

자동차 산업의 CAE 응용(II)

— Design Analysis 관련 슈퍼 컴퓨팅 파워의 활용 —

이 성 철

기아자동차 기술센터 차량연구실장



- 1953년생
- 자동차 개발 관련 전 산업학의 응용으로 유한 요소법의 구조, 진동, 전자기 관련 개발에 관심을 가지고 있다.

김 대 영

기아자동차 기술센터 차량연구실



- 1961년생
- CAE분야에서 구조해석 관련 최적화에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

컴퓨터를 이용한 설계해석은 CAE(computer aided engineering)라는 수단을 통해 산업전반에 걸쳐 그 중요성이 점차 인식되어져 가고 있다. CAE는 새로운 설계과정의 정립과 함께, 제품개발 단계에서 원가 절감과 개발기간 단축이라는 목표 아래 산업체의 개발력과 경쟁력 향상에 큰 영향을 주고 있다. 컴퓨터 시스템의 발전과 더불어, 해석 소프트웨어의 범용성으로 인해, 조선, 항공, 자동차 산업등의 시스템 엔지니어링/토탈엔지니어링 측면에서 대형 선형 문제 또는 형상적/재료적 비선형의 복잡하고, 난이도 높은 문제를 단계적으로 해결해 오고 있다. 이러한 문제 해결을 위해 산업계에서는 보다 강력한 컴퓨팅 파워가 자주 거론되어지며, 따라서 슈퍼 또는 미니슈퍼라는 시스템에 대한 인식과 접근이 요구 되어지는 추세이다.

이론적 배경, 공학응용분야, 프로그래밍, 그

리고 컴퓨터 시스템 등의 요소들이 복합적으로 연결되어지는 CAE는, 설계 업무와의 상호 연계 효율성을 고려한, 재정/행정적 지원, 신뢰성 향상, 그리고 특히 fast turn around time 이 요구되어 진다. 이런 관점에서, CAE 활성화에 대한 기능적 구조, 해석업무의 개념, 전개방향등이 앞서 소개되어진 바 있다⁽¹⁾. 본 글에서는, 주요 운송수단인 항공과 자동차 분야의 기술적 접목현황을 서술하고, 이어서 상기 현황에 따른 엔지니어링 해석 관련 하이 컴퓨팅 파워의 필요성, 효율적인 시스템 선택에 대한 제반사항을 CAE 측면에서 소개코자 한다.

2. 육상 / 항공 운송수단의 선진기술분야

핵심기간 산업으로서 자동차나 항공기(surface & space) 분야의 기술들의 발전추세를 고찰해 보면, 항공분야의 기술들이 점차로 자동차 분야로 이동되고 있음을 잘 알수 있다. 예로써, 널리 알려진 ABS(anti-lock braking system)는 일찌기 항공기의 착륙장치의 제동

장치로써 사용되었던 기술로써, 이제는 자동차의 새로운 제동 개념으로 각광을 받고 있으며, 또한 경량 고강도 기체구조 설계기술 역시 그 개념이 차량 차체설계시 적용되어지고 있음은 주지의 사실이다. 여기서는 육상 및 항공 분야에서 상호 접목되는 응용 및 개발기술 내용을 기초로 하여 (1) 구조분야(vehicle structures), (2) 인간인자(human factors), (3) 전자공학(electronics), (4) 재료(materials)의 관점에서 보다 자세히 알아보기로 한다.

2.1 구조 분야

최근 차량차체개발에 있어서는, 경량화에 따른 고성능 고강도를 추구하는 추세에 있다. 손상 허용 설계법에 의한 기체 및 차체설계기술은 고강성 설계에 많은 진전을 볼 수 있었고, 항공기재료인 알루미늄-리튬 (Al-Li)계 합금의 발달에 의해 용접성이 좋고 내식성이 강한 재질의 이용도 가능해지는 추세이다. 구조물의 강성, 안정성대책, 수명 사이클에 대한 파괴 메카니즘과악은 컴퓨터를 이용한 기술의 발전과 함께, 차량설계에 많은 진전을 보이고 있다 또한 초음속 순항기술은, 차체설계시 공력특성을 고려한 low configuration 개념의 도입을 가능케해서, 지상운송수단의 고속거동 성능의 향상을 이룰 수 있었다. 이와 관련된 개발 및 응용기술분야는 다음과 같다.

