

초대형 골조시스템 전용 전후처리 및 해석프로그램의 개발

Development of Structural Analysis and Pre-post Program for Mega Frame System

김 현 수†

Kim, Hyun-Su

이 동 근*

Lee, Dong-Guen

(논문접수일 : 2005년 9월 30일 ; 심사종료일 : 2006년 8월 30일)

요 지

근래에 들어서 사회적 및 경제적인 요구에 의하여 건축구조물이 점차 고층화 및 대형화됨에 따라서 다양한 형식의 구조시스템이 연구 및 개발되고 있다. 비교적 최근에 개발된 초대형 골조시스템은 초대형부재의 조합으로 횡방향 강성을 충분히 발휘함으로써 초고층건물에 적합한 구조시스템으로 인식되고 있다. 그러나 이러한 초대형 골조시스템을 적용한 건물의 거동을 예측하기 위해서는 매우 많은 수의 절점과 요소로 이루어진 유한요소 모델을 해석해야 하므로 상당한 양의 해석시간과 엔지니어의 노력이 필요하게 된다. 따라서 본 연구에서는 초대형 골조시스템 전용 해석프로그램을 개발하여 초대형 골조구조물의 해석과 설계에 소요되는 시간과 노력을 줄이고자 한다. 이를 위하여 초대형 골조구조물의 특징을 활용한 효율적인 모형화기법과 행렬응축기법을 사용하여 해석에 사용되는 자유도수를 최소화도록 만든 해석모델이 개발되었다. 예계구조물의 해석을 수행하여 본 연구에서 개발된 프로그램을 사용한 결과와 일반적인 해석방법에 의한 결과와 비교함으로써 개발된 프로그램의 효율성과 정확성을 검증하였다.

핵심용어 : 초대형 골조시스템, 고층건물, 행렬응축, 부분구조법, 메가요소

Abstract

Recently, various types of structural systems for skyscrapers are studied as the height and size of the building structures rapidly increase due to social and economical needs. The mega frame system among them, which is the structural system developed recently, is known as a suitable structural system for skyscrapers because this structural system has sufficient stiffness against the lateral forces by combination of mega members which consist of many columns and girders. 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. The effectiveness and accuracy of the developed program are verified by the comparison between the results of the proposed method and the conventional method.

Keywords : mega frame system, high-rise buildings, matrix condensation, substructure, mega elements

1. 서 론

구조공학의 발전과 더불어 사회적 및 경제적인 요구에 의하여 건축구조물이 점차 고층화 및 대형화되는 경향이 가속화 되고 있다. 따라서 효율적인 구조시스템을 이용하여 비교적 적은 양의 구조재료를 사용하고도 구조적으로 안정

한 초고층 건물을 구현하는 방법에 대한 다양한 연구들이 여러 연구자들에 의하여 수행되고 있다(Ryszard 등, 1995, Wolfgang, 1990). 초고층 건물이 횡하중에 효율적으로 저항하기 위한 경제적인 구조 시스템은 여러 가지 변수에 따라 달라지지만 일반적으로 40층~60층 높이에서는 벨트 트러스를 이용한 아웃리거 시스템이 많이 사용되

† 책임저자, 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 박사후 연구원

전화: 031-290-7574 ; Fax: 031-290-7570

E-mail: digiarchi@skku.edu

* 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 교수

• 이 논문에 대한 토론을 2006년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2007년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

고 있고, 50층~100층 정도의 구조물에서는 튜브 구조 시스템이 경제적인 시스템으로 알려져 있다. 최근에 들어서는 현재까지 건설된 400~500m 정도의 높이를 가지는 초고층 건물을 뛰어넘어서 1000m 이상의 초고층 건물에 적용할 수 있는 구조시스템에 대한 관심이 증대되고 있고, 이에 대한 연구가 진행 중에 있다.

초대형 골조시스템(mega frame system)은 비교적 최근에 개발된 구조시스템으로 현재 건설되고 있는 건물보다 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. 초대형 골조시스템을 사용하여 현재 건설된 가장 대표적인 건물로는 노만 포스트에 의해 설계된 HSBC(Hong-kong Shanghi Bank Coperation)를 들 수 있다. 현재까지는 초대형 골조 시스템을 이용하여 건설된 건물이 많지 않지만, 미래의 초고층 건물 개발 계획에서는 초대형 골조시스템을 많이 사용하고 있다. 일본 takenaka 건설회사에서는 현재까지 건설된 초고층 건물보다 2배 이상 높은 미래의 초고층 건물인 Holonic Tower와 Sky City 1000을 연구하면서 초대형 골조시스템을 채택하고 있다. 또한 Le Messurier 구조 설계 사무소에서는 초대형 골조시스템을 이용하여 200층 규모의 Erewhon Center를 계획하였다.

