

메가골조구조물 전용 해석프로그램의 개발

Development of Analysis Program for Mega Frame System

김 현 수* · 유 일 향** · 이 동 근***

Kim, Hyun-Su · Yu, Il-Hyang · Lee, Dong-Guen

ABSTRACT

Since the mega frame structure has significant numbers of elements and nodes, it takes tremendous times and computer memories to analyze and design the structures. Therefore, the exclusive structural analysis program for mega frame system is developed to reduce the efforts and time required for the analysis and design of mega frame structure. To this end, an efficient modelling technique using the characteristics of mega frame structures and an efficient analytical model, which uses a few DOFs selected by the user using the matrix condensation method, are developed in this study. Static and dynamic analyses are conducted using an example structure.

Keywords: mega frame system, matrix condensation, substructure, mega elements.

1. 서 론

초대형 골조시스템(mega frame system)은 비교적 최근에 개발된 구조시스템으로 현재 건설되고있는 건물 보다 훨씬 높은 미래의 초고층 건물에서 채택될 것으로 기대되는 구조 시스템이다. 이 초대형 골조시스템은 여러 개의 보와 기둥을 묶어 하나의 메가칼럼으로 만들고 이 초대형 기둥들을 몇 개의 층마다 강성이 큰 보 또는 트러스로 구성된 초대형 수평부재, 즉 메가거더로 이어줌으로써 횡하중에 대한 구조물의 강성을 확보하는 시스템이다. 또한 이러한 초대형 골조시스템은 모듈화된 대형 구조부재(메가부재)를 반복해서 배치함으로써 구조물을 형성하는 특징을 가지고 있다. 이러한 초대형 골조시스템을 구성하는 메가부재들은 다수의 기둥과 보 및 트러스 부재로 이루어짐으로써 초대형 골조구조물을 이루는 실제 구조부재의 수는 급격히 증가하게 되어 결과적으로 수만 개의 유한요소 및 절점으로 이루어진 해석모델을 해석해야하는 경우가 빈번하게 된다. 이렇게 구성된 유한요소 모델을 해석하기 위해서는 자유도수가 수십만 개 이상에 달하는 정적 및 동적 평형방정식을 풀어야 하므로 많은 해석시간과 컴퓨터 용량이 필요하고 이러한 구조물의 모형화와 해석결과 분석에 엔지니어의 많은 노력이 필요하게 된다. 이러한 점을 해결하기 위하여 초대형 구조물의 효율적인 해석기법에 대한 다양한 연구가 현재까지 여러 연구자들에 의하여 진행되어 왔다(Archer, 2001; Bouhaddi 등, 1996a, 1996b; Kim 등, 2005).

본 연구에서는 초대형 골조시스템 전용 해석프로그램을 개발하여 구조물의 모형화, 해석, 및 분석이 효율적으로 하나의 통합된 시스템 안에서 이루어지도록 하였다. 이를 위하여 초대형 골조구조물의 구조적 특징을

* 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 박사 후 연구원 E-mail: digiarchi@skku.edu

** 학생회원 · 성균관대학교 건축공학과 석사과정 E-mail: lhyangi@hanmail.net

*** 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 교수 E-mail: dglee@skku.ac.kr

활용한 효과적인 모형화방법을 제안하였고 이를 이용한 전처리기를 개발하였다. 또한 해석에 사용되는 자유도수를 최소한으로 줄이면서도 해석의 정확성을 유지할 수 있는 효율적인 해석기법을 제안하였고 이를 이용한 해석프로그램을 개발하였다. 그리고 구조물의 거동을 나타내는데 필요한 최소한의 자유도수를 사용하여 구조물의 거동을 분석할 수 있도록 초대형 골조구조물 전용 후처리기도 함께 개발하였다. 본 연구에서 개발된 초대형 골조구조물 전용해석프로그램의 정확성 및 효율성을 검토하기 위하여 예제구조물을 이용한 해석을 수행하여 보았다. 그 결과 엔지니어의 노력 및 해석시간을 대폭 절감하면서도 초대형 골조구조물의 거동을 매우 정확하게 예측할 수 있음을 확인할 수 있었다.