● 육 상

- 조립식 경량구조(fabricated lightweight structures)
- 최적화된 차체 및 샤프의 강성
- 개선된 충격 내구성
- 저항력계수를 가진 차체디자인
- 단위구조시스템(modularized structure system)

● 항 공

- 개선된 경량구조
- 초음속 순항기술
- Unducted 터보팬
- Advanced V/STOVL and STOVL

-이중추진 시스템을 장착한 극초음속 항공기

2.2 인간인자

새로운 기능의 기구 설계에 앞서, 사용자들을 위한 조작 편리성, 안전성의 개념이 먼저 추구되어 져야 한다. 이런 추세에 이미 항공기 분야에서 정밀확장제어, 결함 허용제어, 승무원실의 고도자동화등의 관제 시스템의 발전에도모케 했다. 차량 분야에서도 Easy-Driving 개념이 도입된 운항 시스템, 헤드업 디스플레이, 충돌방지 시스템, 그리고 동적 인체 거동 해석에까지 적용되고 있으며, 이를 통합관제할 수 있는 시스템 개념으로 까지 발전되고 있는 경향이다. 이와 관련 적용 또는 개발되고 있는 시스템들을 살펴보면 다음과 같다.

● 육 상

- 자동승객 방호장치 : 에어 백, Passive Restraint
- 운전자와 운항 시스템간의 접속장치
- 헤드업 디스플레이 / Wind Shield Display
- 충돌경고 및 방지장치
- 재구성 가능한 화상처리 및 제어장치

● 항 공

- 인지능력(cognitive capability)을 가진 동적 인체거동모델(dynamic anthropometric model)
- 승무원 운영을 위한 엑스퍼트 시스템

2.3 전자공학

항공기 전자제어기술의 발전은 지상 운송수단의 제어 시스템에 큰 영향을 주고 있다. 제어계 설계에 있어서, 새로운 프로세서의 개발과 함께 음성 및 화상전달 네트워크 기술은 운전자나 조종자로 하여금, 주행/순항중의 정밀통제를 더욱 효율화 하고 있다. 운항 센서와 탑재식 텔레인 데이터 배이스의 혼합기술은 기체/차체의 즉각적인 고장진단(diagnostics), 성능감시(performance inspection) 등을 가능케 해왔다. 이러한 공학 시스템을 성공적으로 개

발, 운용하기 위해서는, 많은 양의 데이터와 이를 이용한 계산과정을 얼마나 효율적으로 통제, 처리하는가에 달려있다고 생각한다. 즉, 실시간 프로세싱과 관련, 감지 기술과 제어 메카니즘은 전자공학의 발전과 함께 운송수단의 성능개선에 큰 영역을 차지하게 될 것이다. 전자공학과와 관련된 선진기술분야는 아래와 같이 나열된다.

- 육 상
 - 소형 탑재식 프로세서
 - 개선된 고장진단
 - 능동 시스템 엔지니어링(active system engineering) - 4WS, ABS, Active Suspension, Active Noise
- 항 공
 - 운항센서와 탑재식 지형데이터베이스
 - 화이버 광학 데이터 버스 시스템
 - 손상허용, 재구성 시스템
 - 음성 및 화상전달을 위한 어댑티브 뉴럴 네트워크(adaptive neural network)

2.4 재료

고부하 기체구조 설계시, 큰 특징으로는, 복합재료의 응용범위가 더욱 확대되고 있다는 점이다. 세부적으로는, 분말야금재료, 카본-카본 복합재료, Al-Li 합금재료, 그리고 세라믹 X 매트릭스 복합재료등의 개발로 인해, 기체 및 파워 트레인 계통의 고속 및 고온성능을 위한 내식성, 내마찰성, 내구성능이 향상되어져 왔다. 이들 재질에 대한 가공기술 관점에서 보면, 정밀주조법, FMS, ACM 성형가공법등의 발전으로 인해, 복잡한 형상을 가진 구조물의 가공이 가능해졌다. 반면, 해석과정의 난점중의 하나인 재질의 비선형에 대한 처리는 아래와 같은 분야와 관련하여 고성능 컴퓨터에 대한 필요성이 대두된다.