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 해석해야 하는 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. 일반적으로 초고층 건물의 구조설계는 구조시스템 설계, 구조해석 및 부재단면 설계 등의 과정을 통하여 이루어지며 각각의 단계에서 설계요구 조건을 만족시키는 최적의 시스템 및 부재단면을 알아내기 위하여 반복적인 해석이 필요하게 된다. 경우에 따라서는 수십회 이상의 재해석 과정이 반복되므로 일반적인 해석방법을 이용하여 초대형 골조구조물을 모형화, 해석, 설계하고자 한다면 반복되는 해석에 엄청난 계산시간과 노력이 필요하게 될 것이다. 따라서 자유도수가 많은 초대형 구조물을 설계할 때 발생하게 되는 이러한 어려운 점을 해결하기 위하여 초대형 구조물의 효율적인 해석기법에 대한 다양한 연구가 현재까지 여러 연구자들에 의하여 진행되어 왔다(Archer, 2001; Bouhaddi 등, 1992, 1996a, 1996b; Hurty 등, 1971; Leung 등, 1998; Kim 등, 2005; Petersson 등, 1977). 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 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 개발

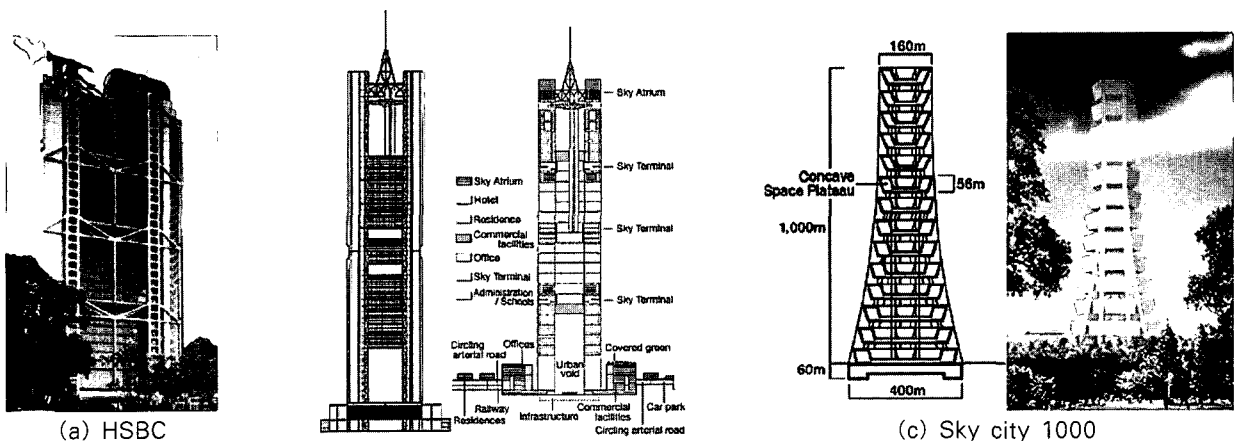


그림 1 초대형 골조시스템을 이용한 초고층건물

하였다. 수만개의 요소로 구성된 초대형 골조구조물의 전체적인 거동을 일반적인 해석프로그램을 사용하여 분석하고자 한다면 프로그램의 운용시간도 많이 소요될 뿐만 아니라 구조물의 응답 및 거동을 분석하기도 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 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 예제구조물 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

초대형 골조시스템은 전술한 바와 같이 다수의 부재들이 밀집된 대형 구조부재인 메가칼럼과 메가거더로 구성된다. 이 시스템에서 강성이 큰 부재들로 긴밀하게 연결된 메가칼럼 및 메가거더는 일체화된 거동을 하므로 개개의 단일 부재와 유사한 거동을 하게 된다. 그러므로 초대형 골조시스템은 메가칼럼 및 메가거더로 이루어진 저층 골조와 비슷한 거동을 나타내는 특징을 보여준다. 즉, 그림 2(a)와 같은 100층의 초대형 골조구조물은 5층의 저층 골조와 전체적으로 유사한 거동을 나타낸다. 따라서, 메가부재가 연결되는 부분(메가절점)의 자유도만을 사용해서 해석을 하더라도 초대형 골조구조물의 전체적인 거동을 파악할 수 있으리라 판단된다. 이러한 방법을 사용하면 수십만 개의 자유도로 이루어진 평형방정식 대신에 수십 개에서 수백 개로 이루어진 평형방정식을 풀면 되므로 해석의 효율성을 크게 향상시킬 수 있다. 그러나 수십만 개의 자유도를 행렬 응축기법을 통하여 한꺼번에 소거를 한다면 행렬응축에 막대한 시간이 소요될 것이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 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 한 층의 초대형 골조를 구성하고(그림 2(d)) 이 초대형 골조를 쌓아올려 전체 구조물을 구성한다. 메가요소를 이용한 초대형 골조구조물의 모형화 과정을 그림 2에 나타내었고, 행렬응축을 통하여 메가요소를 생성

하는 과정을 그림 3에 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.

