

유한요소해석에서의 슈퍼컴퓨터 및 병렬계산 이용 (Supercomputing and Parallel Computing in Finite Element Analysis)

이 재 석*

1. 서 언

컴퓨터의 출현과 더불어 발전한 유한요소해석법은 구조해석을 중심으로 공학의 제반문제 해석에 폭넓게 활용되어 왔다. 특히 70년대 초부터 NASTRAN, SAP을 포함한 일반목적(General Purpose)의 유한요소해석 프로그램들이 개발되어 보급되면서, 구조해석분야는 비약적인 발전을 하게 되었고 80년대에 들어 초기의 선형해석기능 외에 다양한 비선형해석기능 및 Pre & Post Processing 기능을 포함한 대형 구조해석 프로그램(MSC/NASTRAN, ABAQUS, MARC, ANSYS, ADINA, DYNA3D, PAM/CRASH)들이 보급됨에 따라 더욱 가속화되고 있다.

유한요소법은 이론상으로 확립되었다 하더라도 본질적으로 컴퓨터의 성능에 따라 이용범위의 제한을 받게 되는 데 초기의 컴퓨터의 경우 연산 속도 및 기억용량의 한계로 인하여 단순, 선형문제 위주로 적용되었으나 고속연산기능 및 대규모 기억용량을 가진 컴퓨터들이 개발되어 보급됨에 따라 대형, 비선형 문제로의 적용이 가능하게 되었다.[1]

한편 유한요소해석 프로그램들의 적용대상이 최근 들어 다수의 자유도를 가진 비선형문제로 확대됨에 따라 컴퓨터의 계산속도가 특히 중요한 제한조건으로 대두되기 시작하였으며 급속성형해석, 자동차등의 충돌해석 및 차체진동 민감도해석

(자유도가 2만-20만)[2], 토질 및 콘크리트등의 점소성해석과 더불어 항공기, 터빈등의 열응력해석 및 동적해석등에 있어서는 막대한 계산시간으로 인하여 해석의 효율성에 대한 문제가 제기되고 있다. 따라서 슈퍼컴퓨터를 포함하여 고속연산기능을 가진 Multiprocessor 컴퓨터를 이용해서 유한요소해석을 수행해야 할 필요성이 증가하고 있다.[3, 4]

슈퍼컴퓨터란 현존하는 컴퓨터중에서 처리속도가 가장 빠르고 기억용량이 크며 병렬처리를 할 수 있는 초고속컴퓨터를 말하며 어느 시대나 존재하는 상대적인 개념으로 파악할 수 있으나 최근의 기준으로 볼 때 보통 계산능력이 초당 5억회에서 200억회의 실수연산(0.5-20 GFLOPS)이고 기억용량이 100MB 이상이며 벡터처리가 가능한 컴퓨터를 의미한다.[5, 6]

초기의 슈퍼컴퓨터로는 Cray-1, Cyber 205, VP 100, VP 200등이 있으며, 중앙연산장치(CPU)가 1개로서 Pipelined Vector Processor를 이용하여 고속연산이 가능했다.[7]

한편 CPU가 1개인 단일프로세서(Single Processor) 컴퓨터의 계산속도의 한계는 현재로서는 1GFLOPS(Giga Floating-point Operations Per Second; 초당 10억회의 실수연산) 정도이므로 CPU가 여러개인 다중프로세서(Multiprocessor) 컴퓨터의 개발 및 활용이 계산속도의 증가를 위한 해결책으로 인식되어 왔으며 Cray X/MP(2-4 CPU)를 거쳐 80년대 후반부터 보급된 Cray-2(2-4 CPU), Cray Y/MP(1-8 CPU), VP-2000 Series

* 한국과학기술연구원 시스템공학연구소 CAE 연구실

(1-4 CPU) 등 MIMD(Multiple Instruction Stream-Multiple Data Stream) 다중프로세서 슈퍼컴퓨터들이 이러한 추세를 반영하고 있다.

88년 9월중에 한국과학기술연구원 시스템공학연구소가 당시의 슈퍼컴퓨터중 최상위 성능을 가진 Cray-2S(4 CPU, 1 GB)를 설치함에 따라 국내에도 슈퍼컴퓨터 시대가 열리게 되었으며, 90년 10월에 산업계에서는 최초로 기아자동차에서 Cray Y/MP (1 CPU)를 설치한 이래 최근에 국방과학기술연구소, 삼성그룹에서도 Cray Y/MP 계열의 슈퍼컴퓨터를 설치하여 과학기술 계산 및 공학해석에 폭넓게 활용할 전망이다. 따라서 본고에서는 슈퍼컴퓨터의 정의 및 분류, 특징과 보급현황에 대하여 알아보고 슈퍼컴퓨터 및 병렬처리기술을 이용한 유한요소해석에 관하여 간략히 기술하고자 한다.

2. 슈퍼컴퓨터의 개요

2.1 슈퍼컴퓨터의 정의

슈퍼컴퓨터란 현존하는 컴퓨터중 가장 빠르고 기억용량이 큰 컴퓨터를 말한다. 그러나 슈퍼컴퓨터의 성능범위, 저장능력, 가격대의 구분이 뚜렷하지 않고 상대적인 개념으로 파악될 뿐아니라 컴퓨터 부문의 급속한 기술발전추세 때문에 슈퍼컴퓨터의 명확한 정의는 쉽지 않은 형편이다. 1946년에 최초의 전기식 컴퓨터인 ENIAC이 개발된 이래 이미 60년대 말에 벡터처리(Vector Processing)와 병렬처리(Parallel Processing)등의 특징을 가진 슈퍼컴퓨터의 전신들이 등장하였다. 벡터처리 컴퓨터로는 Control Data Corporation(CDC)의 Star-100을, 병렬처리 컴퓨터로는 Burroughs Corporation의 Illiac-IV를 들 수 있다. 하지만 이 컴퓨터들은 상업적인 면에서 성공하지 못하였으며 1976년 Cray-1이 등장하여 성공을 거두면서 80년대에 Cyber-205, VP-200, S-820, SX-2, Cray-2, Cray-Y/MP, ETA-10(생산중단) 등의 제품이나와 본격적인 슈퍼컴퓨터의 경쟁체제에 들어가게 되었다. 컴퓨터 성능의 발달로 슈퍼컴퓨터의 정의도 시대에 따라 변해가고 있는데, 80년대 중반만 해도 초당 1억회의 실수연산능력(100 MFLOPS : Million Floating-point Operations Per Second)

