

MPI를 이용한 PSC 프레임 비선형해석 프로그램의 병렬화 Parallel Implementation of Nonlinear Analysis Program of PSC Frame Using MPI

이재석* 최규천**
Lee, Jae Seok Choi, Kyu Chon

Abstract

A parallel nonlinear analysis program of prestressed concrete frame is migrated on a PC cluster system and a massively parallel processing system, CRAY T3E system, using MPI. The PC cluster system is configured with Pentium III class PCs and fast ethernet. The CRAY T3E system is composed of a set of nodes each containing one Processing Element (PE), a memory subsystem and its distributed memory interconnect network. Parallel computing algorithms are implemented on element-wise processing parts including the calculation of stiffness matrix, element stresses and determination of material states, check of material failure and calculation of unbalanced loads. Parallel performance of the migrated program is evaluated through typical numerical examples.

1. 서론

자유도가 막대한 대규모 구조문제나 자유도가 막대하지 않더라도 거동이 복잡하여 계산시간이 많이 소요되는 복잡한 구조문제의 해석을 실용적으로 수행하기 위해서는 다수의 프로세서로 구성된 고성능 컴퓨터의 보급이 활발해져야 함은 물론 이를 이용한 효율적인 구조해석 방법 및 프로그램의 개발이 필요하다.

구조해석분야의 병렬계산에 관한 연구는 최근 들어 저가의 병렬 컴퓨팅 환경의 보급이 활발해지면서 실용성을 확보해가고 있으며 최근까지 발표된 연구결과들은 참고문헌^{1),2)}에 잘 나타나 있다.

한편 복잡한 재료 비선형거동 및 시간의존적거동을 보이는 건설구조물의 비선형해석에 병렬계산을 응용한 사례는 거의 발표되지 않았고 최근에 이르러 PC 클러스터 시스템을 대상으로 PSC 프레임의 비선형해석에

* 정회원 · 충북대학교 구조시스템공학과 교수

** 충북대학교 구조시스템공학과 석사수료

대한 병렬계산 알고리즘을 구현한 사례가 발표되었다.^{3,4)}

본 논문에서는 메시지 전달(message passing)방식의 병렬프로그래밍 지원도구인 MPI(message passing interface)를 이용하여 PC 클러스터 컴퓨터를 대상으로 개발된 PSC 프레임의 병렬비선형해석 프로그램을 MPP 시스템인 CRAY T3E 시스템을 대상으로 이식하여 최적화하고 병렬화된 프로그램의 병렬계산성능을 PSC 거더교 및 철골철근 콘크리트 프레임 예제를 해석하여 검토하고자 한다.

2. 병렬시스템의 구성

2.1 PC 클러스터 시스템의 구성 및 병렬프로그램 환경

클러스터(cluster) 시스템은 개인용 컴퓨터(PC) 및 워크스테이션(WS)을 고속 네트워크를 사용하여 연결함으로써 고성능 컴퓨터의 성능을 발휘하도록 하는 시스템이다. 즉 저가의 상용 소형컴퓨터를 네트워크로 연결하여 병렬처리 환경을 제공하는 시스템으로서 가격 대 성능비가 우수하고 사용자가 직접 상용부품을 사용하여 즉시 성능을 개선시킬 수 있으므로 시스템 유지비용이 저렴하며 PC와 WS의 개발환경을 그대로 사용할 수 있기 때문에 관리의 편의성 및 프로그램 개발에 대한 용이성과 확장성이 동시에 보장된다.

본 연구에서 사용된 PC 클러스터 시스템은 그림 1과 같이 인텔 계열 펜티엄 III급 개인용 컴퓨터 4대(800MHz)를 사용하여 구성하였다. 또한 네트워크 인터페이스 카드는 10/100Mbps Fast Ethernet을 지원하는 Realtek 8139 PCI Fast Ethernet 카드를 사용하였으며 허브는 10/100Mbps 네트워크를 연결하는 스위칭 허브(switching hub)를 사용했다. 각 개인용 컴퓨터는 하드디스크와 비디오 카드 및 각종 주변장치를 부착하여 별도의 컴퓨터로서 클러스터 시스템으로 사용되지 않을 경우에는 독립된 작업을 수행할 수 있게 하였다.