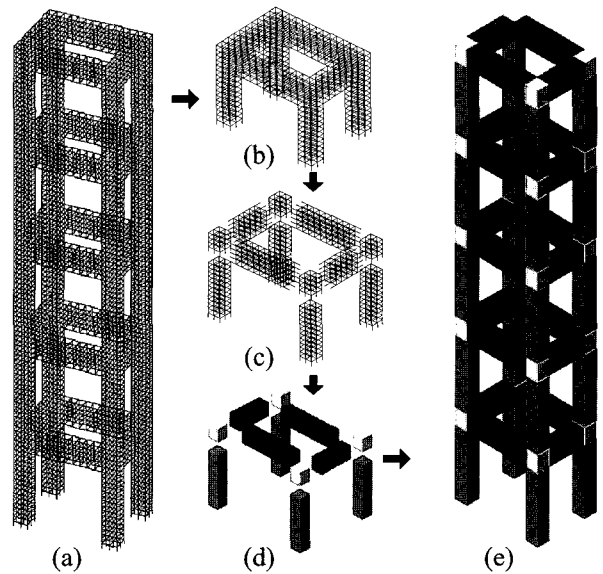


그림 2 메가요소를 이용한 초대형 골조구조물의 모형화

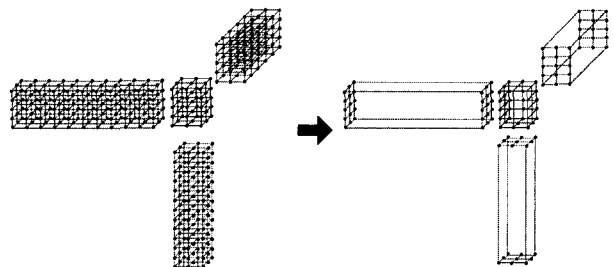


그림 3 행렬응축을 통한 메가요소의 생성

3. 초대형 골조구조물 전용 전처리기의 개발

앞 절에서 제안한 모형화 방법을 사용하면 전체구조물이 복잡하게 구성되었을 지라도 메가요소만을 대상으로 모델을 만들므로 응축시킬 자유도를 쉽게 지정할 수 있고, 이렇게 만들어진 메가요소를 조립하여 전체구조물을 생성하므로 메가요소 생성단계를 생략한다면 단순한 보요소로 구성된 저층골조를 모형화하는 것처럼 모형화 과정이 매우 간편해진다. 또한 초대형 골조시스템은 동일한 메가부재가 여러 위치에서 반복적으로 사용되는 특징이 있다. 따라서 한번 구성한 메가요소의 강성 및 질량행렬을 반복적으로 사용할 수 있으므로 모형화 및 해석의 효율성을 크게 향상시

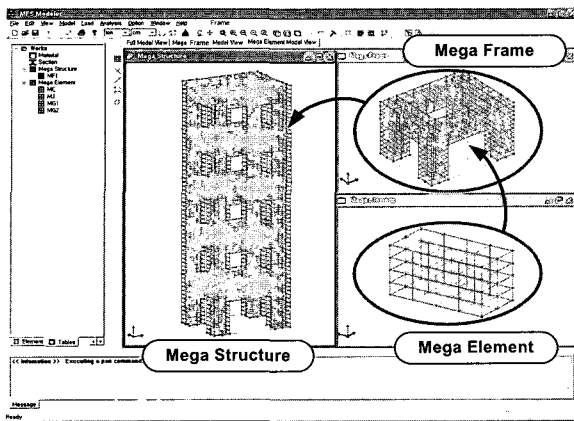


그림 4 초대형 골조구조물 전용 전처리기

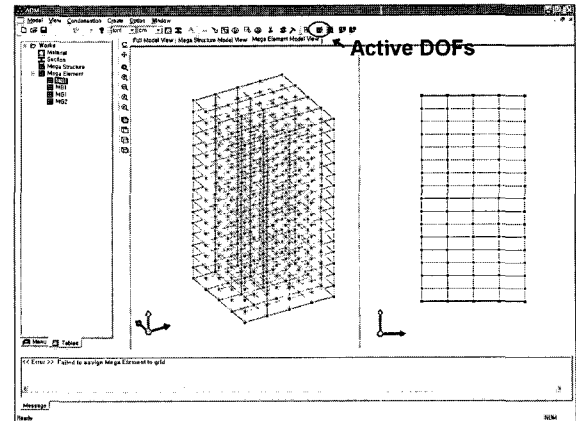


그림 5 메가요소 생성과정

킬 수 있다. 본 연구에서는 이러한 내용을 모두 포함하는 초대형구조물 전용 전처리기를 개발하여 구조물의 모형화 및 수정에 소요되는 노력을 대폭 절감시킬 수 있도록 하였다. 본 연구에서 개발한 전처리 프로그램을 그림 4에 나타내었다.

본 연구에서 개발한 전처리 프로그램은 그림에서 보는 바와 같이 메가요소를 만든 후 이를 조합하여 한 층의 단위 초대형 골조로 조합하고 생성된 초대형 골조를 반복적으로 쌓아올려서 전체 초대형 골조구조물을 생성하는 3가지 단계로 구성되어 있다. 각각의 단계에서는 남길 자유도와 소거될 자유도를 지정하여 행렬응축을 수행함으로써 효율적인 해석모델을 생성한다. 이러한 모형화 과정을 일반 상용 구조해석프로그램을 이용해서 수행하는 것은 불가능하다. 그림 4에 나타난 예제는 모형화 방법의 설명을 위하여 도입한 간단한 예제로서 전형적인 프레임의 형상을 가지고 있지만 보다 복잡한 형태의 초대형 골조구조물도 본 프로그램의 메가요소, 단위 초대형 골조, 초대형 골조구조물의 3단계 모형화 방법을 적용하면 보다 용이하게 모형화가 가능하리라 판단된다. 본 연구에서 개발한 프로그램을 사용하여 메가요소를 모형화하는 과정을 그림 5에 나타내었다. 각 층의 층고 및 스펠, 슬래브의 두께 등을 입력받아서 한 단위블록의 골조구조물을 생성한 후 메가요소의 연결 관계를 고려하여 남길 자유도의 절점을 선택하고 나서 그림 5에 나타난 "Active DOFs" 버튼을 누르면 선택된 절점에 존재하는 자유도를 제외하고 나머지 모든 자유도가 응축될 자유도로 결정된다. 이때 남길 자유도의 절점을 효과적으로 선택하기 위하여 그림 5와 같이 다양한 메가요소를 다양한 각도로 돌려보거나 줌 기능 등을 사용하여 해당 절점을 선택할 수 있고 한번 선택된 절점은 보는 방향을 달리하더라도 계속 유지되므로 원하는 절점을 효율적으로 선택할 수 있다.