을 가지며 기억용량이 50-100MB 정도면 슈퍼컴퓨터로 분류되었으나[8] 최근 슈퍼컴퓨터의 성능이 더욱 향상되고 제품이 다양해짐에 따라 다음의 사항이 슈퍼컴퓨터의 조건으로 일반적으로 인식되고 있다.[9]

- 연산능력 : 초당 최고 5-300억회의 실수연산능력(0.5-30 GFLOPS, 대형컴퓨터의 20-1,200배)
- 주기억용량 : 0.1-100 GB(Giga Byte)
- 가격 : \$ 700만 - \$ 3,000만

2.2 슈퍼컴퓨터의 분류

컴퓨터를 분류하는 데는 여러 방법들이 있겠으나 Flynn이 제시한 방법이 널리 이용되고 있으며, 이 분류방법은 컴퓨터 시스템내의 명령어 흐름과 데이터 흐름의 구조에 따라 다음과 같이 4가지로 분류한다.[7]

- SISD(Single Instruction stream-Single Data stream)
- SIMD(Single Instruction stream-Multiple Data stream)
- MISD(Multiple Instruction stream-Single Data stream)
- MIMD(Multiple Instruction stream-Multiple Data stream)

대부분의 스칼라처리(Scalar Processing) 방식의 일반 컴퓨터들이 SISD형에 속하고, MISD형은 이론적으로 가능하나 실제로 구현된 컴퓨터는 발표되지 않았다. SIMD형은 배열프로세서(Array Processors)로 이루어진 컴퓨터를 포함하여 주로 단일프로세서 슈퍼컴퓨터가 여기에 속하며, 다중프로세서(Multiprocessor)를 쓰는 병렬처리 슈퍼컴퓨터들은 MIMD형 슈퍼컴퓨터에 속한다. 슈퍼컴퓨터는 기존의 시스템에 단계적으로 하드웨어 및 소프트웨어를 첨가시켜 SIMD나 MIMD형태로 발전되었고, 현재 대부분의 슈퍼컴퓨터들은 여러 개의 연산장치(Function Unit)를 가지고 단일프로세서 또는 다중프로세서에 의해 병행스칼라(Concurrent Scalar)연산과 벡터처리를 하고 있다.

2.3 슈퍼컴퓨터 하드웨어 특징

현재까지 개발된 슈퍼컴퓨터가 채택한 주요한 몇가지 하드웨어적 처리방식은 아래와 같다.

- 파이프라인 프로세서(Pipelined Processor)
- 벡터 프로세서(Vector Processor)
- 배열 프로세서(Array Processors)
- 다중프로세서(Multiprocessor)

파이프라인(Pipeline)의 개념은 1960년대 초부터 메모리 접근과 명령이 해석에 적용되어져 왔고 파이프라인화 산술장치(Pipelined Arithmetic Unit)는 IBM 360 Model 91에서 처음 소개되었다. 파이프라인화 계산은 하나의 프로세서를 Segment 또는 Stage라고 불리우는 여러개의 단계로 나누어(마치 공장의 조립공정과 같이) 각 Segment마다 각기 다른 명령에 의해 데이터가 처리된다.

벡터 프로세서는 많은 양의 데이터를 반복적이면서 서로 독립적으로 연산을 수행하기 위해 고안되었다. 자료처리 관점에서 벡터란 연속적인 메모리 공간이나 일정한 기리에 의해 분리된 많은 양의 데이터를 말한다. 벡터 프로세서는 이와 같은 자료를 하나씩 독립적(파이프라인이 1개일 경우)으로 또는 여러개의 자료를 한꺼번에(파이프라인이 여러개인 병렬파이프 라인(Parallel Pipelines)의 경우) 파이프라인의 방식으로 처리한다. 일반에게 제일 처음 소개된 벡터 컴퓨터로는 1972년 Texas Instrument Inc.에서 개발된 ASC 컴퓨터로서 벡터 오퍼랜드(Operand)를 처리할 수 있는 하드웨어 명령들을 가지고 있었다.[7].

배열 프로세서는 서로 다른 데이터에 대해 동일한 연산을 동시에 수행할 수 있도록 독립적으로 프로세서들을 행렬형태로 구성한 것으로 SIMD의 범주에 속한다. 배열 프로세서는 벡터 컴퓨터의 한 종류로 볼 수 있으나 파이프라인화 벡터 프로세서의 경우 파이프라인화 연산장치(Pipelined Functional Unit)를 통해서 벡터 데이터를 처리함으로써 병렬처리를 구현하는 반면에, 배열 프로세서는 벡터 데이터의 각 요소들을 서로 다른 산술장치(Arithmetic Unit)를 통해서 처리하는 데 그 차이점이 있다. 배열 프로세서는 특정 응용분야에 맞추어 고안되어 사용되며 쓰이는 분야에 따라 프로세서들 간의 상호연결(Interconnection) 관계

또한 달라진다. 프로세서들 간의 상호연결 방법으로는 Shared Memory, Mesh-connected(MC) Network, Pyramid Network, Perfect Shuffle Network, a Cube-connected(CC) Network과 Cubeconnected Cycles(CCC) Network등이 있으며 똑같은 계산이라도 네트워크의 상호연결관계를 고려하여 알고리즘을 작성해야 한다.