PC 클러스터 시스템의 운영체제로는 Linux를 사용했고 메시지 전송 도구로는 MPI(MPICH-1.2.1)를 사용했다. MPI는 표준화되어 있기 때문에 서로 다른 시스템 환경에서 구현된 프로그램일지라도 코드의 변경 없이 수행할 수 있는 이점이 있다. 또한 MPI는 이식성을 높일 수 있도록 시스템의 네트워크 구조에 종속적이지 않은 인터페이스로 개발되었으며, 시스템의 초기화 및 종료에 관련된 함수와 일대일(point to point) 통신을 위한 블록화 함수와 비블록화 함수, 그리고 집합(group)으로 통신을 수행할 수 있는 다양한 형태의 메시지 패싱 함수를 지원함으로써 사용자가 프로그램을 쉽게 작성할 수 있도록 한다.

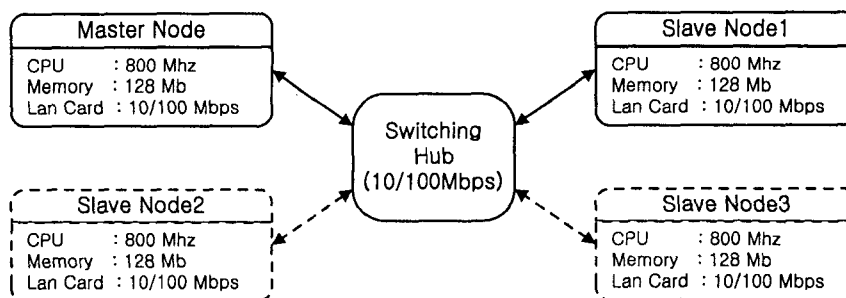


Figure 1. Configuration of PC cluster system

2.2 CRAY T3E 시스템의 구성 및 병렬프로그램 환경

초병렬컴퓨터(MPP : massively parallel processing system)인 CRAY T3E 시스템은 그림 2와 같이 각 노드마다 1개의 CPU와 1개의 메모리 서브시스템이 장착되었으며 분산메모리 interconnect 네트워크로 연결된 128개의 노드로 구성되었다. 또한 128개의 사용자 PE(processing element) 외에 8개의 지원(support) PE가 추가로 장착되어 있다. 지원 PE는 시스템 OS PE로서 프로세스 관리, 시스템 자원관리 등의 시스템 운영에 관여하는 PE이며 7개의 시스템 PE와 사용자 PE의 고장시 자동적으로 대체하여 사용하기 위한 여분의 PE 1개로 구성되어 있다.

CRAY T3E 메모리 서브시스템은 그림 3과 같이 물리적으로 3-D 토러스(torus) interconnect 네트워크로 불리는 3차원 노드 어레이(array) 내에 배치되어 있는데 이 PE들과 무관하게 전역(global) 데이터를 액세스(access)하거나 재분배할 수 있도록 구성되어 있다.

각 방향으로 연결된 노드들은 토러스링을 형성하게 되며, 이러한 3-D 토러스 구조는 노드들간의 최단거리연계를 확보해 주며, 큰 폭의 bisection bandwidth를 보장해 준다. 이러한 설계로 인하여 MPP 시스템의 원격메모리 액세스 속도가 상대적으로 초고속이 될 수 있다.

CRAY T3E 시스템은 각 노드간의 메시지 패싱구조로는 MPI(message passing interface)와 PVM(parallel virtual machine)이 있다. CRAY T3E 시스템에서는 한 작업 내에서 각 PE간에 데이터를 전달할 수 있도록 해주며 병렬 처리를 최적화할 수 있는 환경을 지원하는 MPT 1.1을 제공하고 있으며 본 논문에서는 MPT 1.1을 사용하여 병렬계산 알고리즘을 구현하였다.⁽⁵⁾