각 단계에서 생성된 메가요소는 프로그램 왼편의 트리뷰를 통해서 일목요연하게 확인 및 관리할 수 있고, 각 항목은 드래그 앤 드롭 기능을 통하여 손쉽게 조합할 수 있다. 본 연구에서 개발한 초대형 골조구조물 전용 전처리기를 통해서 메가요소를 조립하여 한 층의 초대형 골조를 생성하는 과정을 그림 6에 나타내었다. 메가요소를 이용해서 초대형 골조를 생성할 때 그리드 라인에 마우스가 붙어 다니는 스냅기능을 구현하여 각각의 메가요소가 삽입이 가능한 곳에만 마우스 커서가 움직이므로 모형화 작업의 효율성을 향상시키고 오류를 일으킬 가능성을 최소화 할 수 있도록 하였다. 또한 그림 6에서 보는 바와 같이 메가요소에서 살아있는 자유도의 절점은 크게 표시함으로써 사용자들이 직관적으로 메가요소의 연결관계를 확인할 수 있도록 하였고 연결될 수 없는 곳에 메가요소를 할당하려고 할 때에는 그림 6의 message 창에 나타난 것과 같은 경고 메시지가 나오게 됨으로써 모형화과정에 소요되는 사용자의 노력을 줄이고자 하였다.

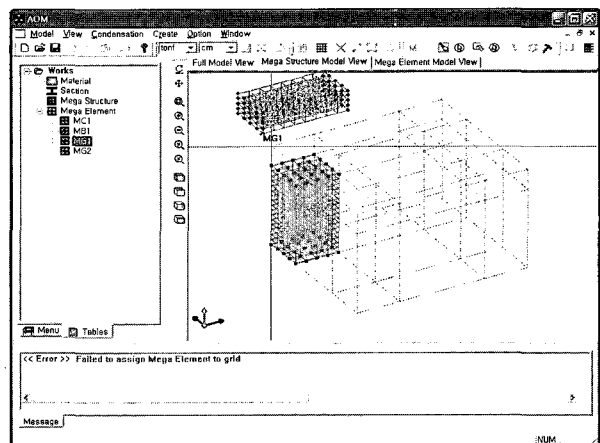
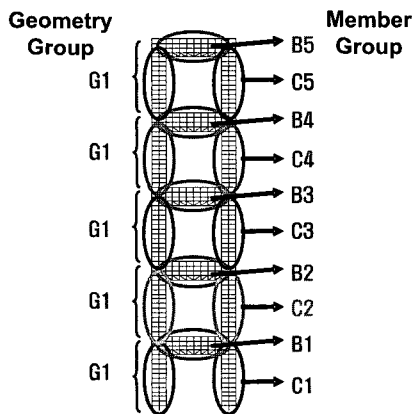
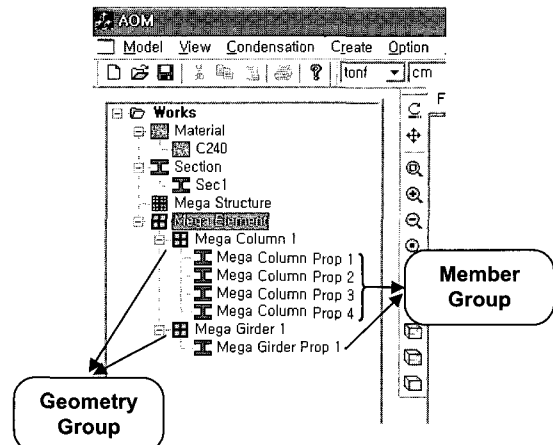