다중프로세서는 복수개의 CPU를 갖는 시스템으로 복수개의 CPU가 하나의 프로그램용 여러 부분으로 나누어 동시에(Simultaneously) 수행하며 복수개의 CPU가 메인 메모리, I/O 채널, 운영체제 등을 공유하는 특징이 있으며 MIMD 범주에 속한다. 배열 프로세서와 다중프로세서의 차이점은 배열 프로세서의 경우 프로세서들이 하나의 공통 컨트롤러(Common Controller)에 의해 동시에 작동되는 것에 비해 다중프로세서는 서로 다른 프로세서의 컨트롤러에 의해 각기 운영된다. 또한 배열 프로세서는 특정목적에 맞게 설계 또는 운영되는 반면에 다중프로세서는 일반 분야에도 사용될 수 있는 융통성을 가지고 있다. 메모리와 입출력장치를 공유함과 동시에 각 프로세서들은 각자의 독립된 메모리를 가질 수 있으며 프로세서들 간의 통신은 공유 메모리(Shared Memory)나 인터럽트 네트워크(Interrupted Network)을 통해서 이루어진다.

다중프로세서는 시스템의 성능 및 신뢰도를 향상시킬 수 있는 장점이 있으나 다중프로세서 상에서 각 프로그램의 다중처리(Multi-processing) 효율은 프로그램의 병렬성에 의해 영향을 받음 뿐아니라 공유하는 시스템의 자원에 대한 경쟁이 일어나 시스템의 전체 효율에 나쁜 영향을 줄 가능성이 있다. 다중프로세서 컴퓨터는 각 프로세서 간의 통신을 위해 CPU가 메모리를 액세스(Access)하는 빈도에 따라 강결합 다중프로세서(Tightly Coupled Multiprocessor : TCM)와 약결합 다중프로세서(Loosely Coupled Multiprocessor : LCM)로 나눈다.

TCM은 공유 메인 메모리(Main Memory)를 통해서 프로세서들 간의 통신을 이루며 각 프로세서 별로 로컬 메모리(Local Mmemory) 또는 고속의 캐쉬 메모리(Cache Memory)를 갖는다. TCM의

단점으로서는 두개 이상의 프로세서가 같은 메모리 유니트를 동시에 액세스하고자 할 때 발생하는 메모리 경쟁(Memory Contention)에 의한 성능의 저하이다.

LCM은 TCM에서와 같은 메모리 충돌(Memory Conflict)은 발생하지 않는다. LCM은 각 프로세서가 Computer Module이라 하는 I/O 장치와 비교적 큰 로컬 메모리를 갖고 있으며 서로 다른 컴퓨터 모듈간의 통신은 Message Transfer System를 통해서 메시지를 교환한다.

2.4 슈퍼컴퓨터의 발달

슈퍼컴퓨터의 특징을 갖는 컴퓨터로는 1960년대 초반에 CDC 6600, IBM 7090, 7094등이, 1960년대 후반에는 IBM 360-91, CDC 7600등이, 1970년대 초에 CDC의 Star-100, ASC, Illiac-IV등이 발표되었다. 그리고 1976년 미국의 Cray Research사의 Cray-1 슈퍼컴퓨터가 Los Alamos 연구소에 설치되면서 슈퍼컴퓨터의 활용이 본격화되기 시작하였다.

슈퍼컴퓨터의 역사는 그 구조 및 기능상 크게 세대의 세대로 구분한다. Cray-1 이전의 소위 제 1세대 슈퍼컴퓨터는 벡터처리 구조의 컴퓨터인 Star-100과 병렬처리 구조의 Illiac-IV 등을 들 수 있는데 상업적으로 크게 성공하지 못하여 슈퍼컴퓨터의 전신으로 구분하기도 한다. Cray-1 시스템과 같이 벡터 전용의 다수의 파이프라인(Pipeline)이 첨가된 제 2세대 슈퍼컴퓨터는 Cray-1, Cray-X/MP, Cyber 205, Cray-2, Cray-Y/MP, Fujitsu VP 시리즈, Hitachi S810/20, NEC SX 시리즈 등 80년대의 슈퍼컴퓨터들이다. 그리고 최고연산속도가 수십 GFLOPS 또는 그 이상으로서 다중프로세서를 특징으로하는 제 3세대 슈퍼컴퓨터는 다수의 벡터 프로세서를 연결한 VP-2000, SX-3, Cray-3, Cray Y/MP C-90등을 들 수 있다. 이외에 파이프라인을 가진 벡터 프로세서는 아니나 고성능 마이크로 프로세서를 수십 또는 수백개 이상(현재 Thinking Machine 사의 CM-5가 최대 16,000개의 프로세서까지 가능한 것으로 발표됨) 장착한 초병렬컴퓨터(MPP: Massively Parallel Processing Computer)도 연산속도나 기억

용량 면에서 슈퍼컴퓨터 이상의 성능을 가지므로 슈퍼컴퓨터에 포함시키기도 하며 NCUBE-2, IPSC- 860, IPSC Paragon, CM-2, CM-5, FX-2 800, CAMPUS[10] 등이 여기에 속하나 본 고에서는 고성능 벡터 프로세서를 기본으로 하는 슈퍼컴퓨터를 중심으로 언급하기로 한다.

