

슈퍼컴퓨터를 이용한 유한요소해석

(Finite Element Analysis on Supercomputers)

이 재 석*

1. 서언

컴퓨터의 출현과 더불어 발전한 유한요소해석법은 구조해석을 중심으로 공학의 제반 해석문제에 폭 넓게 활용되어 왔다. 특히 70년대 초부터 NASTRAN, SAP을 포함한 일반목적의 유한요소해석프로그램들이 개발, 보급되면서, 구조해석분야는 비약적인 발전을 보게 되었고 최근에는 초기의 선형해석기능 외에 다양한 비선형해석기능 및 Pre, Post Processing 기능을 포함한 대형시스템(MSC / NASTRAN, ABAQUS, MARC, ANSYS, ADINA)들이 보급됨에 따라 더욱 가속화되고 있다.

유한요소법은 이론상으로 확립되었다 하더라도 본질적으로 컴퓨터의 성능에 따라 이용범위의 제한을 받게 되는 데 초기 컴퓨터의 경우 연산속도 및 기억용량의 한계로 인하여 단순, 선형문제 위주로 적용되었으나 고속연산기능 및 대규모 기억용량을 가진 컴퓨터들이 개발, 보급됨에 따라 대형, 비선형 문제로의 적용이 가능하게 되었다.

한편 유한요소해석프로그램들의 적용대상이 최근들어 다(多) 자유도의 비선형문제로 확대됨에 따라 컴퓨터의 계산속도가 특히 중요한 제한조건으로 대두되기 시작하였으며 급속성형해석, 자동차 등의 충돌해석(자유도가 2만-6만), 토질 및 콘크리트등의 점소성해석과 더불어 항공기, 터빈

등의 열응력해석 및 동적해석[1]등에 있어서는 막대한 계산시간으로 인하여 해석의 효율성에 대한 문제가 제기되고 있다. 따라서 슈퍼컴퓨터를 포함하여 고속연산기능을 가진 병렬처리컴퓨터를 이용하여 유한요소해석을 수행하여야 할 필요성이 증가하고 있다.

슈퍼컴퓨터란 현존하는 컴퓨터중에서 처리속도가 가장 빠르고 기억용량이 큰 초고속컴퓨터를 말하며 보통 계산능력이 초당 5억회에서 100억회(대형컴퓨터, 500만회)이고 기억용량이 256MB 이상이며 벡터처리가 가능한 컴퓨터를 의미한다.

초기의 슈퍼컴퓨터로는 CRAY1, CYBER 205, Fujitsu VP100, VP200 등이 있으며, CPU가 1개로서 Pipelined Vector Processor를 이용하여 고속연산이 가능했다.[2]

한편 CPU가 1개인 Single Processor 컴퓨터의 계산속도의 한계는 현재로서는 1000MFLOPS (Million Floating Point Operations Per Second: 초당 100만회의 실수연산) 정도이므로 CPU가 여러개인 Multiprocessor 컴퓨터의 개발 및 활용이 계산속도의 증가를 위한 해결책으로 인식되어 왔으며 CRAY X-MP(2-4 CPU)를 거쳐 최근에 개발된 CRAY2(4CPU), ETA10(8CPU)등 MIMD(Multiple Instruction Stream Multiple Data Stream) Multiprocessor 슈퍼컴퓨터들이 이러한 추세를 반영하고 있다.

88년 9월중에 한국과학기술원 시스템공학센터에 현존하는 슈퍼컴퓨터중 최상위 성능을 가진 CRAY2S가 설치됨에 따라 국내에도 슈퍼컴퓨터

*정희원, 한국과학기술원 시스템공학센터, 선임연구원

시대가 열리게 되었으며 따라서 본고에서는 CRAY2S의 시스템개요 및 응용소프트웨어에 대하여 소개하고 슈퍼컴퓨터를 이용한 유한요소해석에 관하여 간략히 기술하고자 한다.

2. CRAY-2S 슈퍼컴퓨터 시스템개요

가. Mainframe 구성

CRAY-2S / 4-128 시스템의 Mainframe은 각 독립된 처리능력을 가진 4개의 Background Processor와 한개의 Foreground Processor, 그리고 4개의 CPU가 각각 또는 서로 공유하여 사용할 수 있는 128 Mega Word의 Common Memory로 구성된다. 또한 4개의 Channel Loop이 있어 Background Processor, Foreground Processor, Front-end, Disk Storage Unit, Tape Controller, Common Memory와 연결되어 있다.