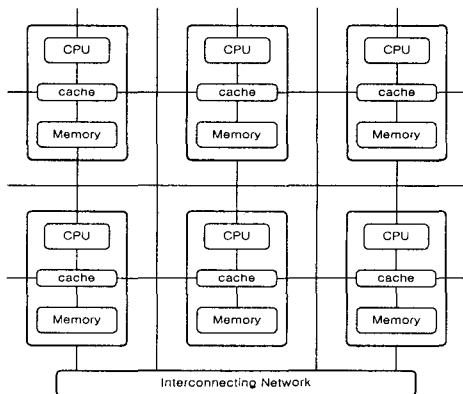


Figure 2. CRAY T3E system

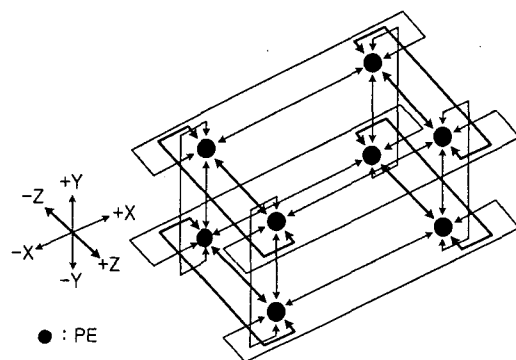


Figure 3. Three-dimensional torus network

3. 병렬비선형해석

PSC 프레임의 비선형해석에서의 경우 주어진 하중을 하중증분으로 나누어 각 하중증분에 대해 수렴조건을 만족할 때까지 반복계산과정을 수행하게 되므로 강도매트릭스와 요소하중의 계산 및 조합과정이 반복된다.

이러한 반복과정에서 병렬처리가 우선적으로 가능한 부분은 요소별 강도매트릭스의 계산과정과 요소응력 및 단면력을 계산하는 과정이다. 본 해석방법에서는 PSC 프레임의 복잡한 비선형거동을 정확히 해석하기 위

하여 충분할 요소를 사용하였고 많은 양의 계산이 요소 내의 층별로 이루어져 절점 자유도에 관한 항으로 변환된다. 평형방정식의 해법과정에서도 병렬계산을 적용할 수 있으나 재료 비선형성을 정확히 고려하기 위하여 층모델(layer model)을 채택한 경우 평형방정식의 해법과정이 전체 해석시간에서 차지하는 비율이 상대적으로 작다는 점을 고려해야 한다. 반면에 해법과정에서 빈번한 데이터 교환이 노드간에 이루어져야 하기 때문에 전송부하가 작지 않은 경우는 병렬계산에 의한 성능향상을 크게 기대할 수 없다.

참고로 본 논문에서 제시된 예제를 실행하여 계산시간을 분석한 결과 병렬알고리즘을 구현하지 않은 평형방정식 해법과정 및 데이터 파일의 입력과정이 점유하는 시간이 문제의 크기 및 대상 시스템에 따라 다소 변화하나 전체 해석시간의 5% 이내로 나타났다.

본 논문에서 입력 데이터의 처리는 마스터 노드(master node)에서 일괄적으로 입력받은 후 각 슬레이브 노드(slave node)에 데이터를 전송하는 과정을 거친다. 각 요소별 비역학적 하중벡터의 조합 및 강도매트릭스의 계산과정, 요소응력과 단면력의 계산과정은 독립적으로 수행 가능하므로 병렬계산이 가능하다.

비선형해석과정에 대한 병렬계산 알고리즘을 나타내면 그림 4와 같다.