한편 1970년대까지는 슈퍼컴퓨터들이 거의 미국에 의해 개발되어 보급되어 왔으나 1980년대에 들어서면서 일본의 Fujitsu, Hitachi, NEC등이 슈퍼컴퓨터를 개발하여 보급하기 시작하였고 이에 따라 슈퍼컴퓨터의 성능과 활용분야가 급속도로 발전하게 되었다. Cray Research사는 Seymour R.Cray가 Cray-1 개발 이후 1984년에 Cray-2를 개발하였고 Steve Chen의 연구팀에서는 1988년에 Cray-Y/MP를 개발하였다. Cray-Y/MP는 Cray-X/MP의 후속제품이며 1991년말에는 Cray-Y/MP의 후속제품으로 Y/MP C-90 컴퓨터(16 CPU, 최고속도 16 GFLOPS)를 발표하였다.[10] 반면 Cray Research사에서 분리되어 1989년 5월에 설립된 Cray Computer사는 Seymour R.Cray를 중심으로 갈륨비소(GaAs) 반도체를 사용한 16 GFLOPS의 Cray-3를 개발하여 발표할 예정이며 Cray-3 후속제품으로 Cray-4도 개발할 예정으로 있다. 일본의 슈퍼컴퓨터 개발역사를 보면 먼저 Fujitsu가 1983년부터 VP Series를 개발하여 보급하기 시작했고 VP-200, VP-400을 거쳐 1988년에는 VP-2000 시리즈를 개발하였다. Hitachi사에서는 1988년 S-820시리즈를, NEC사는 SX-1, SX-2에서 1989년에는 SX-3시리즈를 개발하여 보급하고 있으며 최근에 개발된 SX-3R/44는 최대성능이 25.6 GFLOPS로 현재 최고성능의 슈퍼컴퓨터에 속한다.[11] 이와같이 슈퍼컴퓨터는 미국의 1개사(개발중인 업체를 포함하면 3개사업)와 일본의 3개사가 개발하여 보급하고 있으며 미국보다 뒤늦게 1980년대부터 슈퍼컴퓨터를 개발하여 보급하고 있는 일본의 3개사는 하드웨어 성능의 급속한 발전을 바탕으로 선두주자인 미국의 Cray Research사를 추격하고 있는 추세이다. 향후 슈퍼컴퓨터의 개발동향을 보면 미국, 일본 모두 1990년대 후반에는 TFLOPS(Tera flops= 1,000GFLOps) 성능의 슈퍼컴퓨터를 선보인다는

목표아래 개발계획을 추진하고 있다.[12]

2.5 슈퍼컴퓨터 보급현황

슈퍼컴퓨터의 종류에는 초병렬컴퓨터를 별도로 구분한다 하더라도 미니 슈퍼컴퓨터부터 대형 슈퍼컴퓨터까지 다양하게 있으나 제품의 종류가 너무 많고 그 구분이 뚜렷하지 않기 때문에 여기서는 Cray Research, ETA, Fujitsu, Hitachi, NEC 사등 5개사의 제품을 슈퍼컴퓨터로 구분하고 언급하기로 한다. 슈퍼컴퓨터는 1976년 Cray-1을 시작으로 하여 상업화에 성공하면서 선두 주자로 나선 Cray Research사가 1990년 10월 현재 256대를 보급하여 세계시장의 65%를 점유하고 있다. 1980년대 들어서는 일본의 3개사가 슈퍼컴퓨터를 개발하여 보급하기 시작하면서 하드웨어의 급속한 발전으로 Fujitsu사의 75대를 비롯하여 111대를 보급해서 세계 슈퍼컴퓨터 시장은 미국과 일본의 경쟁이 되었다. 여기서 미국의 ETA사가 1989년 4월부터 슈퍼컴퓨터 생산을 중단하여 사실상 미국의 Cray Research사와 일본의 3개사 간의 경쟁으로 압축되었으며 슈퍼컴퓨터의 세계시장은 연간 35-40% 정도 성장할 것으로 예측되므로 [13] 앞으로 슈퍼컴퓨터의 판매경쟁은 더욱 치열할 것으로 예측된다. 슈퍼컴퓨터의 성능에 있어서는 일본의 3개사가 하드웨어(Hardware) 부분의 급속한 발전으로 연산능력이 Cray Research사의 슈퍼컴퓨터보다 대체로 높게 나타나고 있으며 응용 소프트웨어(Applications Software)는 Cray Research 사에 비해 상대적으로 부족한 것으로 평가되고 있다. 그리고 일본의 3개사는 주로 일본 자국 내를 중심으로 하여 슈퍼컴퓨터를 보급하고 있으며 해외시장의 보급현황은 1990년 10월 현재 Cray사의 109대 보급에 비해 보급실적이 15대로 저조한 실정이다. 이와 같이 슈퍼컴퓨터의 개발과 판매경쟁이 치열해짐에 따라 미국과 일본 정부에서는 슈퍼컴퓨터 분야에서 선두 자리를 차지하기 위해서 많은 투자와 지원을 하고 있다. 미국의 경우 새로운 슈퍼컴퓨터 제품이 개발되면 통상 대학교 및 국공립 연구소에서 우선적으로 구입하게 하여 제조회사에 재정적으로 도움을 줄 뿐만 아니라 성능시험, 소프트웨어 개발, 응용시험 등을

공동으로 수행함으로써 제품의 안정화 도모, 응용 기술 개발에 기여를 하고 있다. 일본의 경우에도 통산성에서 직접 슈퍼컴퓨터 연구개발비를 지원하는 한편 문부성에서 최신제품을 구매, 국립 대학교들에 보급하여 미국의 경우와 같이 시스템의 안정화, 소프트웨어 개발, 응용기술 개발 등에 기여하고 있다.

1990년 International Data Corporation 자료에 의하면 1990년 10월 현재 전세계에 394대의 슈퍼컴퓨터가 보급되어 있으며, 슈퍼컴퓨터 회사별 보급현황은 <표1>에서와 같이 Cray Research사가 256대등 미국 2개사가 283대로 71.9%를 점유하고 있으며 일본의 3개사가 111대로 28.1%의 점유율을 보이고 있다. 지역별 보급현황은 미국이 166대로 가장 많고 일본이 121대, 기타가 107대이다. 기타 107대중 대부분은 유럽지역등 선진국 위주로 보급되어 있으며, 전체 슈퍼컴퓨터의 73%가 미국, 일본에 편중되어 있다. 한편 90년대에 들어서 일본제품의 슈퍼컴퓨터가 해외 시장에 비해 비록 일본을 주대상으로 하나, 빠른 속도로 보급되고 있는 사실은 주목할만한 일이다.