Foreground Processor는 Common Memory, Background Processor, Disk Controller Front-end Processor 및 자체 Foreground Processor 사이에서 발생하는 전반적인 시스템활동을 제어하며 Background Processors는 각각 Control Section과 Computation Section을 가지고 있고 Vector Processing 및 Scalar Processing이 가능하다.

SRAM(Static RAM)으로 구성된 128Mega Word의 방대한 Common Memory 및 4개의 CPU를 사용하여 이용자들의 많은 작업과 큰 기억용량을 필요로 하는 프로그램들을 효과적으로 Multiprogramming, Multiprocessing 할 수 있는 것이 CRAY 2S의 독특한 특징이라 할 수 있다. (그림 1) [3]

나. 하드웨어 구성 및 성능

(1) CPU

- 갯수:4
- 성능:Scalar(490MIPS), Vector(1942 MF-LOPS)
- Registers:Scalar용(S) 64 bit * 8
Vector용(V) 64 bit * 64 element * 8
Address용(A) 32 bit * 8
기타 Control Register 다수

- Clock Cycle Time : 4.1NS
- Word Structure : 64 bit * 8bit

(2) Main Memory

- Common Memory : 128 MWords
- Local Memory / CPU : 16, 384 Words
- Cycle Time :55 NS
- 대역폭 :16 Gbits / sec

(3) 보조기억장치(DASD(DD-40))

- 용량(Formatted) : 5,297 Gbytes * 8
- Sectors / cylinders : 912
- Sectors / track : 48
- Bytes / sector : 4,096
- Bytes / track : 196,608
- Transfer rates :86 Mbits / sec

(4) Tape

- Reel Tape
- Units : 4
- Transfer rate : 200 IPS
- Density : 1600 / 6250 BPI
- ACS(Automated Cartridge Subsystem)
- Drives : 8
- 용량 / Cartridge : 200MB(4KB / Block 일때)
- Tape Speed : 79 IPS(Read / Write), 158 IPS (Rewind and Search)
- Tape Density : 37,871 Bytes / Inch

다. 시스템 소프트웨어

1) UNICOS Operating System[4]

UNICOS는 AT & T의 UNIX System V Release 3.0을 기본으로 하고 Fourth Berkeley Software Distribution(4.2 BSD)을 포함하고 있는 CRAY-2S시스템의 Operating System이다. UNICOS는 UNIX System V를 기초로 하였기 때문에 개념, 구조 및 기능은 본질적으로 UNIX와 같으나 표준 UNIX는 Micro와 Maincomputer를 사용하기 위하여 설계된 것이므로 슈퍼컴퓨터의 성능을

최대로 발휘할 수 있도록 여러가지의 기능을 향상 또는 개발시켰다.

UNICOS는 본래 CRAY-2를 위하여 설계되었으나 1983년에 CRAY사 제품의 현재 또는 미래의 모든 슈퍼컴퓨터의 표준 Operating System으로 결정하였으며 현재 CRAY-1, CRAY-2, X-MP, Y-MP 등에서 가동된다.

UNICOS에서 향상 개발된 부분은 다음과 같다.

(1) Networking

CARY 컴퓨터는 다른 컴퓨터(Network

Gateways)와 같이 사용되므로 서로 통신할 수 있는 새로운 Protocol이 필요하여 TCP/IP(The Transport Control Protocol/Internet Protocol), USCP(UNICOS Station Call Processor)등 Networking 소프트웨어를 추가하였다.

(2) Multiprocessing과 Multitasking

CRAY 컴퓨터의 복수의 CPU를 사용하여 최대의 성능을 올릴 수 있도록 기능을 추가하였다. [5]