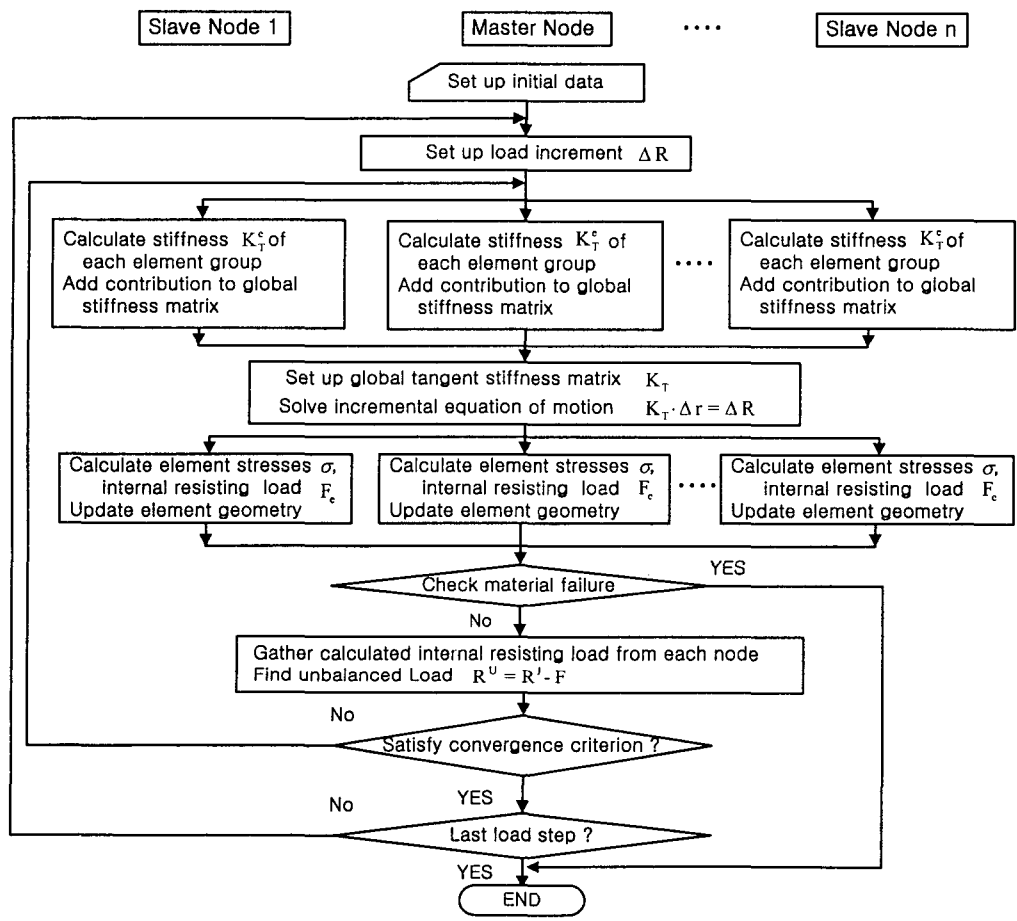


Figure 4. Parallel computing procedure for nonlinear analysis

4. 해석 예

PSC 프레임의 병렬비선형해석 프로그램의 성능을 검토하기 위하여 PC 클러스터 시스템과 CRAY T3E 시스템 상에서 PSC 거더교와 철골철근 콘크리트 프레임을 해석하였다.

4.1 PSC 거더교의 비선형해석

그림 5와 같은 PSC 거더교를 대상으로 극한해석을 수행하였다. 하중은 총 312kips의 트럭하중(P13 truck loading)이 중앙 경간의 중앙부에 작용하는 경우를 고려하기 위하여 그림 5.c와 같이 3개의 48kips 하중과 1개의 24kips 하중이 18ft 간격으로 작용하는 것으로 가정하였다.⁶⁾

병렬계산에 대한 해석시간과 성능향상 및 효율은 표 1에 정리했고 프로세서의 증가에 따른 성능향상은 그림 6에 나타났다. 표 1에서와 같이 PC 클러스터 시스템에서 노드가 4개일 경우 성능향상은 요소 수를 100개로 하였을 경우 3.55배로 나타났으며 요소 수를 400, 1000개로 증가시켰을 경우 3.84, 3.93배로 증가하였다. 또한 CRAY T3E 시스템에서 PE가 16개 일 경우에 요소 수를 400, 1000, 2000개로 증가시켰을 경우 성능향상이 12.92, 13.26, 14.44배로 나타났다. 병렬알고리즘을 구현하지 않은 평형방정식 해법과정 및 데이터 파일의 입출력과정 등이 점유하는 시간이 문제의 크기에 따라 다소 변화하나 PC 클러스터 시스템의 경우 요소 수가 증가하면서 전체 해석시간의 0.85, 0.60, 0.56%로 감소하였고 CRAY T3E 시스템의 경우에는 1.73, 0.89, 0.48%로 감소하였다.