- 육 상
 - 고기능 전자재료
 - 소음/진동/충격 흡수재료
 - 표면개량 및 처리

- 내식·내마찰성 신소재
- 항 공
 - Toughened Organic Composites
 - Al-Li과 Metal-Matrix Composites
 - Superplastic 성형
 - 고온상태에서의 세라믹 코팅

앞에서 서술된 내용들의 실용화는 산업체 측면의 생산성과 Cost Effectiveness, 기술의 신뢰성 향상이 당연히 요구된다. 특히 새로운 기술의 적용과 개발과정에서 수반되는 Iterative Loop은 컴퓨터와 실험을 병행하는 검증과정이 필수적이 된다. 이에 따라, CAE를 이용한 구조, 기구, 가공기술등의 분야에서는 난이도와 정도가 높은 해석을 효율적으로 처리할 수 있는 컴퓨팅 시스템에 대한 인식이 우선되어야 한다는 것을 알 수 있다.

3. 전산역학 부문에서의 수퍼 컴퓨팅의 영향

3.1 수퍼 컴퓨팅 시스템의 등장

전산역학은 지난 20년간 획기적인 발전을 거듭해왔으며, 이는 시스템 H/W와 S/W부문의 현 발전 추세로 보아, 향후 급속한 발전이 예상된다. 특히 machine architecture에 있어서 vector array나 멀티프로세서 시스템 분야의 발전은 매트릭스 오퍼레이션 위주의 수치해석에 상당한 영향력을 미치게 될 것이다. 따라서, 새로운 컴퓨팅 시스템의 등장은 산업계 전반에서 급속한 확장추세에 있는 CAE분야의 해석영역에 큰 영향을 초래할 것으로 보인다.

과거에는 처리하기에 많은 난점이 있었던, large displacement, non-linear structural analysis, Navier-Stokes 방정식 등 incremental 또는 iterative process가 요구되는 복잡한 수치해석이 가능해졌다. 결국, 이러한 새로운 영역을 개척하고, 보다 발전시키기 위해서는, 시스템 측면에서의 병렬 수치 알고리즘, 프로그래

밍 strategy와 language의 개발이 병행되어야 한다. 따라서 효율적인 S/W 등장과 엔지니어링 컴퓨팅 파워의 향상은 시작 모델의 제작수를 최소화 시키며, 정확한 해석과 반환 시간의 단축을 의미하게 된다. 새로이 인식되어야 하는 부분들에 대한 몇가지 예를 아래와 같이 열거해 보기로 한다.

- (1) 엔지니어링 문제에 대한 정확한 고찰
 - Fibrous composite 구조에 대한 progressional failure
 - Deep sea mining 관련 hydro-dynamics/structure의 coupling
 - 우주 항공분야 관련 thermal/structural/control의 coupling
- (2) 엔지니어링 시스템에 대한 알고리즘과 해석과정의 개발
 - Conceptual design phase : Simplified/structural algorithm
 - Detailed design phase: Integrated design, synthesis, evaluations

(3) 공학 설계/해석문제의 해결을 얻기 시간과 원가 절감 대책.

이러한 기술적 요구를 해결하기 위한 H/W, S/W의 조건은,

- (1) 다양한 컴퓨팅 파워를 가진 시스템의 구

축,

- High performance computings power: Large complex problem
- Low cost engineering workstation: Relatively small problem

- (2) 다양한 해석코드와 데이터 베이스를 이용하여 각종 연산을 동시에 수행할 수 있는 병렬 프로세서,
- (3) 고속 그래픽, 고속 장거리 통신망, 음성/화상 처리 인터페이스 등의 기능을 가진 단말기,
- (4) 인공지능(A.I)의 개념을 가진 엑스퍼트 시스템,
- (5) 강력한 엔지니어링 데이터 베이스 관리 시스템,
- (6) 턴키 엔지니어링 응용 S/W 시스템 등으로 나타낼 수 있다.

따라서 상기사항을 만족시키기 위해서는, 슈퍼 컴퓨터에 의한 엔지니어링 해석을 고려해야 하는 데, \$1,000만~\$1,500만 상당의 슈퍼 컴퓨터를 보유하고 있는 기업체나 정부기관은 극소수에 불과한 실정이다. 대다수의 기업체들에서는 컴퓨팅 파워를 보강하기 위해, 정부기관의 슈퍼 컴퓨터와 time-sharing 네트워크를

표 1 시스템 별 wall-clock 시간의 비교

컴퓨터	Wall-clock 시간 (분)	
	* vector intensive	** Scalar intensive
CRAY XMP/48/256MW	1.23	7.39
CRAY 2/256MW	2.51	17.45
IBM 3090/200E-VE/128Mb	5.03	13.34
CONVEX C210/128Mb	8.29	24.36
ALLIENT FX80/8/64Mb	12.32	59.08
FPS M64/60/10MW	20.56	27.56
VAS8800/64Mb	106.44	82.07
IBM 4381 MG2R02/32Mb	114.54	108.24

* 대형 선형 문제 (39366 DOF)

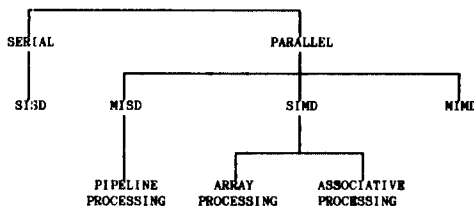
** 비선형 다이내믹 클러시 (4686 DOF)

출처 : HKS, INC.

