌고 있다. 지금까지 컴퓨터는 통상적인 수치계산에 주로 쓰여왔으나 이들 전문가 시스템은 구조공학 분야 전문가의 지식과 오랫동안 경험을 프로그램화 하여 수치계산 문제 뿐만 아니라 구조의 모델링, 설계, 평가등 비 수치 계산 문제 (ill-structured problems)의 해결에도 효과적으로 쓰이게 되었다.

그동안 구조공학 분야에서 수치 계산을 위한 프로그램들이 많이 개발되어 사용되어 왔으므로 전문가 시스템 개발에 따라 지금까지의 모든 수치계산 프로그램을 전문가 시스템으로 바꾸는 것은 바람직하지도, 가능하지도 않다. 따라서 새로 개발되는 전문가 시스템이 기존의 프로그램과 통합되어 상호 보완되도록 하는것이 바람직하고 이와 같은 통합을 쉽게하기 위해서는 "C"가 적합하다고 판단된다. 구조공학 분야의 전문가 시스템 개발을 위해서는 먼저 효율적인 tool의 개발이 필요하다. 이 분야의 연구도 전 세계적으로 지속적으로 진행되고 있으며 (Ops5, GEPSE, INSIGHT-2 Plus,

CLIPS), 현재 KAIST에서도 K-CLIPS (KAIST Version C-Language Integrated Production System)의 개발을 적극 추진하고 있다.

구조공학 분야의 전문가 시스템은 아직 경험이 적은 엔지니어에게 그분야 전문가의 프로그램화된 지식과 경험으로 부터 구조시스템 선정, 초기 부재 가정, 해석 모델링, 해석방법(알고리즘)의 선정등에 관해 도움을 받을 수 있다. 현 단계의 전문가 시스템은 구조공학 전반적인 광범위한 지식이 아니라 좁은 특수분야의 지식에 한해 지식베이스를 구성하고 있다. 예를 들면 BUILDS 프로그램의 input file 작성용 전문가 시스템이나 지질보고서로 부터 토질의 특성파악, 기초 시스템의 선정, 기초 구조의 설계등에 관한 전문가 시스템처럼 비교적 좁은 분야에 국한되고 있다. 인공지능 산업이 다음 세기의 주종 산업중의 하나가 될 것이라는 전망을 감안한다면 구조공학 분야의 전문가 시스템은 더욱 적극적인 연구 활동이 요망되는 분야라 할 수 있다.

#### 9. 결론

컴퓨터를 이용하는 구조공학 분야의 그간의 기술적 발전과 앞으로의 연구 추세에 관해 논하였다. 즉, 새로운 유한요소 개발, 오차해석, 재료특성모델, 경계요소법, 최적설계, 하드웨어/소프트웨어, 인공지능 이용과 전문가 시스템 개발 등의 여러 분야에서 구조공학과 관련하여 최근 부상하는 기술분야를 정의하고 앞으로의 연구에 관해 논하였다.

컴퓨터 기술의 발전에 힘입어 구조공학 분야의 복잡한 문제의 해결도 가능하게 되었다. 신이론의 개발에 못지 않게 실무에서의 응용도 강조 되어야 하며 그런 의미에서 이미 개발된 이론의 응용을 위한 연구(실용 소프트웨어등)도 병행되어야 할 것이다. 이와 같이 연구와 응용이 상호 연계되는 가운데 새로운 연구의 필요한 부분이 정리되고 연구 결과의 실무에서의 신속한 응용이 이루어 질 것이다.

구조해석을 위한 강력한 도구로서의 유한요소법은 점차 그 응용이 비구조분야로 광범위하게 확대되는 추세에 있으므로 학제간(interdisciplinary)의 공동 연구체제는 물론 국제간의 협력체제의 구축이 필요하며 이러한 협력으로 더욱 급속한 기술적 발전을 기할 수 있을 것이다.

#### 참 고 문 헌

1. O. C. Zienkiewicz, "Computer Prediction in Engineering", The University Wales Review, pp 5-19, No.2, Autumn 1987.
2. S. Ahmad, B. H. Irons and O. C. Zienkiewicz, "Analysis of thick and thin shell structures by curved finite elements", Int.J.Numer.Meth.Engng 2, 419-451 (1970).
3. O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor and J. M. Too, "Reduced integration technique in general analysis of plates and shells", Int.J.Numer.Meth. Engng 3, 275-290 (1971).
4. Cook, R. D. and F. Zhao-Hua, "Control of Spurious Modes in the Nine-Node Quadrilateral Element," Int.J.Numerical Methods in Engineering, 18, 1576-1580 (1982).

5. T. Belytschko, W.K.Liu, J.S. Ong and D. Lam, "Implementation and Application of a 9-node Lagrange Shell Element with Spurious Mode Control," *Int.J.Num.Meth.Engng.*, 20, 121128 (1985).
6. E.L. Wilson, R.L. Taylor, W.P. Doherty and J. Ghaboussi, "Incompatible displacement modes," In *Numerical and Computer Methods in Structural Mechanics* (Edited by S.T. Fenves et al.). Academic Press, New York (1973).
7. C.K. Choi and W.C. Schnobrich, "Use of nonconforming modes in finite element analysis of plates and shells," *Civil Engineering Studies, Structural Research Series, No. 401*, University of Illinois, Urbana, IL (1973).
8. C.K. Choi and S.H. Kim, "Reduced Integration, Nonconforming Modes and Their Coupling in Thin Plate Elements", *Computers and Structures*, Vol 29, No.1, pp 57-62, 1988.
9. C.K. Choi and Y.M. Park, "Nonconforming Transition Plate Bending Elements with Variable Mid-side Nodes", in press, *Computers and Structures*
10. W.C. Schnobrich, "Computational Mechanics", *Proceedings of U.S-Korea Joint Seminar on Critical Engineering Systems*, May 1987.
11. A.K. Noor and I. Babuska, "Quality assessment and control of finite element solutions", *Finite Element in Analysis and Design* 3, 1-26, 1987.
12. O.C. Zienkiewicz and J.Z. Zhu, "A simple error estimator and adaptive procedure for practical engineering analysis", *Int.J.Numer.Meth.Eng.* 24, pp. 337-357, 1987.
13. Babuska, I., Szabo, B.A., Katz, I.N. "The p-version of the finite element method", *SIAM J. Numer. Anal.* 18, No.5, pp.515-545, (1981).
14. I. Babuska and B. Guo, "The h-p Version of the Finite Element Method for Domain with Curved Boundaries", *SIAM, Journal of Numerical Analysis*. 1987.
15. J. Peraire, M. Vahdati, K. Morgan, and O.C. Zienkiewicz, "Adaptive Remeshing for Compressible Flow Computations", *Journal of Computational Physics*, Vol.72, No.2, Oct. 1987.
16. J.L. Wearing and M.A. Sheikh, "A Combined Finite Element Boundary Element Techniques for Stress Analysis", 10th International Conference on Boundary Element, BEM-10, Univ. of Southampton, Sept. 1988, pp493-507
17. C.K. Choi and J.S. Ahn, "Coupled Formulation of Finite and Boundary Element Methods in Two-Dimensional Elasticity", in press, *Computers and Structures*.
18. C.K. Choi, H.W. Lee and H.G. Kwak, "The Optimum Structural Design with Discrete Sections", *Proceedings of Korea-Japan Joint Seminar on Engineering Technologies in Structural Engineering and Mechanics*, Seoul, Korea, Nov. 1988.