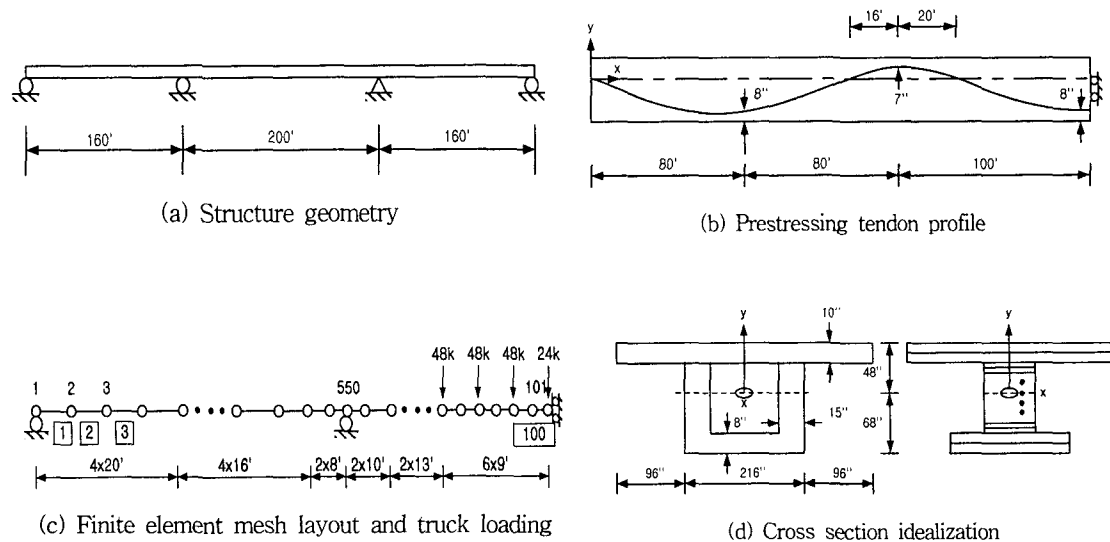
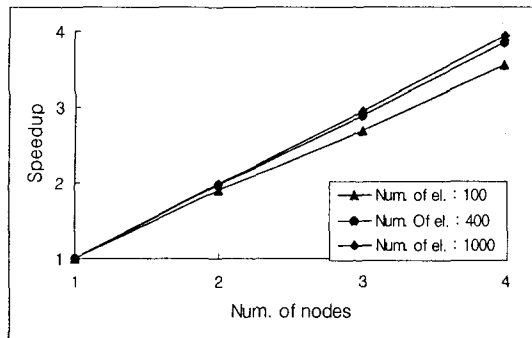


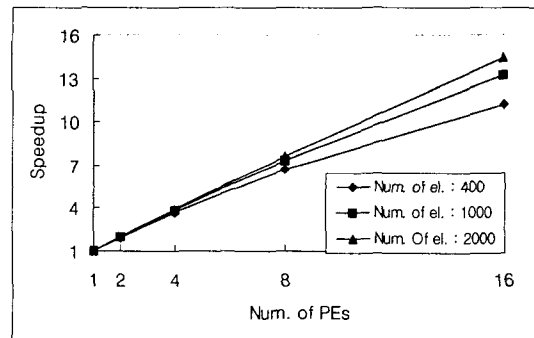
Figure 5. Three span post-tensioned box girder bridge

Table. 1 Analysis time, speedup and efficiency in case of PSC box girder bridge

System	# of Elements	# of Processors	Analysis Time(s)	Speedup	Efficiency
PC Cluster	100	1	33.920		
		4	9.550	3.55	0.89
	400	1	344.220		
		4	89.690	3.84	0.96
	1000	1	1547.230		
		4	393.630	3.93	0.98
CRAY T3E	400	1	68.621		
		16	6.110	11.23	0.70
	1000	1	311.221		
		16	24.248	13.26	0.83
	2000	1	1114.523		
		16	77.206	14.44	0.903



a. Speedup for PC cluster system



b. Speedup for CRAY T3E system

Figure 6. Speedup in case of PSC box girder bridge

4.2 철골철근 콘크리트 프레임의 극한해석

그림 7과 같은 철골철근 콘크리트로 구성된 평면 프레임을 대상으로 병렬시스템에서 극한해석을 수행하였다.