구성하거나, 일부 섹터를 대여받아 사용하는 경우가 있으나, 이 방안 역시 상당한 비용이 소요된다. 사용자의 모델이나 해석결과와 신뢰성에 관계없이 사용료를 지불해야하는 점과 필요한 시간에 사용해야만 하는 엔지니어링 부서에서는 상당한 불편이 따르게 된다. 최근에 이에 대응하여 SCS(scientific computing system Co.), Convex, Alliant, FPS, Culler Scientific 등의 회사들에 의한 미니 슈퍼 컴퓨터의 등장은 주목할 만 하다. 이러한 컴퓨터들은 슈퍼 컴퓨터와 같은 architecture를 가지고 있으며, 기존의 동급 시스템과 비교하여, 빠른 엔지니어링 계산력을 가지고 있다. 미니 슈퍼 시스템은 슈퍼 시스템에 비해 약 1/10 정도의 가격의 우위성을 들수 있으나, 성능은 일반적으로 떨어진다. 표 1은 bench-mark engineering solution에 대한 wall clock time을 기초로 하여, 시스템 별 벡터와 스칼라 성능을 보여준다.

3.2 슈퍼 컴퓨팅 시스템의 이점

슈퍼 컴퓨터에는 통상 여러개의 프로세서가 설치되고, 계산 목적에 따라 이들 프로세서들이 여러방법으로 조합된다. SIMD, SISD 등의



- SISD: Single Instruction Stream/Single Data Stream
→ Conventional Serial Computer
- SIMD: Single Instruction Stream/multiple Date Stream
- MISD: Multiple Instruction Stream/Single Data Stream
- MIMD: Multiple Instruction Stream/Multiple Data Stream

그림 1 컴퓨팅 시스템의 분류

architecture 시스템은 벡터와 스칼라 프로세서를 동시에 사용하게 된다. 즉, operand를 정의하는 섹터는 스칼라 프로세서에서, 배열 컴퓨테이션은 벡터 프로세서에서 처리하게 된다. 보편적으로 주기억 장치에서 연산처리 장치로 내용을 이동시키고, 재배열하는데 10 사이클 블록이 사용되지만, 수치적 수행을 위해서는 오직 1사이클 블록이 소요된다. 예로써, 두개의 64요소 배열을 처리하기 위해 SIMD 프로세서는 결과까지 74 사이클 블록이 소요되며, 100요소 배열의 경우, 10 사이클이 두번 더 수행되어 개략 120 사이클 블록이 소요된다. SISD와 비교하여 기존의 컴퓨터들은 100 사이클은 계산결과를 위해, 1000 사이클은 내용을 전달하기 위해 사용된다.

Instruction과 데이터의 처리에 따른 계산 시스템의 분류는 다음 그림 1과 같이 나눌 수 있다.

3.3 슈퍼 컴퓨팅 시스템 활용의 예

(1) Optimizing FEA

간단한 구조해석의 문제에 있어서, 구조물은 요소로 구성되며, 요소의 코너를 정의하는 노드들은 displacement와 rotation의 6-DOF를 가지게 된다. 물성치와 요소의 형상이 정의되면 각각 Element의 DOF가 결정되어 요소의 강성 매트릭스가 완성된다. 구조물의 전체 강성 매트릭스는 각각 요소의 강성 매트릭스가 취합되어 이루어지고 다음과 같은 매트릭스 방정식으로 표현된다.

$$[K] \{U\} = F$$

$$[K] = \text{Global Stiffness Matrix}$$

$$\{U\} = \text{Vector, Unknown Displacement \& Rotation at All DOF}$$

$$F = \text{Known Applied Forces}$$

이 경우, 컴퓨터는 대부분의 시간을 변위값을 구하는데 사용하며, 응력이나 변형률은 다음식에서 계산된다.