(3) Batch Processing

표준 UNIX는 대화식 작업위주이므로 Batch

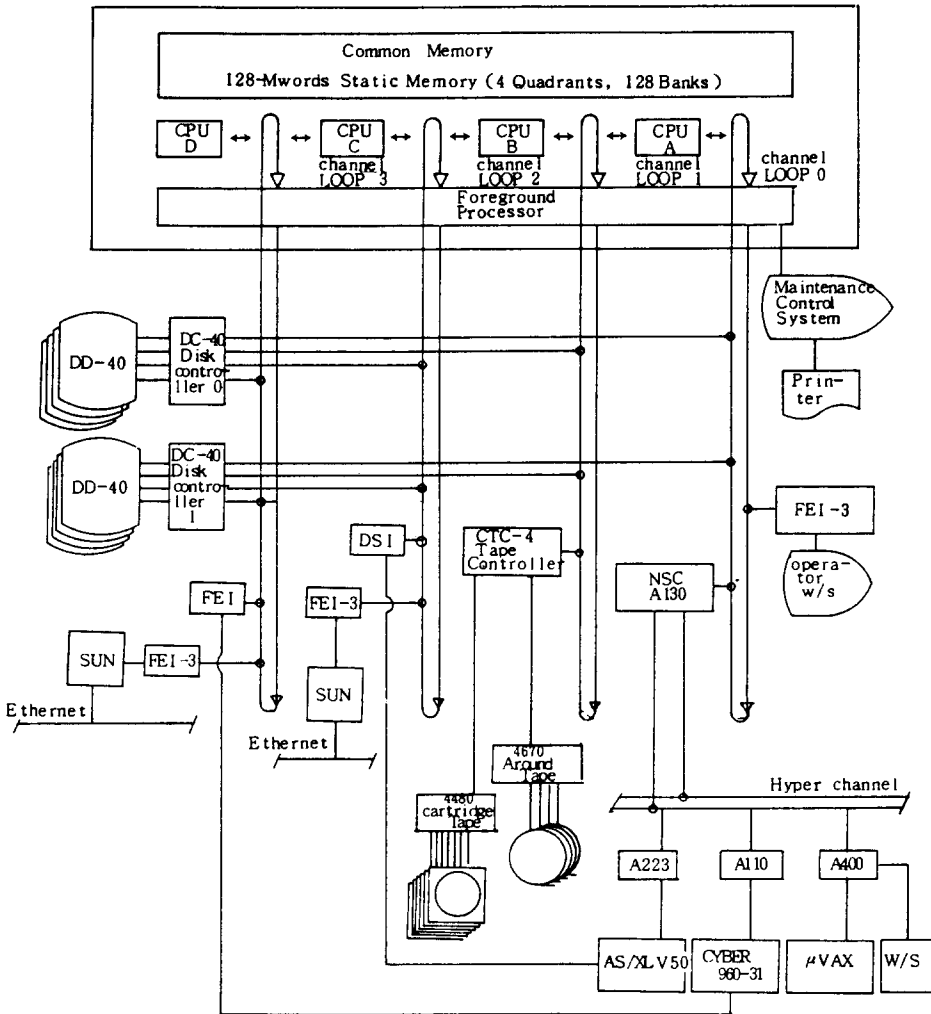


그림 1. CRAY-2S/4-128 SYSTEM CONFIGURATION

Processing 기능(Network Queuing System: NQS)을 개발하였다.

(4) CRAY FORTRAN(CFT, CFT2, CFT77)

CRAY 컴퓨터 상에서 FORTRAN이 가장 많이 사용되는 Compiler이므로 효율적으로 작동할 수 있도록 기능을 추가하였다.

(5) Accounting

CRAY 사용자가 요구하는 Accounting에 관한 정보를 제공할 수 있도록 향상시켰다.

(6) Security Feature

System Integrity와 Sensitive Information의 보호를 위하여 Security Feature를 강화시켰다.

2) UNICOS(4.0)의 구조

UNICOS는 10,000 Line 정도의 C 언어로 짜여진 Kernel과 Shell 그리고 사용자에게 서비스를

제공하는 많은 Utility와 Language Compiler, Library들로 구성되어 있다.

3. CRAY2S 응용소프트웨어

현재 CRAY 시스템(CRAY-1, CRAY X-MP, CRAY2)에서 운용되는 응용소프트웨어(S/W)는 400여개가 있는데 그 중 CRAY2S에서 사용할 수 있는 S/W는 130개 정도이다.