표1. 지역별, Vendor별 보급현황(1990년 10월 현재, International Data Corporation, 1990)

	일본	미국	기타	전세계
Cray	22(16.2)	147(88.6)	87(81.3)	256(65.0)
Fujitsu	62(51.3)	2(1.2)	11(10.3)	75(19.0)
NEC	17(14.0)	1(0.6)	1(0.9)	19(4.8)
Hitachi	17(14.0)	0(-)	0(-)	17(4.3)
CDC/ETA	3(2.5)	16(9.6)	8(7.5)	27(6.9)
합 계	121(100.0)	166(100.0)	107(100.0)	394(100.0)

3. CARY-2S 슈퍼컴퓨터 시스템 개요 및 응용 소프트웨어

국내 최초로 1988년 9월 시스템공학연구소에 설치된 Cray-2S슈퍼컴퓨터는 당시 세계 최상위 성능을 가진 기종으로서 현재 대학, 연구소 및 산업계에 개방되어 기계, 항공, 토목 및 플랜트, 화학, 물리, 기상, 해양등 다양한 분야에 이용되고 있다. 여기서는 슈퍼컴퓨터의 하드웨어 구조, 성능, 이용분야등에 대한 이해를 돕기 위해 Cray-2S에 관한 하드웨어 성능, 응용 소프트웨어등에

대하여 간략히 소개하고자 한다.

3.1 개요

Cray-2S/4-128 시스템의 Mainframe 구성은 각각 독립된 처리능력을 가진 4개의 Background Processor와 한개의 Foreground Processor, 그리고 4개의 CPU가 각각 또는 서로 공유하여 사용할 수 있는 128MW(Mega Word)의 공유메모리(Common Memory)로 구성된다. 또한 4개의 Channel Loop이 있어 Background Processor, Foreground Processor, Front-end, Disk Storgae Unit, Tape Controller, 공유메모리와 연결되어 있다.

Foreground Processor는 공유메모리, Background Processor, Disk Controller, Front-end Processor 및 자체 Foreground Processor 사이에서 발생하는 전반적인 시스템 활동을 제어하며 Background Processor는 각각 Control Section과 Computation Section을 가지고 있고 벡터처리(Vector Processing) 및 스칼라처리(Scalar Processing)이 가능하다.

SRAM(Static RAM)으로 구성된 128 MW(=1 GB)의 방대한 공유메모리를 사용하여 이용자들의 많은 작업을 수행함은 물론 큰 기억용량을 필요로 하는 프로그램들을 효과적으로 다중처리(Multi-processing) 할 수 있는 것이 독특한 특징이다. [14]

3.2 하드웨어 구성 및 성능

(1) CPU

- 갯수 : 4
- 성능 : Scalar(490 MIPS), Vector(1,942 MFLOPS)
- Registers : Scalar-용(S) 64bit*8
Vector-용(V) 64bit*64 element*8
Address-용(A) 32bit*8
기타 Control Register 다수
- Clock Cycle Time : 4.1NS(Nano Second)
- Word Structure : 64bit

(2) Main Memory

- Common Memory : 128MWords

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

(3) 보조기억장치(DASD(DD-40))

- 용량(Formatted) : 5.297Gbytes*8
- Sectors/cylinders : 912
- Sectors/track : 48
- Bytes/sector : 4,096
- Bytes/track : 196,608
- Transfer rates : 86Mbits/sec

(4) Tape

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

3.3 CRAY-2S 응용 소프트웨어

현재 Cray-2S/4-128 시스템에는 <표2>와 같이

표2. Cray-2S 응용 소프트웨어

분 야	응용 소프트웨어
기계 및 구조해석	ABAQUS, ADINA, BOPACE3D, DYNA3D, MSC/NASTRAN, SAPIV, ABAQUS/EXPLICIT, PAM/CRASH
전기 및 전자공학	HSPICE, SPICE, MAGNA/FIM, UMSPICE, HILO3/SYSTEM HILO, CADENCE Products, IDEA Station/Critical Path Analyzer
계산유체역학	POENICS, VSAERO, FLOTTRAN, HARWELL-FLOW3D, KIVA II, CONCHAS-SPRAY
그래픽	CSADIE, UNIRAS, MOVIE.BYU, SKETCH, OASIS, PATRAN II, MPGS, TEMPAS, SH-RLI, DISSPLA, GLDPLLOT, PLOTIO/TCS
화학, 화학공학 및 생물공학	DISCOVER/INSIGHT, MOPAC, GAUSSIAN, PROCESS, X-PLOR/QUANTA, CHARM, PROTEIN D/B, EMBL D/R, NBRF/PIR D/B, GENBANK D/B
수학, 통계	ARRIBA, BATCHIP, IMSL, EISPACK, LINPACK, MATHLIB, REDUCE, SCIPOINT, AMOSLIB
기상 및 석유탐사	GEOVECTEUR, SUGAR-MD, NCAR-GKS

다양한 분야의 응용 소프트웨어(Applications Software)가 설치되어 사용자에게 제공되고 있으며 이외에도 사용자가 필요로 하는 응용 소프트웨어를 계속적으로 구입하여 설치하고 있다.