2. 초대형 골조구조물의 효율적인 모형화방법

본 연구에서는 행렬응축기법을 통하여 자유도를 한꺼번에 소거할 경우 행렬응축에 막대한 시간이 소요되는 문제점을 해결하고 초대형 골조시스템의 구조적 특징을 효율적으로 반영하기 위하여 메가칼럼 및 메가거더 그리고 메가절점을 메가요소라고 정의하고 메가요소단위로 행렬응축을 수행하는 해석기법을 제안하였다. 즉, 초대형 골조구조물을 모형화하기 위하여 우선 메가요소의 연결을 위한 자유도를 제외하고 나머지 자유도를 행렬응축기법으로 소거하여 응축된 메가요소를 생성한다. 이렇게 생성한 메가요소를 조합하여 메가프레임을 구성하고(그림 1(d)) 메가프레임을 쌓아올려 전체 구조물을 구성한다. 메가요소를 이용한 초대형 골조구조물의 모형화 과정을 그림 1에 나타내었고 행렬응축을 통하여 메가요소를 생성하는 과정을 그림 2에 나타내었다. 메가요소 단위로 행렬응축기법을 통하여 자유도를 소거하게 되면 행렬응축과정에서 계산해야하는 역행렬의 크기가 전체구조물의 자유도를 한꺼번에 응축할 때에 비하여 상당히 줄어들기 때문에 행렬응축에 소요되는 시간을 크게 줄일 수 있다.

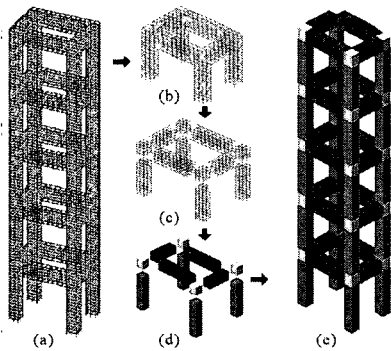


그림 1 메가요소를 이용한 초대형 골조구조물의 모형화

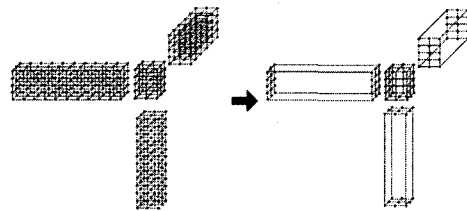


그림 2 행렬응축을 통한 메가요소의 생성

3. 초대형 골조구조물 전용 전처리기의 개발

본 연구에서 개발한 전처리 프로그램은 그림에서 보는 바와 같이 메가요소를 만든 후 이를 조합하여 메가프레임을 조합하고 생성된 메가프레임을 반복적으로 쌓아올려서 전체 초대형 골조구조물을 생성하는 3가지 단계로 구성되어 있다. 각 단계에서 생성된 메가요소나 메가프레임 등은 프로그램 왼편의 트리뷰를 통해서 일목요연하게 확인 및 관리할 수 있고 각 항목은 드래그 앤 드롭 기능을 통하여 손쉽게 조합할 수 있다. 또한 개발된 전처리기에서는 기하그룹과 부재그룹의 두 가지 그룹개념을 도입하여 반복되는 기하형상의 특징

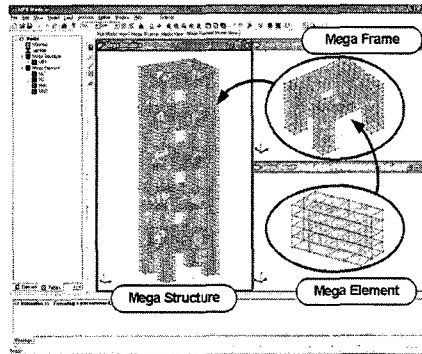
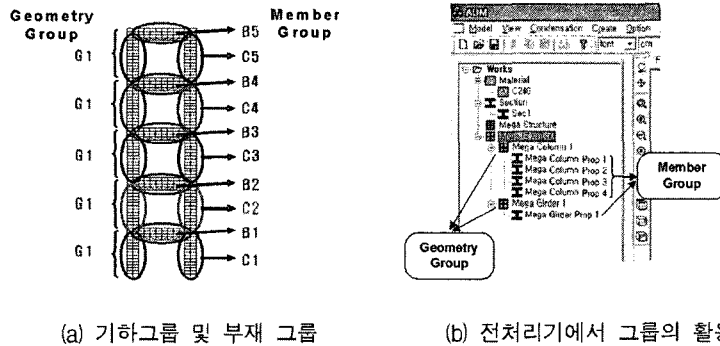