그림 6 메가요소의 조합과정



(a) 기하그룹 및 부재그룹의 개념



(b) 전처리기에서 그룹의 활용

그림 7 기하그룹 및 부재그룹을 사용한 초대형 골조구조물의 모형화

초대형 골조구조물이 동일한 형상의 초대형 골조가 여러 번 반복되어 사용된다고 할지라도, 즉 기하학적 형상이 반복된다고 할지라도, 구조부재의 크기나 재질은 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발된 전처리기에서는 기하그룹과 부재그룹의 두 가지 그룹개념을 도입하여 반복되는 기하형상의 특징을 최대한 이용하여 모형화의 효율을 높일 수 있도록 하는 한편 설계 작업 중 지속적으로 발생하는 부재 크기의 변경작업을 효과적으로 수행할 수 있도록 하였다. 그림 7(a)에 기하그룹과 부재그룹의 개념을 소개하였다. 그림에서 보는 바와 같이 동일한 형상의 한 층의 초대형 골조가 5번 반복되므로 초대형 골조를 구성하는 각 메가요소의 부재연결정보 등은 한번만 모형화한 후 'G1'이라는 기하그룹 이름으로 반복적으로 사용되는 것을 알 수 있다. 그러나 메가골조의 형태는 동일할 지라도 각각의 부재가 위치한 층에 따라서 재하되는 하중의 크기가 달라지므로 사용되는 부재의 크기는 달라져야 할 것이다. 따라서 동일한 기하그룹 안에서도 서로 다른 부재그룹을 지정할 수 있도록 하였고 메가요소에 동일한 부재가 사용된다면 같은 부재그룹을 부여하여 부재의 지정이나 변경이 편리하게 하였다. 그림 7(b)에는 이러한 그룹개념이 도입된 전처리 프로그램의 트리뷰를 나타내었다. 전처리 프로그램을 통하여 작성된 해석모델은 해석프로그램의 입력파일로 자동 변환되어 해석이 수행된다.

4. 초대형 골조구조물 전용 해석프로그램의 개발

본 연구에서는 해석에 사용되는 자유도수를 줄이기 위하여 행렬응축기법을 통하여 자유도를 소거하였다. 또한 응

축에 소요되는 시간 및 컴퓨터 메모리를 절약하기 위하여 메가요소를 사용한 모형화방법을 제안하여 메가요소 단위로 행렬응축을 수행하였다. 그러나 하나의 메가요소가 매우 클 경우 메가요소를 응축하는 데에도 상당한 시간이 소요될 수 있다. 또한 메가요소를 조립하여 한 층의 초대형 골조를 구성한 후에 초대형 골조를 쌓아올릴 때 필요한 자유도를 제외한 나머지 자유도를 응축하는 것이 필요하고 계속해서 전체 구조물을 생성한 이후에는 메가절점당 3개의 이동자유도를 제외하고 나머지 모든 자유도를 응축하는 과정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 메가절점 단위 응축, 메가층 단위응축 및 서브메가요소의 개념을 도입함으로써 각 단계의 행렬응축에 소요되는 시간과 컴퓨터 메모리를 최소화하도록 하였다. 본 장에서 제안한 해석방법을 모두 적용하여 초대형 골조 전용 해석프로그램을 개발하였다.

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 구해야할 역행렬의 크기를 줄이고자 한다. 그림 8에 서브메가요소를 이용하여 메가요소를 모형화하는 과정을 나타내었다.

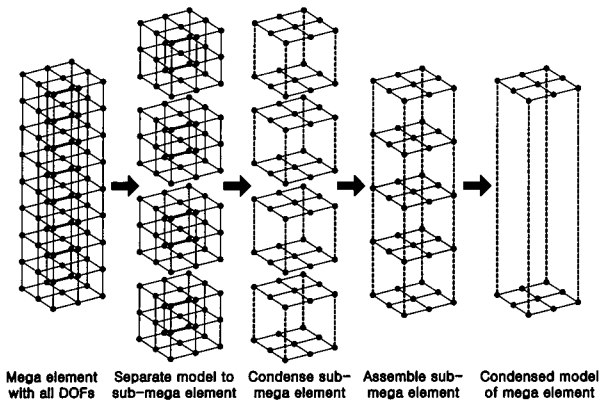


그림 8 서브메가요소를 이용한 메가요소의 모형화 과정

그림 8에 나타낸 간단한 메가요소 모델을 그림 3에서 소개한 방법같이 메가요소 내부에 있는 자유도를 한꺼번에 응축한다면 응축되는 자유도는 378개가 되고, 남아있는 자유도는 108개가 되므로 행렬응축과정에서 378×378 크기의 역행렬을 구해야 한다. 이런 방법으로 계산을 했을 때 약 1.5초의 시간이 소요되었다. 그러나 그림 8과 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. 본 연구에서 개발한 해석프로그램에서는 그림 8과 같은 방법으로 메가기둥과 메가거더를 모형화하고, 메가절점은 내부의 자유도를 한번에 응축하는 방법을 사용한다. 메가요소를 모형화할 때 각 층의 슬래브는 엔지니어의 판단에 따라서 모형화하지 않을 수도 있고 또는 강막가정이나 판요소로 모형화할 수도 있다. 이것은 본 연구에서 개발한 초대형구조물 전용 전처리기의 모형화 옵션에 의하여 간단히 선택될 수 있으며 강막가정이 선택될 때에는 응축되거나 남겨지는 자유도 수가 줄어들게 되어 더욱 효율적인 해석이 가능하게 된다.