향후 5년간에 걸쳐 각 분야별로 슈퍼컴퓨터의 효율적인 활용 및 국내 과학기술수준의 제고에 도움이 되는 응용 S/W들이 도입될 예정이며 현재 도입이 완료되었거나 도입예정인 응용 S/W들의 개요는 표(1)(2)와 같다. [6]

(표 1) CRAY사 공급 응용 소프트웨어 목록('88년도 도입예정)

분 야	CRAY사 공급 소프트웨어	기 능
기계 및 구조 해석	BOPACE 3D	A non-linear stress analysis program by FEM(isoparametric element)
	DYNA 3D	An explicit 3-D FEM code for analysing the large deformation dynamic response of inelastic solids
	SAP IV	A structural analysis FEM code for the static and dynamic response of linear 3-D systems
전기 전자	IEEE Signal Processing Package SPICE 2G2.5	A package of signal processing programs and subroutines Simulation program for nonlinear DC, nonlinear transient, and linear AC analysis
위 자력	RELAP/MOD2	To describe the behavior of a light water subjected to postulated transients
화학	MOPAC 4.0	A semi-empirical molecular orbital program for the study of chemical reaction
영상처리	CSADIE	A file-oriented software system for the manipulation of digital image data
	GLDLOT	A Calcomp compatible plotting package allowing Gould 5000 printer/plotter as a graphics output devices
	MOVIE.BYU†	A graphics system for the display and manipulation of data representing math., topological, architectural model
	OASIS	A s/w tools for the production of both still and animated computer generated images
	SKETCH	Used for generate perspective projections of 3D objects with hidden lines removed
수학 통계	AMOSLIB	Including routines: the error fn., gamma fn., beta fn., Bessel fn., Airy fn., sine/cosine integral, etc.

	ARRIBA	Solving small integer programming problems by several algorithms
	BATCHLP	A linear programming system which employs a modified SIMPLEX methods in an in-memory solver
	EISPACK	A complete package of approximately 70 subroutines for solving the standard eigenproblems
	MATHEMATICAL/SUB	Supplied by Cray Research, Inc., representing a collapsing of several separate subroutines libraries
	LINPACK/SCILIB	A complete package of Fortran routines for analysing and solving linear algebraic equations. LINPACK is a part of SCILIB
	REDUCE	A system for carrying out algebraic operations accurately, no matter how complicated the expressions become
	SCIPOPT	A portable Fortran emulation of SCILIB
언어	PROLOG	A nonprocedural programming language based on the first-order predicate calculus

(표 2) '88년도 도입예정 응용 소프트웨어 목록

분 야	PROGRAM	개 발 사	기 능
구조	ABAQUS	Hibbit, Karlsson & Sorenson	A general purpose, FEM code designed for linear/non-linear engineering analysis
	ADINA	ADINA Research & Development	FEM program for routine and advanced engineering analysis
	MSC/NASTRAN	MSC Ltd.	Large scale, general purpose program for engineering analysis by FEM
전기전자	HSPICE	Meta Software, Inc.	Analog electronic circuit simulator
	MAGNA/FIM	Century Research Center Corp.	Electro-magnetic field analysis program with the finite integral equation
	HILO 3	GenRad, Inc.	For broad range of IC and PCB design, modular system architecture
	UM-SPICE	Univ. of Minnesota	Gallium arsenide circuit simulator using Takeda capacitance model
원자력	COBRA41	National Energy Software	Steady-state and transient thermal-hydraulic analysis of rod bundle nuclear fuel elements and cores via the subchannel analysis method
유체	FIDAP	Fluid Dynamics International	Package for the numerical simulation of fluid and heat transfer (by FEM)
	FLOTRAN	Compulfo	FEM code for 2-and 3-D fluid flow and heat transfer problems
	FLOW3D	AERE Harwell Lab.	A finite difference code for the prediction of 2D and 3D laminar and turbulent flow and heat transfer
	PHOENICS	CHARM. Ltd.	A finite volume method code for the simulation of fluid flow, heat transfer, mass -

	VSAERO	Analytical Method, Inc.	transfer and chemical reaction For the non-linear aerodynamic characteristics in subsonic flow
화학	AMBER DISCOVER	Univ. of California BIOSYM Technologies, Inc.	A macromolecular simulation package A full featured molecular simulation program for application in computer assisted design
	GAUSSIAN 86	Carnegie-Mellon Univ.	A quantum chemistry package with a broad range of uses in chemical, pharmaceutical sciences
	IDEAS	National Cancer Institute	A package for analysing sequence and structural data of proteins, nucleic acids
그래픽	TAURUS	Technical Numerical - Algorithms Group, Inc.	It plots contours, time history, deformed shapes for files generated by the LLNL, NIKE3D, DYNA3D, TACO3D and GEMINI.
	DISSPLA	ISSCO	For data analysis, representation, diagramming, contouring, mapping, simulation, etc.
	MOVIE. BYU V6	Brigham Young Univ.	A general purpose graphics system for the display and manipulation of data
	PATRAN II	PDA Engineering	An open-ended, 3-D, integrated CAE environment that links design and analysis
기상	NCAR-GKS	NCAR	A meta-code with high level graphics utility routines for generating a wide variety of pictures
	UNIRAS	UNIRAS A. S.	For data Presentation, topological mapping, geological mapping, petroleum and mining industry applications
수학통계	NAG	Technical Numerical - Algorithms Group, Inc.	Fortran Lib. available areas are linear algebra, ordinary-partial differential eq., FFT, interpolation, curve/surface fitting, optimization, numerical integration, etc.
	IMSL	IMSL	A large library for mathematical and statistical program development
인공지능	CLIPS	COSMIC	An expert-systems-building tool