하중은 보의 진경간에 등분포 하중을 파괴에 이르기까지 순차적으로 증가시켜 재하하였다. 먼저 하중단계를 10개로 나누어 재하하고 이후에는 처짐을 단계별로 증가시키며 해석하였다.

병렬계산에 대한 해석시간과 성능향상, 효율을 표 2에 나타냈고 프로세서의 증가에 따른 성능향상은 그림 8에 나타냈다. PC 클러스터 시스템에서 노드가 4개일 경우의 프레임 요소 수가 570개인 경우의 성능향상은 3.80배로 나타났으며 CRAY T3E 시스템에서 PE 16개를 이용하여 병렬계산을 수행한 경우 성능향상이 PE가

2, 4, 8, 16개 일 때 1.84, 3.37, 5.71, 8.61배로 나타났다. 프레임 구조물의 경우 평형방정식 해법과정에 소요되는 시간이 전체 해석시간에서 차지하는 비율이 작다고 하더라도 상대적으로 PC 클러스터 시스템보다 CRAY T3E 시스템에서 더 크게 나타났기 때문에 CRAY T3E 시스템에서 성능향상이 작아졌다.

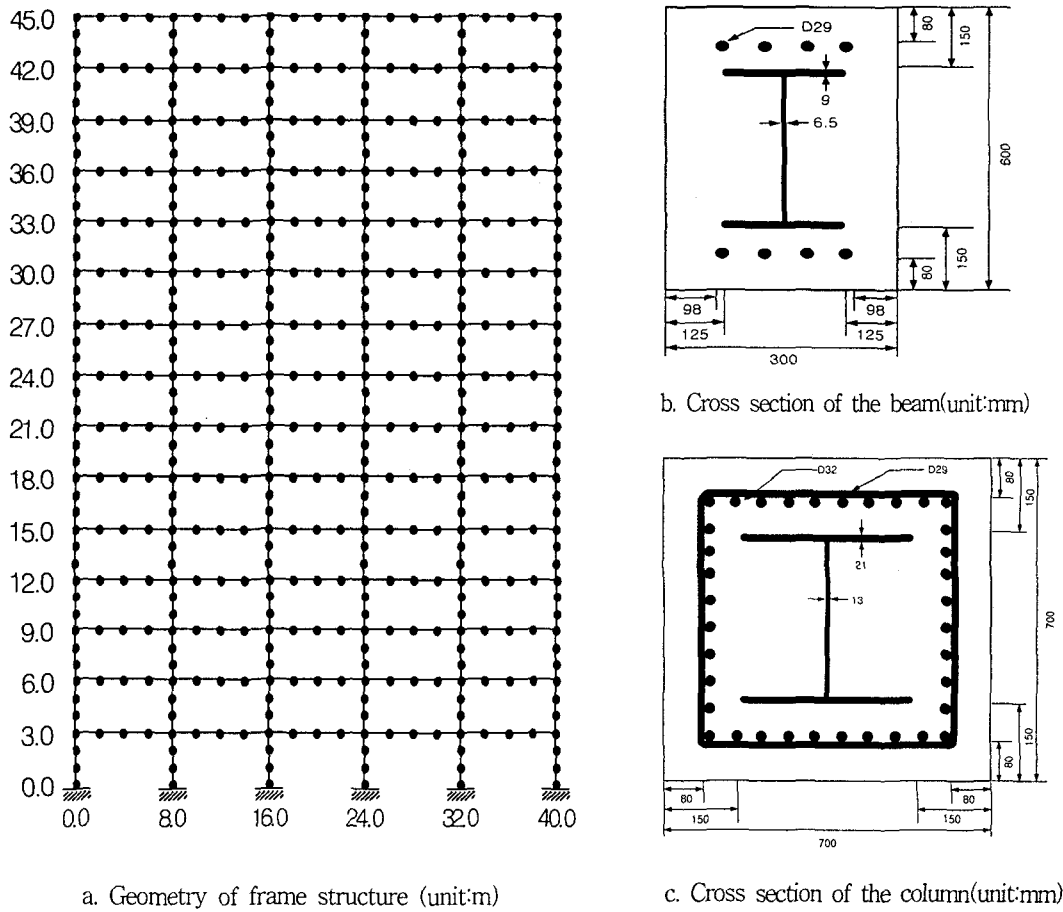
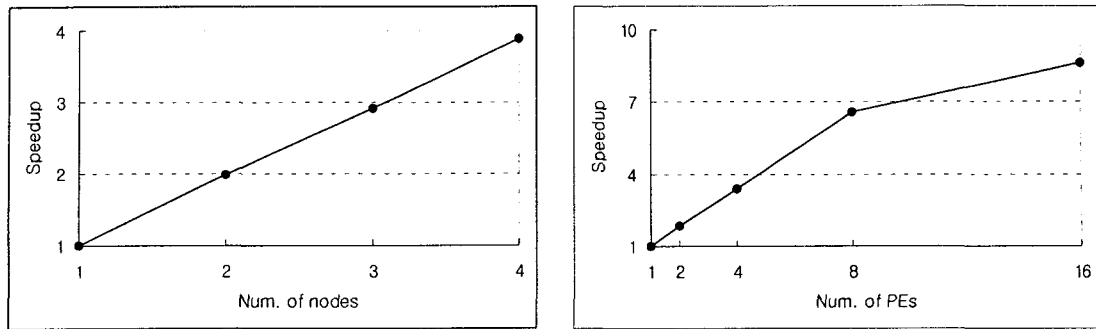