그림 3 초대형 골조구조물 전용 전처리기

을 최대한 이용하여 모형화의 효율을 높일 수 있도록 하는 한편 설계 작업 중 지속적으로 발생하는 부재 크기의 변경작업을 효과적으로 수행할 수 있도록 하였다. 그림 4(a)에서 보는 바와 같이 동일한 형상의 메가프레임이 5번 반복되므로 메가프레임을 구성하는 각 메가요소의 부재연결정보 등은 한번만 모형화한 후 'G1'이라는 기하그룹 이름으로 반복적으로 사용되는 것을 알 수 있다. 동일한 기하그룹 안에서도 서로 다른 부재그룹을 지정할 수 있도록 하였고 메가요소에 동일한 부재가 사용된다면 같은 부재그룹을 부여하여 부재의 지정이나 변경이 편리하게 하였다. 그림 4(b)에는 이러한 그룹개념이 도입된 전처리 프로그램의 트리뷰를 나타내었다. 전처리 프로그램을 통하여 작성된 해석모델은 해석프로그램의 입력파일로 자동변환되어 해석이 수행된다.



(a) 기하그룹 및 부재 그룹 (b) 전처리기에서 그룹의 활용

그림 4 기하그룹 및 부재그룹을 사용한 모형화

4. 초대형 골조구조물 전용 해석프로그램의 개발

4.1 서브메가요소를 이용한 메가요소의 모형화

본 논문에서는 메가요소의 생성에 소요되는 시간을 줄이기 위하여 서브메가요소 개념을 도입하였다. 본 논문에서 사용한 Guyan(1965)의 행렬응축과정을 살펴보면 응축되는 자유도와 관계된 강성행렬의 역행렬을 계산해야하는 것을 알 수 있다. 따라서 응축되는 자유도의 수가 커질수록 역행렬을 계산해야할 행렬의 크기가 커지게 되므로 응축과정에 소요되는 시간이 커지게 된다. 따라서 본 논문에서는 서브메가요소를 도입하여 구

해야할 역행렬의 크기를 줄이고자 한다. 그림 5에 서브메가요소를 이용하여 메가요소를 모형화하는 과정을 나타내었다. 그림 5에 나타낸 간단한 메가요소 모델을 그림 2에서 소개한 방법같이 메가요소 내부에 있는 자유도를 한꺼번에 응축한다면 응축되는 자유도는 378개가 되고 남아있는 자유도는 108개가 되므로 행렬응축 과정에서 378×378 크기의 역행렬을 구해야 한다. 이런 방법으로 계산을 했을 때 약 1.5초의 시간이 소요되었다. 그러나 그림 5와 같이 모형화할 때에는 서브메가요소의 구성단계에서 응축되는 자유도는 54개이고 남아있는 자유도는 108개이다. 이렇게 서브메가요소를 구성하는데 소요되는 시간은 0.1초이다. 계속해서 서브메가요소를 조합해서 메가요소를 생성하는 단계에서는 응축되는 자유도는 162개이고 남아있는 자유도는 108개이며 이때 소요되는 시간은 0.3초이다. 서브메가요소를 사용하여 메가요소를 구성하면 그렇지 않았을 때에 비하여 응축시간을 절반이상 줄일 수 있는 것을 알 수 있다. 이러한 방법으로 서브메가요소를 이용하면 계산에 소요되는 시간뿐만 아니라 계산에 필요한 컴퓨터 메모리의 양도 줄일 수 있다. 본 연구에서 개발한 해석프로그램에서는 그림 5와 같은 방법으로 메가기둥과 메가거더를 모형화하고 메가절점은 내부의 자유도를 한번에 응축하는 방법을 사용한다.