4.2 메가절점단위 행렬응축을 이용한 단위 초대형 골조의 모형화

앞 절에서는 메가요소간의 연결을 위한 절점만을 남기고 나머지 절점의 자유도를 응축한 메가요소를 생성하였다. 이렇게 생성한 메가요소와 메가절점을 조합하여 그림 9(a)와 같이 한 층의 초대형 골조를 구성한다. 계속해서 본 연구에서는 전체구조물의 해석에 사용되는 자유도의 수를 더욱 줄이기 위해서 메가요소의 연결에 사용된 자유도를 소거한다. 이러한 방법으로 응축된 단위 초대형골조에는 이것들을 다층으로 쌓아올릴 때 연결을 위해서 필요한 절점과 전체 구조물의 해석에 사용될 메가절점 가운데 존재하는 절점의 자유도만 남게 된다. 이와 같이 해석에 사용될 자유도를 줄

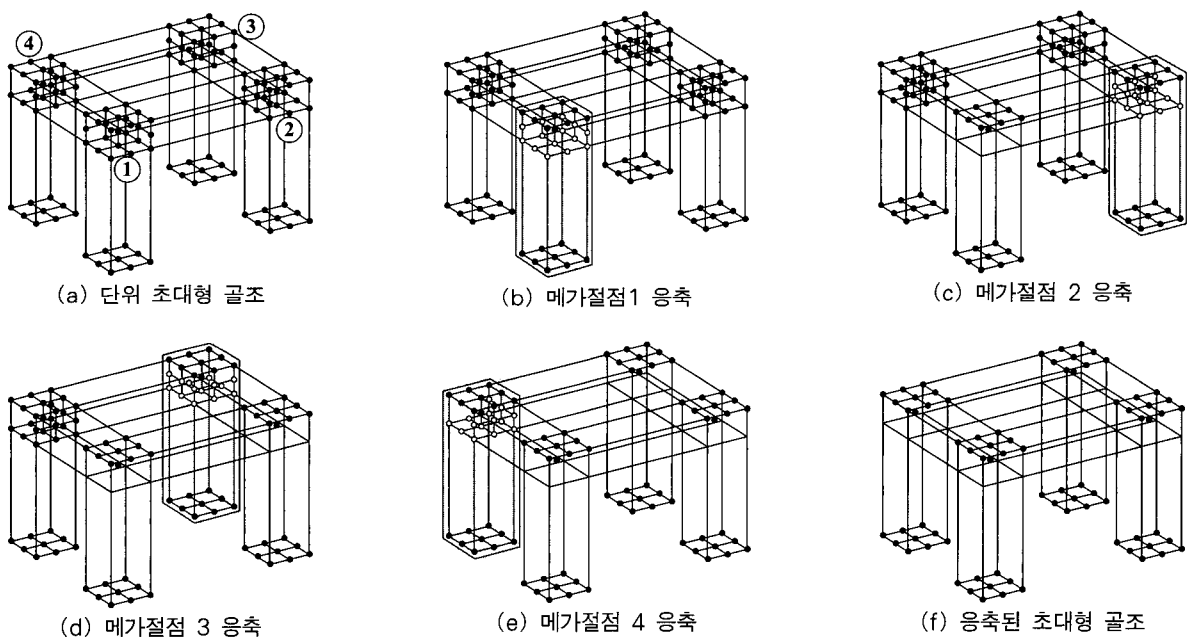


그림 9 메가절점단위의 단위 초대형 골조 모형화 과정

이기 위해서 단위 초대형 골조를 구성한 후에 메가요소간의 연결절점의 자유도를 응축할 때 메가요소의 규모가 크거나 메가요소의 수가 많아지게 되면 행렬응축에 소요되는 시간이 무척 커질 수 있다. 따라서 본 논문에서는 메가절점 단위의 행렬응축기법을 도입하여 응축과정에 소요되는 시간을 줄이고자 하였고 이 과정을 그림 9에 나타내었다.

4.3 메가층단위 행렬응축을 이용한 초대형 골조구조물의 모형화

본 논문에서는 앞 절에서 생성한 단위 초대형 골조를 조합하여 전체 초대형 골조구조물을 모형화한 후 최종적으로 초고층구조물의 거동을 나타내는데 필요한 최소한의 자유도만을 남기고 나머지 자유도를 응축함으로써 효율적인 초대형 골조구조물의 해석모델을 생성한다. 이렇게 전체 구조물 단계에서 행렬응축을 할 경우에 소거되는 모든 자유도를 한꺼번에 응축하고자 한다면 앞에서 설명한 바와 같이 행렬응축과정에서 상당한 양의 계산시간 및 컴퓨터 메모리가 소요되게 된다. 본 논문에서는 초대형 골조구조물의 조립 과정에서 소요되는 행렬응축시간을 절약하기 위해서 층단위 행렬응축기법을 도입하였다. 전체 구조물 단계에서 응축시킬 자유도의 수를 N 개라고 하고, 메가층수를 S 층이라고 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.

5. 초대형 골조구조물 전용 후처리기의 개발

본 연구에서는 초대형 골조구조물의 거동을 효과적으로

분석하기 위하여 전용 후처리기를 개발하였다. 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. 일반적인 상용프로그램을 이용해서 계산한 초대형 골조구조물의 모드형상과 고유진동주기를 그림 10에 나타내었다.