$$[Ke] \{Ue\} = Se$$

$$[Ke] = \text{Stress vs Displacement Matrix}$$

$[Ue]$ = Vector, Known Displacement at the Node

$[Se]$ = Vector, Unknown Stress Value

스칼라 프로세서의 경우, 상기 식의 해를 구하는데, 한번에 1회 연산을 수행하지만, pipelined 벡터 프로세서는 각 매트릭스 열을 배열로써 전체 열을 계산에 적용하므로 계산시간을 최소화할 수 있다. 따라서 수천개의 Element로 구성된 FE-모델의 경우 요소 또는 전체강성 매트릭스를 구하기 위해 수 백만번의 연산이 필요하게 되는데, 슈퍼 컴퓨팅 시스템의 pipelined 벡터 프로세싱 능력은 수학적 계산에 있어서 상당한 이점을 얻을 수 있게 된다. 대형/선형문제의 범주를 넘어, 재질/형상적 비선형, 진동 소음, moving boundary 등 수치 방정식에 따라 해의 수렴을 위한 강성 매트릭스의 재구성과 연상과정이 복합적으로 되어질 경우, 슈퍼 프로세서의 연산 속도는 필수요건이 된다. 다만, 입출력 자료처리의 경우에는 어떤 프로세서의 경우에도 별다른 변화는 있을 수 없는데, 결국, 사이클 시간과 입출력 서버 시스템의 효율이 처리속도의 중요한 인자가 됨을 알 수 있는 것이다.

(2) 유체 해석

유체거동해석에서도 구조해석과 마찬가지로 노드에 의해 정의된 discrete unit을 사용하여 모델링과 해석이 이루어지지만 정하중하의 고체구조에 사용된 선형방정식과 달리, 유체유동방정식은 질량, Energy, 모우멘텀등의 비선형 수치계산을 수행하여야 한다. 유체거동문제는 일정시간내에서 간격을 두고 해석되는데, 이는 비선형방정식에서 해를 유도하기 위해서는 반복연산이 필요하게 되므로 이들 방정식의 상수들이 각 단계마다 새로이 정의되어야 하기 때문이다.

유동해석을 위한 일반적인 과정을 살펴보면,

(가) Governing 방정식의 초기조건을 정의

(나) 상응하는 경계조건과 초기조건의 정의 ;
압력, 온도, 속도 등

(다) Partial Differential 방정식을 Explicit Integration 방법을 이용하여 Finite Difference/유한요소 매트릭스로 변환

(라) 시간증분에 대한 연속적인 방정식의 계산
(마) 일정시간내에서 평형상태를 이루게 되면 전체해석이 종료된다.

위의 과정에서 알 수 있듯이, 매 단계마다 여러번의 반복이 필요하기 때문에 pipelined 프로세싱이 제한을 받게 되는데, 이는 전단계의 반복결과가 완료되어야만 다음 단계의 해석과정이 연결되기 때문이다. 그러나 유체해석문제의 해를 유도하기 위해 많은 Matrix 연산은 필수적이며, 벡터 프로세싱이 사용되는 이유는 매시간 증분마다 절점변수(nodal variable)에 대한 수렴값을 계산하기 위한 데이터 블럭의 연산이 벡터 연산이기 때문이다. 유체역학해석의 정확도는 노드간의 변화에 대한 local approximation에 따라 좌우되는데 충분히 나누어진 메쉬를 계산할 수 있는 파워를 가진 슈퍼 시스템은 일반 시스템에서 몇 일씩 걸릴 수 있는 문제를 단 몇시간내에 처리할 수 있게 된다.

(3) Kinematics / Dynamics의 경우

Motion transfer의 예측은 수학적 모델을 이용한 2차원 바(bar)나 링크(link)로써 rigid body 모델로 수행되어 왔다. 각 링크의 길이, 무게, inertia, 포지션 등의 입력과 스프링 힌지 또는 슬라이더와 같은 linkage들의 연관관계는 통상적으로 rigid body motion에 제한하여, 마이크로 컴퓨터 수준에서 처리되어 왔다. 반면, flexible body, inertia force, friction 등을 포함한 정도 높은 메카니즘의 distortion과 운동특성예측은 상당한 양의 연산과정이 요구되어지며, 슈퍼 시스템의 벡터, 스칼라 처리능력의 요구가 필요한 단계에 도달했다. 이러한 프로세싱 파워의 필요성은 토탈 시스템, 즉 full vehicle 등의 대형 모델 운동 예측해석과 진동부문을 포함하는 전체 시스템 해석에서 점차 절실화되고 있다.