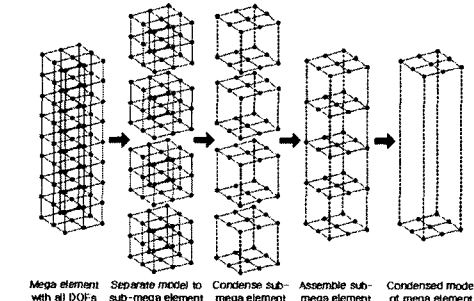


그림 5 서브메가요소를 이용한 메가요소의 모형화 과정

4.2 메가절점단위 행렬응축을 이용한 메가프레임의 모형화

앞 절에서는 메가요소간의 연결을 위한 절점만을 남기고 나머지 절점의 자유도를 응축한 메가요소를 생성하였다. 이렇게 생성한 메가요소와 메가절점을 조합하여 그림 6(a)와 같이 메가프레임을 구성한다. 이어서 그림 6에서 보는 바와 같이 메가절점을 단위로 해서 각각의 메가절점에 존재하는 연결절점의 자유도를 순서대로 응축을 한다.

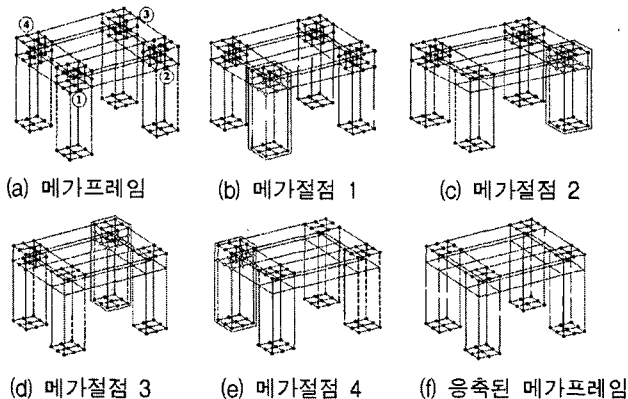


그림 6 메가절점단위의 메가프레임 모형화 과정

4.3 메가층단위 행렬응축을 이용한 초대형 골조구조물의 모형화

본 논문에서는 초대형 골조구조물의 조립 과정에서 소요되는 행렬응축시간을 절약하기 위해서 그림 7에 나타낸 바와 같이 층단위 행렬응축기법을 도입하였다. 전체 구조물 단계에서 응축시킬 자유도의 수를 N개라고 하고 메가층수를 S층이라고 할 때 모든 자유도를 한꺼번에 응축한다면 소거되는 자유도에 대한 강성행렬의 역행렬을 계산하기 위해서는 N^3 의 연산량이 소요된다. 하지만 층단위 응축기법을 사용하여 자유도를 단계별로 소거한다면 역행렬을 계산하는데 소요되는 계산량은 $S \times (N/S)^3 = N^3/S^2$ 이 되므로 한꺼번에 응축할 때보다 메가층수의 제곱에 반비례해서 줄어드는 것을 알 수 있다.

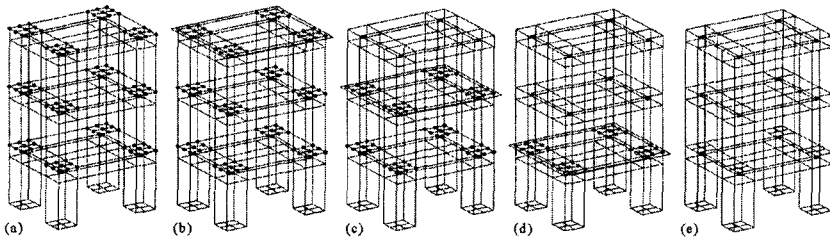
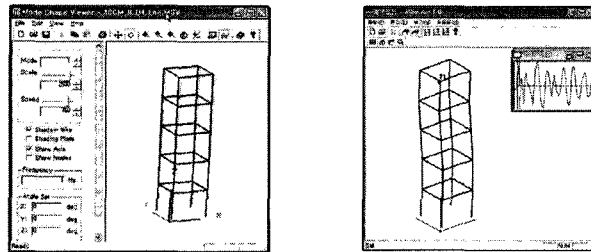