그림 10에서 보는 바와 같이 구조부재의 수가 워낙 많아서 구조물의 거동을 정확히 파악하기가 쉽지 않다. 특히 고차모드로 갈수록 구조물이 휘어지거나 비틀어지는 거동이 더욱 심하게 발생하므로 구조물의 변형형상을 파악하기가 쉽지 않은 것을 알 수 있다. 이러한 불편한 점을 해소하기 위하여 본 연구에서는 초대형 골조구조물 전용 후처리기를 그림 11과 같이 개발하였다. 개발된 후처리기는 그림 11에서 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. 개발한 후처리 프로그램을 이용하여 표현한 초대형 골조구조물의 모드형상을 그림 12에 나타내었다. 그림 10에서 나타낸 것과 동일한 모드의 모드형상을 나타내었는데 그림에서 보듯이 그림 10에 비하여 매우 용이하게 구조물의 거동을 파악할 수 있다. 본 연구에서 개발한 초대형 골조구조물 전용 해석프로그램으로 계산한 각 모드의 주기를 그림 12에 나타내었다. 그림 10의 일반적인 해석방법으로 계산한 고유진동주기와 비교해보면 본 연구에서 개발한 해석프로그램의 정확성을 확인할 수 있다. 그림 11(b)는 구조물의 시간이력해

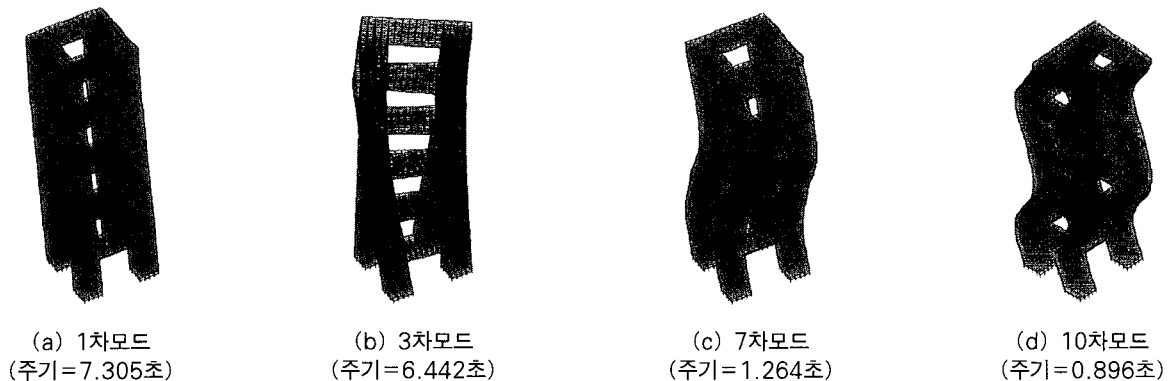
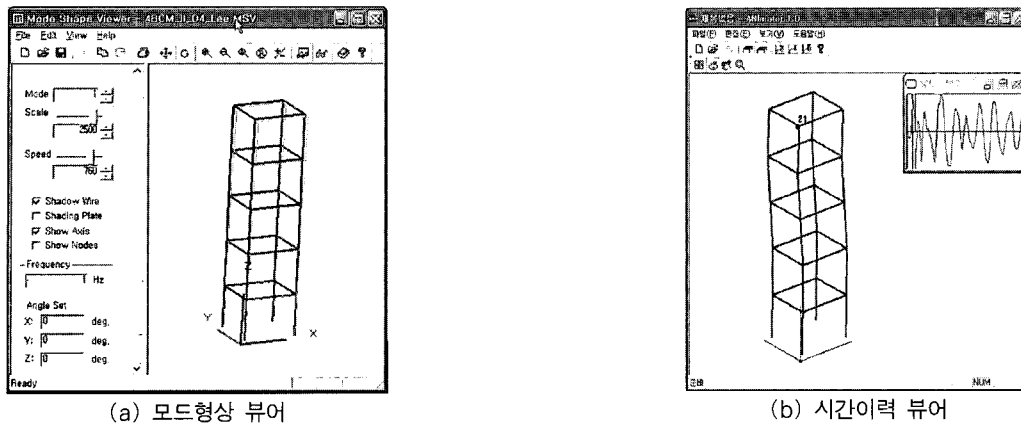
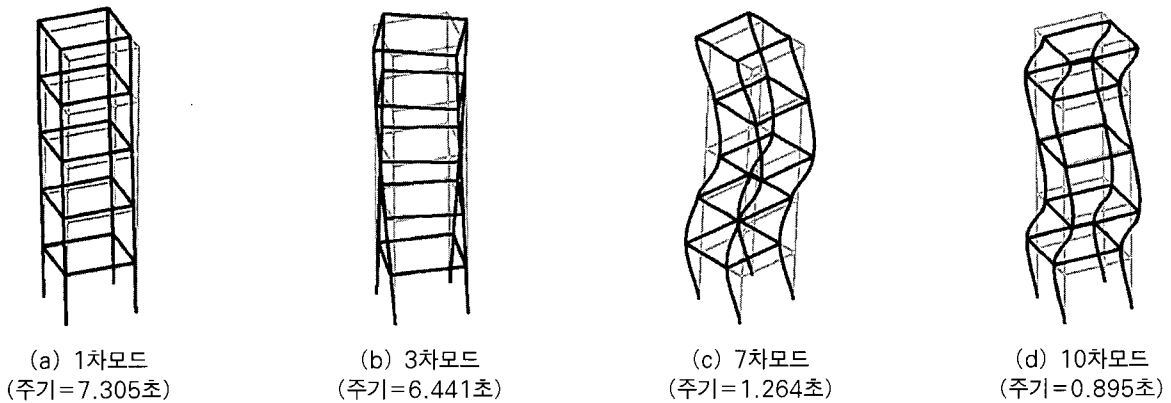