4. 슈퍼컴퓨터 및 병렬처리를 이용한 유한요소 해석

슈퍼컴퓨터에서 유한요소해석을 수행할 경우, 계산속도를 증가시키기 위해서는 슈퍼컴퓨터의 벡터처리기능을 최대한 활용할 수 있도록 프로그램을 벡터처리에 적합한 형태로 변환시켜 주어야 하며 이 과정을 일반적으로 벡터화(Vectorization)라고 정의한다. 벡터화의 가장 일반적인 접근방식으로는 프로그램의 기본 알고리즘(Algorithm)을 유지하면서 문법사항을 벡터 프로세서에 적합하게 수정하는 Syntactic Vectorization을 들 수 있는데 Cray(COS)용 MSC/NASTRAN 및 FPS Scientific Computer용 ANSYS의 개발, AS/XL 벡터 컴퓨터용 MSC/NASTRAN의 개발등이 좋은 예이다. [15]

일반적으로 대형 프로그램의 개발에는 많은 자원이 소요되므로 기존 프로그램의 Syntactic Vectorization이 유리한 점은 있으나 벡터 프로세서의 기능을 충분히 이용하는 데는 한계가 있으므로 유한요소해석 과정의 알고리즘 자체를 벡터화하는 Algorithmic Vectorization 기법에 대한 연구가 진행되어 왔으며, 이 경우 프로그램의 종류와 벡터 컴퓨터의 성능에 따라 다르나 CPU소요시간 면에서 최대 10배이상, I/O 작업시간 면에서는 100배 정도까지 계산효율을 증가시킬 수 있는 것으로 알려져 있다.[16] Algorithmic Vectorization의 예는 IBM 3090/VF용 PAM/CRASH의 개발 [17] 및 AS/XL용 DYNA3D의 개발[18] 등이 있으며 DYNA3D의 경우 AS/XL 컴퓨터상에서 벡터화에 의해 성능이 2.5배 이상 향상된 것으로 나타났다.

최근의 추세로 볼 때 유한요소해석법의 효율적인 적용에 필요한 계산속도는 비약적으로 증가할 전망이다. 자동차의 충돌해석등을 포함한 비선형동적해석 문제의 경우를 예로 들면 최대 10^8

GFLOPS 정도의 계산속도가 필요한 것으로 추정되고 있다.[19] 단일프로세서(Single Processor) 컴퓨터의 계산속도의 한계는 현재로는 1 GFLOPS 정도이므로 프로세서의 수를 증가시켜 병렬 처리기능을 최대한 활용하는 것이 계산속도 증가를 위한 효율적인 해결책으로 인식되고 있으며 Cray-2(4 CPU), Cray Y/MP C-90(16 CPU), VP 2000(4 CPU), SX3(4 CPU)등 MIMD(Multiple Instruction Stream-Multiple Data Stream) Multiprocessor 슈퍼컴퓨터 등이 이러한 추세를 반영하고 있다.

반면에 현재 널리 활용되고 있는 대부분의 유한요소해석 프로그램은 종래의 순차처리 컴퓨터(Sequential Processing Computer)를 기준으로 개발되었으므로 Multiprocessor 컴퓨터의 병렬처리기능을 충분히 활용하기에는 한계가 있다. 따라서 기존 프로그램의 벡터화와 병행하여 Multiprocessor 컴퓨터의 병렬처리기능에 적합한 유한요소해석기법 및 프로그램의 개발에 대한 관심이 증가하고 있다.

이러한 병렬유한요소해석(Parallel Finite Element Analysis) 기법에 대한 연구는 Asynchronous MIMD 컴퓨터(상호 연결된 다수의 Processor로 구성되고 각 Processor는 독립적으로 Instruction을 수행하거나 또는 프로그램의 처리가 가능한 컴퓨터)를 대상으로 연구가 수행되고 있으며 이러한 컴퓨터로는 CM2, 3 및 IPSC2, IPSC860, FX2800등 초병렬컴퓨터(MPP컴퓨터)는 물론 NASA Langley Research Center의 Finite Element Machine 및 FLEX 32, HEP Multiprocessor Computer, 여러개의 Transputer로 구성된 Meiko Computer를 포함하여 Cray Y/MP, Cray2, VP 2000, SX3등 슈퍼컴퓨터를 들 수 있다.[20]

유한요소법은 본질적으로 이론상 병렬처리를 수행할 수 있는 부분이 많으며(요소강도매트릭스의 생성, 응력의 계산등) 이외에도 강도매트릭스의 조합, 평형 방정식의 계산 또는 동적해석의 경우 시간적분(Time Integration) 기법 등에서 병렬계산을 활용할 수 있는 여지가 많으므로 비교적 Multiprocessor의 장점을 활용하기가 유리하다. 반면에 Multiprocessor를 이용할 경우 프로세

서간의 작업분담(Load Balancing)이나 프로세서간의 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 Multiprocessor 컴퓨터를 대상으로 병렬계산기법에 대한 연구가 꾸준히 진행되어 왔으며[21] 더불어 유한요소해석분야에서도 해석과정의 일부계산(요소강도매트릭스 계산, 평행방정식의 계산, 시간적분)을 병렬로 처리하거나 또는 Multiprocessor의 특징에 적합하게 유한요소해석 프로그램을 새로이 개발하려는 연구가 진행되어 왔다.[12, 22-32]

한편 유한요소해석 분야의 병렬계산기법 응용에 대한 연구사례를 분석해 보면 부분적으로 이론치에 근접한 성공적인 연구결과도 발표되고는 있으나 특정한 컴퓨터를 대상으로 일부 특정문제의 적용에 국한된 경우가 많으며 상당수는 Load Balancing 문제나 Interprocessor Communication에 의한 Overhead[33]로 인하여 실험적인 연구결과에 그치는 경우가 많다. 또한 일부 실험적인 Multiprocessor 컴퓨터용 유한요소해석 프로그램이 개발되었으나 아직은 일반목적의 대형 프로그램으로 발전되지는 않은 상황이다.