4. 슈퍼컴퓨터를 이용한 유한요소해석

슈퍼컴퓨터에서 유한요소해석을 수행할 경우, 계산속도를 증가시키기 위해서는 슈퍼컴퓨터의 벡터처리기능을 최대한 활용할 수 있도록 프로그램을 수정(Vectorization)하여야 하며 가장 일반적인 접근방식으로는 프로그램의 기본Algorithm은 유지하면서 문법사항을 Vector Processor에 적합하게 수정하는 Syntactic Vectorization을 들

수 있는데 CRAY1(COS)용 MSC/NASTRAN 및 FPS Scientific 컴퓨터용 ANSYS의 개발, AS/XL Vector 컴퓨터용 MSC/NASTRAN의 개발 등이 좋은 예이다. [7]

일반적으로 대형 Code의 개발에는 많은 자원이 소요되므로 기존프로그램의 Syntactic Vectorization이 유리한 점은 있으나 Vector Processor의 기능을 충분히 이용하는 데는 한계가 있으므로 유한요소해석기법의 Algorithm 자체를 Vector

화 하는 Algorithmic Vectorization 기법에 대한 연구가 진행되고 있으며, 이 경우 CPU 소요시간 면에서 10배이상, I/O 작업시간 면에서는 100배 정도까지 계산 효율을 증가시킬 수 있는 것으로 알려져 있다. [11]

최근의 추세로 볼 때 유한요소해석기법의 효율적인 적용에 필요한 계산속도는 비약적으로 증가할 전망이다. 비선형동적해석 문제의 경우를 예로 들면 최대 10^8 MFLOPS 정도의 계산속도가 필요할 것으로 추정되고 있다. [8]

Single Processor 컴퓨터의 계산속도의 한계는 현재로는 10^8 MFLPOS 정도이므로 Multi-Processor 컴퓨터의 활용이 계산속도 증가를 위한 해결책으로 인식되고 있으며 CRAY2(4 Processor), ETA10 (8 Processor) 등 MIMD Multiprocessor 슈퍼컴퓨터들이 이러한 추세를 반영하고 있다.

반면에 현재 널리 활용되고 있는 대부분의 유한요소해석 프로그램은 종래의 순차처리컴퓨터 (Sequential Computer)를 기준으로 개발되었으므로 Multiprocessor 컴퓨터의 계산기능을 충분히 활용하기에는 한계가 있다. 따라서 기존 프로그램의 Vector화와 병행하여 Multiprocessor 컴퓨터의 구조에 적합한 병렬처리 유한요소해석기법 및 프로그램의 개발에 대한 관심이 증가하고 있다.

병렬처리유한요소해석 기법에 대한 연구는 Asynchronous MIMD 컴퓨터(상호 연결된 다수의 Processor로 구성되고 각 Processor는 독립적으로 Instruction을 수행하거나 또한 프로그램의 처리가 가능한 컴퓨터)을 대상으로 연구가 수행되고 있으며 이러한 컴퓨터로는 CM(A Modular, Multi-micro processor), NASA Langley Research Center의 Finite Element Machine 및 FLEX 32, HEP Multi-processor Computer를 포함하여 CRAY2, ETA10 등 슈퍼컴퓨터를 들 수 있다. [9]

유한요소법은 본질적으로 이론상 병렬처리를 수행할 수 있는 부분이 많으며(유소강도매트릭스의 생성, 응력의 계산등) 이 외에도 강도매트릭스의 조합, 평형방정식의 계산 또는 동적해석의 경우 시간적분(Time Integration) 기법 등에서 병렬계산을 활용할 수 있는 여지가 많으므로

비교적 Multiprocessor의 장점을 활용하기가 유리하다. 반면에 Multiprocessor를 이용할 경우 Processor 간의 작업분담(Load Balancing)이나 통신(Interprocessor Communication) 문제의 효과적인 처리가 가장 어려운 문제로 부각되고 있으므로 이들이 Multiprocessor의 효율에 미치는 영향을 최소화 할 수 있는 알고리즘의 개발이 필요하다.