그림 7 층단위 행렬응축을 통한 초대형 골조구조물의 모형화 과정

5. 초대형 골조구조물 전용 후처리기의 개발

초대형 골조구조물은 다수의 보, 기둥 또는 슬래브 등의 부재로 이루어진 메가요소의 조합으로 이루어지므로 마이다스와 같은 상용프로그램을 사용하여 모든 부재를 다 그려서 전체구조물을 표현하려면 구조물을 모니터 화면상에 나타내는 데 짧지 않은 시간이 소요되므로 구조물을 원하는 방향으로 돌려보는 것도 용이하지 않아서 프로그램을 운용하는데도 어려움이 있게되고 작업의 효율성도 상당히 저하되게 된다. 또한 수만개의 부재로 이루어진 골조구조물의 형상이나 거동을 분석하는데도 상당한 어려움이 따른다. 본 연구에서 개발된 후처리기는 그림 8에서 보는 바와 같이 수많은 구조부재로 구성된 메가요소를 하나의 보요소로 간략하게 나타낸 것을 알 수 있다. 이렇게 복잡한 메가요소를 보요소로 간단하게 표현함으로써 구조물의 전체적인 거동을 쉽게 파악할 수 있다. 그림 8(b)는 구조물의 시간이력해석결과를 애니메이션으로 확인하는 장면으로서 그림에서 보는 바와 같이 특정한 자유도의 시간이력변위 그래프와 함께 결과를 확인할 수 있다. 이러한 후처리 프로그램은 초대형 골조구조물의 전체 거동을 파악하기가 용이하므로 특히 구조시스템을 선정하는 초기 설계 단계에서 유용하게 사용될 것으로 기대된다.



(a) 모드형상 뷰어 (b) 시간이력 뷰어

그림 8 초대형 골조구조물 동적거동 분석을 위한 후처리기

6. 예제해석

본 연구에서 개발한 초대형 골조구조물 전용 해석프로그램의 정확성과 효율성을 검토해보기 위하여 본 장에서는 초대형 골조시스템의 특징을 잘 나타내는 표준 구조물을 선택하여 정적해석, 고유치해석 및 시간이력 해석을 수행하였고 일반적인 해석방법의 결과와 비교하였다. 본 연구에서 사용된 초대형 골조시스템의 예제 구조물은 그림 9와 같다.

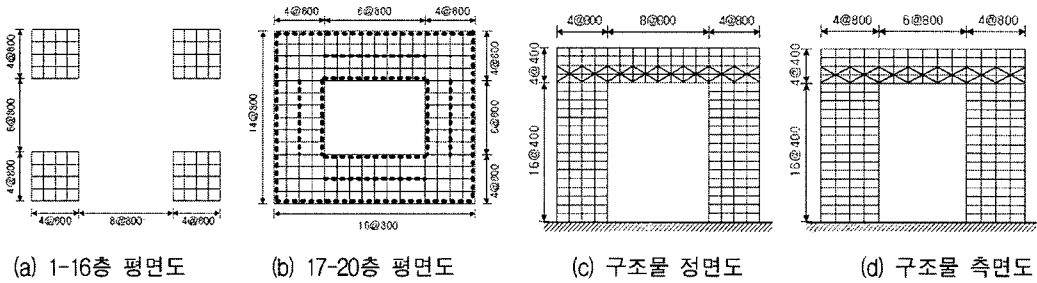


그림 9 100층 예제구조물의 평면 및 입면

초대형 골조구조물을 효율적으로 해석하기 위해서 해석시 사용하는 자유도수를 최소화하고자 하므로 골조구조물의 거동을 효과적으로 나타낼 수 있는 자유도를 선택하는 것이 중요하다. 따라서 최소한의 자유도를 가지고 전체 구조물의 거동을 나타낼 수 있는 효율적인 해석모델을 알아보기 위해 그림 10의 7가지 해석모델을 사용하였다. 예제구조물에 대하여 소개한 7가지 해석모델을 사용하여 정적 및 동적해석을 수행한 결과를 그림 11(a)에 나타내었다. 그림 11에서 보는 바와 같이 본 논문에서 제안된 6개의 응축모델이 일반적인 해석 모델인 모델 F의 해석결과와 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