한편 현존하는 컴퓨터중 최상위급인 Multiprocessor 슈퍼컴퓨터(계산속도 1 GFLOPS 이상)(Cray-2, Cray Y/MP 8E, SX 3등)의 경우에 있어서는 이들의 병렬처리기능을 최대한 활용할 수 있는 일반목적 유한요소해석 프로그램이 아직 발표되지 않은 상황이며 CM, FEM, BBN Butterfly, IPSC, Multimax 등 MPP 또는 MPP와 유사한 사양의 Multiprocessor 컴퓨터를 대상으로 개발된 병렬계산 알고리즘의 이용가능성도 현재로서는 미지수이다. 왜냐하면 Multiprocessor 슈퍼컴퓨터의 경우는 프로세서간의 병렬처리 뿐아니라 프로세서내에서의 병렬처리(벡터처리)도 동시에 고려해야 하므로 기존의 Multiprocessor 컴퓨터에서 효율이 좋은 알고리즘이 슈퍼컴퓨터에서도 그대로 적용되지는 않기 때문이다. Multiprocessor

컴퓨터의 병렬처리기능을 최대한 활용하기 위해서는 하드웨어 구조에 적합한 컴파일러 뿐아니라 병렬화(이미 개발되어 있는 프로그램을 병렬처리에 적합하도록 변환하는 작업을 병렬화(Parallelization)라 한다.) 작업을 지원해 줄 수 있는 지원도구(Parallelizing Tools) 및 해당 응용분야에 대한 병렬계산 알고리즘이 확립되어야 하는데 Multiprocessor 슈퍼컴퓨터의 경우는 하드웨어 구조는 확립되어 있으나 병렬처리를 효과적으로 구현할 수 있는 컴파일러 및 병렬화 지원도구등이 효율면에서 완전하지 않은 상태이며 따라서 계속적인 발전이 진행될 것으로 판단된다.

5. 결 언

유한요소해석 기술이 구조해석을 포함한 공학의 제반문제 해석에 폭넓게 활용되면서 초기 선형의 단순한 문제로부터 점차 비선형의 복잡한 문제로 영역이 확대되어 왔다. 유한요소법은 이론적으로 잘 확립되었다 하더라도 본질적으로 컴퓨터의 성능에 따라 적용범위가 제한될 뿐아니라 유한요소해석의 경제성 및 효율성도 컴퓨터의 성능과 밀접한 관계가 있어왔다.

초고속연산기능 및 대규모의 기억용량을 가진 슈퍼컴퓨터가 출현하면서 유한요소해석 기술은 새로운 전기를 맞아 이전에 불가능했던 복잡한 문제의 정밀한 해석이 가능하게 되어 그때까지 복잡한 문제의 규명에 유일한 수단으로 인식되었던 공학실험을 보완하거나 또는 대체할 수 있는 효과적인 수단으로 자리잡게 되었다. 또한 유한요소해석 기술은 컴퓨터 그래픽스를 이용한 시각화(Visualization) 기술과 결합하여 컴퓨터 시뮬레이션(Computer Simulation)이라는 독자적인 영역을 구축함으로써 전산보조설계(CAD), 전산통합설계(CID) 및 전산보조공학(CAE)의 핵심기술로서 인식되고 있다.

벡터처리 및 병렬처리를 특징으로 하는 슈퍼컴퓨터는 Cray-1을 효시로 하여 연산속도 및 기억용량 면에서 급속히 발전하고 있으며 기술발전동향을 보면 프로세서 자체의 성능향상을 통한 전체 시스템의 처리능력 향상 뿐아니라 여러개의 프로

세서로 구성된 다중프로세서 시스템의 구현을 통한 처리능력의 향상에도 많은 관심이 집중되어 왔다. 특히 최근 들어 단일 프로세서로 구현할 수 있는 연산속도의 기술적인 한계로 인하여 다중프로세서를 통한 성능향상에 더욱 관심이 집중되고 있으며 프로세서 수의 증가추세는 향후 더욱 가속화될 전망이다. 한편 슈퍼컴퓨터의 발전과 더불어 초병렬 컴퓨터도 비약적으로 발전하여 이미 연산속도 및 기억용량면에서 슈퍼컴퓨터를 앞서고 있으며 상대적으로 가격이 저렴하여 슈퍼컴퓨터보다 가격대 성능비 면에서는 우수하나 병렬처리를 지원하는 소프트웨어 환경 및 응용 소프트웨어가 취약하여 아직은 개발의 여지가 많은 상황이다.

슈퍼컴퓨터를 활용하여 유한요소해석을 효과적으로 수행하기 위해서는 유한요소해석 프로그램을 슈퍼컴퓨터의 구조에 적합하게 변환해 주어야 하며 벡터처리 및 병렬처리를 특징으로 하는 슈퍼컴퓨터의 연산기능을 최대한 활용하기 위해서는 프로그램을 벡터화(Vectorization) 및 병렬화(Parallelization)해야 한다.

유한요소해석 프로그램의 벡터화에 관한 연구는 유한요소해석 분야에 슈퍼컴퓨터의 활용이 본격화되면서부터 시작되어 이미 널리 쓰이고 있는 일반 목적의 유한요소해석 프로그램의 경우 상당수가 벡터화된 상태이며 벡터화율을 증가시키거나 벡터처리에 따른 프로그램의 최적화(Optimization)에 관한 노력이 계속되고 있다. 한편 최근들어 해석대상문제가 대형화되고 복잡해짐에 따라 해석소요시간의 단축 및 소요경비의 절감등 효율적인 해석에 필요한 연산속도가 비약적으로 증가하고 있고 이러한 현상은 향후 더욱 가속화될 전망이므로 벡터화와 병행하여 병렬화에 대한 관심이 고조되어 왔다.

병렬화에 따른 성능향상을 위해서는 병렬처리에 적합한 유한요소해석 알고리즘의 개발이 관건으로 인식되고 있다. 병렬 유한요소해석에 대한 연구사례를 분석해 보면 부분적으로 이론치에 근접한 성공적인 연구결과도 발표되고는 있으나 아직도 특정한 컴퓨터를 대상으로 특정문제의 적용에 국한된 것이 많으며 프로그램의 기능 또한 매우 제한적인 경우가 대부분이다.