외국의 경우 80년대에 들어 CM, FEM, BBN Butterfly, Multimax 등의 Multiprocessor를 대상으로 병렬계산 기법에 대한 연구가 꾸준히 추진되어 왔으며 [10] 더불어 유한요소해석 분야에서 해석과정의 일부계산(요소강도매트릭스 계산, 평형방정식의 계산)을 병렬로 처리하거나 또는 Multiprocessor를 위한 유한요소해석 프로그램을 새로이 개발하려는 연구가 진행되어 왔다. [11-17]

한편 유한요소해석분야의 병렬계산기법응용에 대한 연구사례를 분석해 보면 부분적으로 이론치에 근접한 성공적인 연구결과도 발표되고는 있으나 특정한 H/W를 대상으로 일부 특정문제의 적용에 국한된 것이 많으며 상당수는 Load Balancing 문제나 Interprocessor Communication에 의한 Overhead로 인하여 실험적인 연구결과에 그치는 경우가 많다. [18] 또한 일부 실험적인 병렬처리 컴퓨터용 유한요소해석 프로그램이 개발, 보급되지는 않은 상황이다. 한편 CRAY2S, ETA10 등 Multiprocessor 슈퍼컴퓨터(연산속도 1GFLOPS 이상)를 대상으로 한 병렬처리유한요소해석에 관한 연구는 아직 발표되지 않은 상황이나 앞으로 많은 연구가 기대되고 있다.

참 고 문 헌

1. C. Marino, Super Computer Applications in Automotive Research and Engineering Development, Proceedings of the International Conference on Super-computer Applications in the Automotive Industry, 1986
2. Kai Hwang, Faye A. Briggs, Computer Architecture and Parallel Processing, McGraw Hill, 1984
3. CRAY Research, Inc., The CRAY-2 Series of Computer Systems, 1988

4. CRAY Research, Inc., UNICOS Command Language Workbook, 1988
5. CRAY Research, Inc., Training Workbook, CFT 77 on CRAY2, 1988
6. CRAY Research, Inc., Directory of UNICOS Applications Software for CRAY Supercomputer, 1988.1
7. J.F. Gloudeman, "The Evolution of MSC / - NASTRAN and the Supercomputer for Enhanced Performance", Proceedings of the NATO Advanced Workshop on High Speed Computation, 1984
8. Olaf Storaasli, "Structural Dynamics Analysis on a Parallel Computer, The Finite Element Machine", Computer & Str. Vol 26. No 4 pp551-559, 1987
9. 유승화, "Distributed Systems", Summer School in Computer Science, 한국과학기술원, 1988.7
10. Kenneth M. Will, Electronic Computation, Proceedings of the Ninth Conference on Electronic Computation, pp 680-700, 1988.2.
11. R.D Vanluchene, et at., "Large Scale Finite Element Analysis on a Vector Processor", Computer & Str., Vol24 No 4 pp626-635, 1986
12. P. Zave and G.E. Cole, Jr. "A Quantitative Evaluation of the Feasibility of, and Suitable Hardware Architectures for, an Adaptive, Parallel Finite Element System", ACM Trans. Math. Software 9 (3), 271-292, 1982.
13. Senol Utku, "On Nonlinear Finite Element Analysis in Single, Multi-and Parallel Processor", Com. & Str. Vol 15, No 1 pp 39-47, 1982
14. Kincho H. Law, "A Parallel Finite Element Solution Method", Com. & Str. Vol 23 No 6 pp 845-858, 1986
15. Henno Allik, "Finite Element Analysis on the BBN Butterfly Multiprocessor", Com & Str. Vol 27 No 1 pp 13-21, 1987
16. Dimitris Zois, "Parallel Processing Techniques For FE Analysis: Stiffness, Loads and Stress Evaluation", Com & Str. Vol 28 No 2, pp 247-260, 1988
17. Charbel Farhat, "A Parallel Active Column Equation Solver", Com. & Str. Vol 18 No 2 pp 289-304, 1988
18. IEEE Computer Society, Proceedings on First International Conference on Supercomputing Systems, pp 205-264, 1985. 12