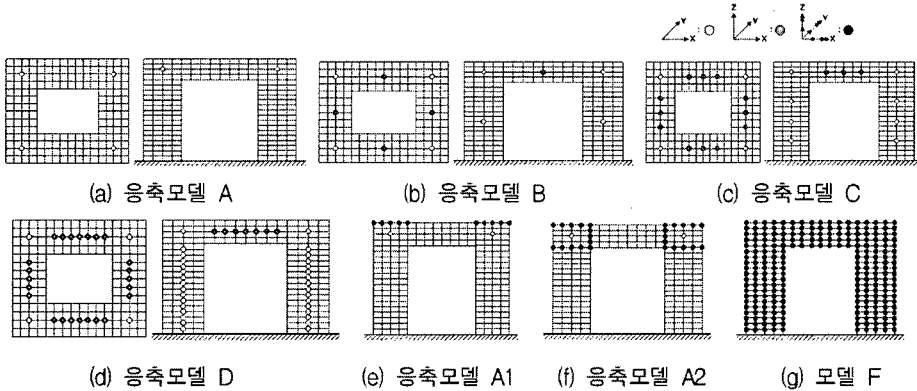


그림 10 응축모델의 종류

따라서 정적행렬응축을 사용한 해석은 이론적으로 계산과정에서 발생하는 수치오차를 제외하면 응축을 하지 않은 해석결과와 같다는 사실을 확인할 수 있다. 예제 구조물의 각 모델에 대한 질량참여율을 계산해본 결과 모든 모델에 대해서 5차 모드까지의 누적 질량참여율이 90%를 넘고 있는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 사용한 6개의 응축모델은 모두 15차 모드까지 모델 F의 고유진동수와 거의 비슷한 결과를

나타내므로 어떤 응축모델을 선택하든지 지진응답은 모델 F와 유사한 결과를 보일 것으로 예상할 수 있다.

모든 해석모델에 대하여 El Cento(NS, 1940) 지진하중을 가하여 시간이력해석을 수행하였고 각 해석모델의 최상층 변위시간이력을 비교하여 그림 11(c)에 나타내었다. 예상한 것처럼 모델 F와 모든 응축모델의 결과가 거의 일치하는 것을 확인 할 수 있다. 정적 및 동적해석결과를 통하여 본 논문에서 제안한 6가지의 응축모델 중 어떤 것을 사용하더라도 엔지니어링 측면에서는 매우 정확한 지진응답을 얻을 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

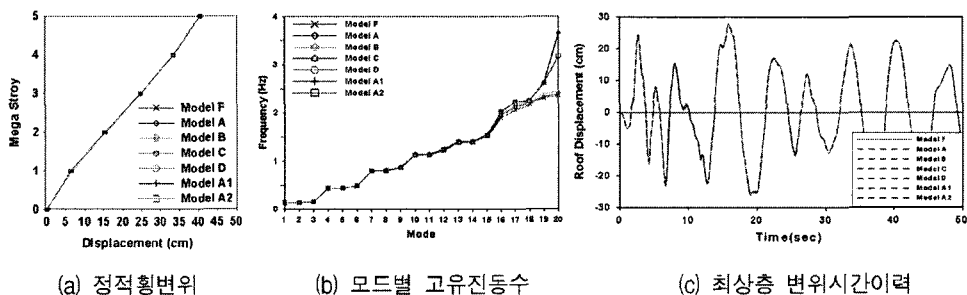


그림 11 해석결과의 비교

본 연구에서 개발한 초대형 골조시스템 전용 해석프로그램의 효율성을 검토해보기 위하여 해석에 소요되는 자유도수와 해석시간을 표 1에 나타내었다. 표에서 볼 수 있듯이 모델 F는 78,000개의 모든 자유도를 해석에 사용하기 때문에 정적 및 동적해석에 소요되는 시간은 어떤 모델보다 많이 소요되는 것을 알 수 있다. 특히 subspace iteration 방법을 사용한 고유치해석과정에서 상당히 많은 시간을 소모하고 있다. 각 응축모델들을 보면 메가요소, 메가프레임 및 전체구조물 구성과정에서 행렬응축에 시간이 소요되는 것을 알 수 있다.