Figure 7. The Geometry of frame structure and cross section of the beam and column

Table 2. Analysis Time, speedup and efficiency in case of steel reinforced concrete frame

System	# of Elements	# of Processors	Analysis Time(s)	Speedup	Efficiency
PC	570	1	266.790		
Cluster		4	70.050	3.80	0.95
CRAY	570	1	60.224		
T3E		16	6.996	8.61	0.52



a. Speedup in PC cluster system

b. Speedup in CRAY T3E system

Figure 8. Speedup in case of steel RC frame

5. 결론

본 논문에서는 PC 클러스터 시스템 및 CRAY T3E 시스템을 대상으로 PSC 프레임의 병렬비선형해석 프로그램의 성능을 평가하였다. PC 클러스터 시스템의 병렬환경은 PC 및 Ethernet을 활용하여 구축하였고 병렬프로그래밍 방식으로서 메시지 전송 방식을 채택했으며 메시지 전송을 위하여 MPI를 사용하였다.

PC 클러스터 시스템에서 4개의 노드를 사용하여 병렬계산을 수행한 결과 성능향상이 이상치인 4배에 근접하게 나타났으며 CRAY T3E 시스템에서 16개의 PE를 사용할 경우 구조모델에 따라 8.61배 및 14.44배로 나타났다.

본 논문에서 사용된 병렬비선형해석 알고리즘은 표준화된 MPI와 Fortran 라이브러리를 사용하여 구현되었기 때문에 이질의 시스템 환경에서도 프로그램 코드의 큰 변경 없이 수행될 수 있었다.

본 논문의 결과를 활용함으로써 여타 비선형해석 프로그램의 경우에도 병렬화 작업을 수행하여 저비용으로 비선형해석을 수행할 수 있는 방안의 검토가 가능할 것이다.

참고문헌

1. 이재석 외, "병렬유한요소해석 S/W개발에 관한 연구(III)", 과학기술처, 시스템공학연구소, 1994, p.258
2. Mackerle, J., "Parallel finite element and boundary element analysis : theory and application-A bibliography(1997-1999)", *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol.35, 2000, pp.283~296
3. 이재석, 최규천, "Cluster Computing을 이용한 프리스트레스트 콘크리트 프레임의 비선형해석", 충북대학교 건설기술연구소 논문집, 제19권, 제1호, 2000, pp.223~238
4. 이재석, 최규천, "프리스트레스트 콘크리트 프레임의 비선형해석에서의 병렬계산", 대한토목학회지, 2000년도 학술발표회, 제1권, 2000, pp.221~224
5. "*CRAY T3E 사용자 지침서*", 시스템공학 연구소 슈퍼컴퓨터센터, 1998, p.200
6. 이재석, 강영진, "케이블로 지지된 PC 뼈대의 시간의존적 비선형해석", 대한토목학회논문집, 제12권, 제4호, 1992, pp.33~47