상기에 언급된 해석분야외에 수치 해석을 기초로한 많은 분야에서 컴퓨팅 파워의 필요성은 충분히 강조되어 질 수 있다고 본다. H/W와 관련한 S/W측면은 architecture의 발전에 따라 코드의 재구성이 불가피 할 것으로 보여진다. MIMD 프로세싱 시스템의 경우 parallel 프로세서내에서 S/W의 각 섹션별로 독립적으로 수행되어야만 그 효율성을 찾을 수가 있기 때문이다. 대부분의 S/W는 하나의 프로세서

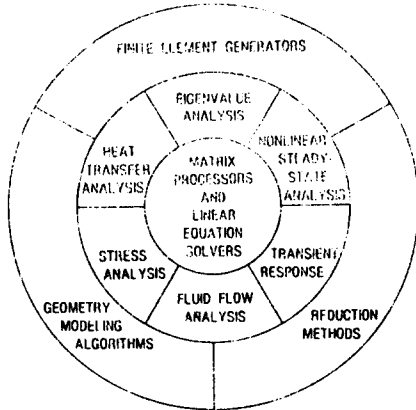


그림 2 수치해석분야 분류

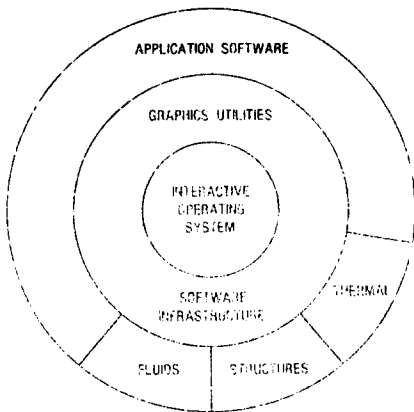


그림 3 엔지니어링 소프트웨어의 분류

상에서 수행될 수 있도록 구성되어 있으므로 슈퍼 시스템의 사용을 위해서는 S/W자체가 완전히 재구성되어야 한다. 이런 재구성에 소요되는 일의 양은 시스템과 S/W를 사용코저 하는 공학분야의 목적에 따라 좌우된다고 볼 수 있다. 향후의 수치 알고리즘 엔지니어링 소프트웨어 시스템은 아래 그림 2,3과 같은 구성이 될 것이다.

4. 맺음말

이상에서 본 바와같이 기술분야의 발전이 거듭됨과 병행하여, 산업계의 설계 해석 부서에서 CAE의 중요성은 컴퓨팅 시스템과 더불어 더욱 강조되고 있다. 슈퍼 컴퓨팅 파워의 필요성은, 첫째, applied mechanics의 advanced 해석분야, 둘째, 대형 엔지니어링 문제해석 결과처리 (data acquisition & management), 셋째, real time response와 integrated 엔지니어링 시스템개발 (CAD/CAM 데이터와의 연계성) 등의 측면에서 나타난다고 볼 수 있다.

원가, 안전성 그리고 신뢰성은 모두 만족시키는 효율적인 방안으로서는 대형 슈퍼 컴퓨터와 마이크로 컴퓨터의 중간 역할을 할 수 있는 hybrid type의 미니 슈퍼 시스템, 즉 departmental highly-parallel 시스템의 등장 이 필수적이라고 할 수 있다. 또한, 산업계의 설계 해석 지원과 관련, 구조, 유체, 동력학 등의 분야별 응용 문제와 numerical formulation 등의 특성에 적합한 시스템 configuration과 프로세싱이 개발되어야 한다. 이는 실수요자의 상황에 맞는 "목적성 전용 machine"의 등장이 가능해 질 것으로 판단된다. 향후, vectorization 그리고 parallelization 된 소프트웨어의 가용성이 극복해야 할 큰 과제로 남아 있다고 본다.

참고 문헌

(1) 이성철, 1990, "Application of

Computational Mechanics in Engineering Practise (I) -자동차산업계의 CAE응용과 활성화 방안”, 대한기계학회, 고체역학부문 학술강연회.

- (2) Parris, R.A., 1987, “The Integrated Use of Supercomputers and Engineering Workstation to Maximize Productivity”, The 1st International Conference on Computer Aided Design, Manufactur and Operation in Automotive Industries (COMPATO 87).
- (3) Noor, A.K., Storaasli, O.O. and Fulton, R. E., 1983, “Impact of New Computing System on Finite Element Computation”, ASME.
- (4) Automotive Engineering-Electronics, 1990, “Mobility Technology Tomorrow”, Automotive Engineering.