향후 슈퍼컴퓨터의 발전추세를 볼 때 프로세서의 수는 더욱 증가할 전망이고 더불어 가격대 성능비에서 우수한 초병렬컴퓨터도 계속적인 발전이 예상된다. 유한요소해석 분야에 있어서 이러한 슈퍼컴퓨터 또는 초병렬컴퓨터를 최대한 활용하기 위해서는 병렬유한요소해석에 대한 연구가 중요한 뿐만 아니라 유한요소해석 기술이 CAD, CID, CAE의 핵심기술로서 위치를 굳건히 하기 위해서도 이 부문에 대한 관심이 요망된다.

참 고 문 헌

1. C.Marino, Super Computer Applications in Automotive Research and Engineering Development, Proceedings of the International Conference on Supercomputer Applications in the Automotive Industry, 1986.
2. 한국자동차공학회, 차체, 차량 동력학부문 학술강연 초록집, 한국자동차공학회, 1992.5.
3. 이재석, "슈퍼컴퓨터를 이용한 유한요소해석," 전산구조공학회지, 1권 2호, 1988.12.
4. 이재석, "병렬계산을 이용한 유한요소해석," 토목학회지, 36권 6호, 1988.12.
5. 허찬, "슈퍼컴퓨터의 개요 및 현황," 전기학회지, 38권 7호, 1989.7.
6. 윤경현, "슈퍼컴퓨터의 소개 및 발전현황," 정보과학회지, 9권 4호, 1991.8.
7. Kai Hwang, Faye A.Briggs, Computer Architecture and Parallel Processing, McGraw Hill, 1984.
8. Worlton, J., "Understanding Supercomputers Benchmarks," Datamation, pp.121-130, 1984.9.
9. IEEE Scientific Supercomputer Subcommittee, "Supercomputer Hardware," IEEE Computer, pp.63-68, 1989.11.
10. Supercomputing Review, "News & Analysis; A Supercomputing Review News Special," pp. 12-34, 1991.12.
11. NEC, NEC Supercomputer SX-3R Series, 1992.4.
12. 양영규, 임철호, "국내 슈퍼컴퓨터 개발 및 응용 기술 현황," 정보과학회지, 9권 4호, 1991.8.
13. 안분석, 양영규, 슈퍼컴퓨터 장기수요예측 분석 연구, 고려대 행정문제 연구소, 연구보고서, 1991.9.
14. CRAY Research, Inc., The CRAY-2 Series of Computer Systems, 1988.

15. J.F. Gloudeinan, "The Evolution of MSC/ NASTRAN and the Supercomputer for Enhanced Performance," Proceedings of the NATO Advanced Workshop on High Speed Computation, 1984.
16. R.D. Vanluchene, et al., "Large Scale Finite Element Analysis on a Vector Processor," Computer & Str., Vol.24, No.4, pp.626-635, 1986.
17. P.Angeleri, et al., "PAM/CRASH on the IBM 3090/VF : An Integrated Environment for Crash Analysis," IBM Systems Journal 27, pp.541-560, 1988.
18. 이지호, 이재석, 김분현, "Memory-to-Memory 방식 벡터 컴퓨터에서의 외연적 유한요소법의 벡터화," 전산구조공학회지, 4권 1호, 1991.3.
19. Olaf Storaasli, "Structural Dynamics Analysis on a Parallel Computer, The Finite Element Machine," Computer & Str. Vol.26, No.4, pp. 551-559, 1987.
20. 유승화, "Distributed Systems," Summer School in Computer Science, 한국과학기술원, 1988.7.
21. Kenneth M.Will, Electronic Computation, Proceedings of the Ninth Conference on Electronic Computation, pp.680-700, 1988.2.
22. P.Zave and G.E. Cole, Jr., "A Quantitative Evaluation of the Feasibility of, and Suitable Hardware Architectures for, an Adaptive, Parallel Finite Element Systems," ACM Trans. Math. Software 9(3), 271-292, 1982.
23. Senol Utku, "On Nonlinear Finite Element Analysis in Single, Multi-and Parallel Processor," Com. & Str. Vol.15, No.1, pp.39-47, 1988.
24. Kincho H.Law, "A Parallel Finite Element Solution Method," Com. & Str. Vol.23, No.6, pp.845-858, 1986.
25. Henno Allik, "Finite Element Analysis on the BBN Butterfly Multiprocessor," Com. & Str. Vol.27, No.1, pp.13-21, 1987.
26. Dimitris Zois, "Parallel Processing Techniques For FE Analysis : Stiffness, Load and Stress Evaluation," Com. & Str. Vol.28, No.2, pp.247-260, 1988.
27. Charbel Farhat, "A Parallel Active Column Equation Solver," Com. & Str. Vol.28, No.2, pp.289-304, 1988.
28. P.Smolinski, "Parallel multi-time step integration on a transputer system," Computer & Structures, Vol.33, No.6, 1989.
29. K.N.Chiang, R.E.Fulton, "Structural dynamics methods for concurrent processing computers," Computers & Structures, Vol.36, No.6, 1990.
30. J.Padovan, A.Kwang, "Hierarchically parallelized constrained nonlinear solvers with automated substructuring," Computers & Structures, Vol.41, No.1, 1991.
31. H.Adeli, O.Kamal, "Concurrent analysis of large structures - I. Algorithms, II. Applications," Computers & Structures, Vol.42, No.3, 1992. 2.
32. K.N.Chiang, R.E.Fulton, "Parallel transient finite element analysis," Computers & Structures, Vol.42, No.5, 1992.3.
33. IEEE Computer Society, Proceedings on First International Conference on Supercomputing Systems, pp.205-264, 1985.12.