표 1 모델별 자유도수 및 해석시간의 비교

Model	Number of DOFs	Assemble Stiffness and Mass Matrix				Static Analysis		Dynamic Analysis		Total Time	Ratio (%)
		Sub-mega Element	Mega Element	Mega Frame	Global Structure	Factorize	Solve	Eigen Value	Time History		
F	78,000	-	-	-	-	568.469	140.922	33,164.887	1,894.969	35,769.247	100.00
A	40	7.937	96.719	141.336	141.641	0.000	0.000	0.172	0.469	388.204	1.09
B	140	7.906	101.140	159.204	171.218	0.015	0.000	0.839	1.500	441.842	1.24
C	340	8.062	99.110	177.953	226.515	0.110	0.000	4.125	3.609	519.484	1.45
D	1,000	8.125	108.343	243.000	454.937	2.594	0.032	35.531	10.610	863.202	2.41
A1	3,040	7.875	96.641	141.890	-	16.875	0.359	184.516	33.718	481.874	1.35
A2	9,360	8.015	98.703	-	-	71.500	2.406	895.656	105.829	1,182.109	3.30

전체구조물의 정적 및 동적거동을 파악하는 데에는 어떤 응축모델을 사용하더라도 매우 정확한 결과를 얻을 수 있으므로 세분모델의 1%의 해석시간만을 소요하는 모델 A를 사용하는 것이 가장 효율적이라고 판단된다. 그러나 표에서 보는 바와 같이 행렬응축에 소요되는 시간이 적지 않기 때문에 정적해석만을 수행하고자 한다면 해석에 사용되는 자유도 수를 무조건 최소화하려고 노력하기 보다는 응축에 소요되는 시간과 남은 자유도를 이용한 해석에 소요되는 시간의 관계를 고려해서 절절할 수의 자유도를 응축하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 즉 응축모델 A1이나 A2가 정적해석에는 더 효과적으로 사용될 수 있으리라 판단된다.

7. 결론

본 연구에서 개발한 초대형 골조구조물 전용 전처리기를 사용하면 초대형 골조구조물의 구조적 특징에 관한 메가요소, 메가프레임, 전체구조물의 3단계 과정을 통하여 모형화 작업을 수행하므로 해석모델의 생성에 소요되는 시간 및 노력을 절약할 수 있다. 또한 기하그룹 및 부재그룹을 서로 다르게 입력할 수 있도록 하여 모형화 과정의 효율성을 저하시키지 않고 부재의 단면과 재질을 쉽게 변경할 수 있다. 본 연구에서 개발된 대형 골조구조물 전용 후처리기의 사용은 다수의 구조부재로 이루어진 메가요소를 하나의 보요소로 표현하기 때문에 구조물의 전체적인 거동을 파악하기가 매우 용이하리라 판단된다.

해석에 사용되지 않는 자유도를 한꺼번에 응축을 한다면 상당한 양의 컴퓨터 메모리와 계산시간이 응축과정에 소요되므로 본 연구에서는 메가요소와 메가프레임의 개념을 도입하여 행렬응축과정을 여러 차례 나누어 수행하여 응축시간을 줄일 수 있었다. 더 나아가 각 단계에서 소요되는 행렬응축시간을 더욱 줄이기 위하여 서브메가요소, 메가절점단위 응축, 메가층단위 응축기법을 도입하였고 이러한 방법들을 사용하면 계산해야할 역행렬의 크기를 줄일 수 있어서 행렬응축에 소요되는 시간을 더욱 감소시킬 수 있다.

초대형 골조구조물은 메가칼럼 및 메가거더로 이루어진 저층 골조와 비슷한 거동을 나타내는 특징을 보이므로 메가절점의 중앙에 존재하는 절점의 수평방향 자유도만으로도 비교적 정확하게 전체 구조물의 거동을 나타낼 수 있다.

감사의 글

본 논문은 2005년도 성균관대학교 Post-Doc. 연수지원에 의하여 연구되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 김현수, 김승준, 이동근(2005) 초대형 골조시스템의 효율적인 해석모델, 한국전산구조공학회 학술발표논문집, 18(1), pp.105-112
- Archer, G.C. (2001) A technique for the reduction of dynamic degrees of freedom, *Earthquake Eng Struct Dyn*, 30, pp.127-145
- Bouhaddi, N., Fillod R. (1996) Substructuring by a two level dynamic condensation method, *Computers and Structures*, 49, pp.403-409
- Bouhaddi, N., Fillod R. (1996) Model reduction by a simplified variant of dynamic condensation, *Journal of Sound and Vibration*, 191(2), pp.233-250
- Guyan, R.J. (1965) Reduction of stiffness and mass matrices, *AIAA J*, 3(2), 1965, p.380