그림 10 일반적인 상용 구조해석프로그램에 의한 모드형상 및 고유진동주기



(a) 모드형상 뷰어 (b) 시간이력 뷰어

그림 11 초대형 골조구조물 동적거동 분석을 위한 후처리기



(a) 1차모드 (주기=7.305초) (b) 3차모드 (주기=6.441초) (c) 7차모드 (주기=1.264초) (d) 10차모드 (주기=0.895초)

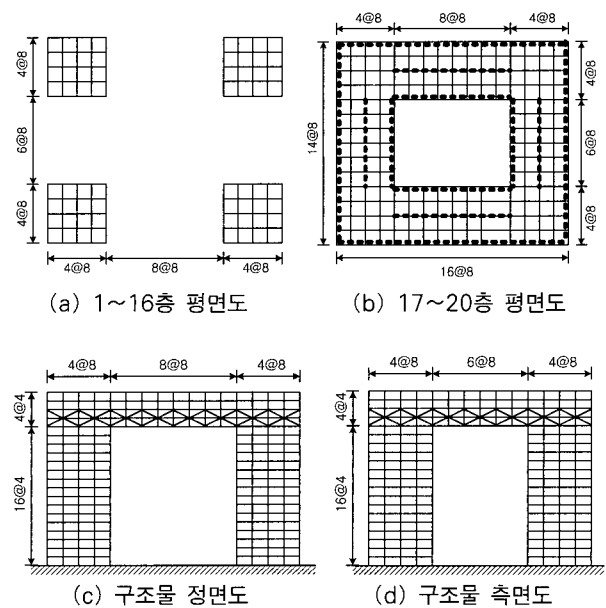
그림 12 초대형 골조구조물 전용프로그램에 의한 모드형상 및 고유진동주기

석결과를 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 초기설계 단계에서 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

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 예제구조물은 높이 400m인 100층 구조물이다. 예제 구조물의 모형화를 위하여 그림 10에서 보는 바와 같은 20층의 단위 초대형 골조를 사용하였고 이 초대형 골조 5개를 조합하여 100층의 전체 구조물을 구성하였다. 전체구조물의 횡변위와 메가거더의 처짐을 제어하기

위해 브레이스를 설치하였다. 본 논문에서 각 층의 슬래브는 모두 15cm 두께이고 판요소를 사용하여 모형화하였다.



(a) 1~16층 평면도 (b) 17~20층 평면도 (c) 구조물 정면도 (d) 구조물 측면도

그림 13 100층 예제구조물의 평면 및 입면

본 연구에서는 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 해석모형을 알아보기 위해 그림 14의 5가지 해석모형을 사용하였다. 각 해석 모델에서 질량은 집중질량을 사용하였다. 그림 14(a) 응축모델 A는 메가절점 중앙의 한 개 절점에서 수평방향 이동자유도만 이용한 모델로 총 40개의 자유도를 사용하는 해석모델이고 단일부재로 구성된 저층(5층) 프레임 구조물과 동일한 자유도를 가진다. 그림 14(b) 응축모델 B는 메가절점의 중앙 1개 절점과 메가기둥 중앙의 1개 절점 그리고 메가거더의 중앙에 1개 절점에서 자유도를 사용하는 해석 모델로 총 140개의 자유도를 가지며 응축모델 A에서는 확인할 수 없는 메가거더 및 메가기둥의 국부적인 휨거동을 대략적으로 표현할 수 있다. 응축모델 C 및 D는 메가기둥 및 메가거더의 국부적인 거동을 보다 정확하게 파악하기 위하여 더 많은 자유도를 사용한 모델로서 각각 340 및 1,000개의 자유도를 가진다. 해석 모델별로 자유도가 늘어남에 따라 해석시간은 증가하나 메가기둥 및 메가거더에 존재하는 자유도가 많아져서 전체 구조물의 거동을 더 정확하게 나타낼 수 있을 것으로 판단된다. 마지막으로 모델 F는 모든 절점에 자유도를 6개 가지고 있는 일반적인 해석모형을 나타낸다.

예제구조물에 대하여 소개한 5가지 해석모형을 사용하여 정적 및 동적해석을 수행하였다. 정적해석은 지반계수 1.2, 지역계수 0.11, 중요도계수 1.2의 등가정적 지진하중을 가하였고 각 단위 초대형 골조의 층변위를 비교하여 그림 15(a)에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 본 논문에

서 제안된 4개의 응축모델이 일반적인 해석모델인 모델 F의 해석결과와 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 각 응축모델의 모드별 고유진동수를 그림 15(b)에 나타내었다. 약 15차 모드까지는 모든 응축모델의 결과가 모델 F의 결과와 거의 비슷한 것을 확인할 수 있다. 19 및 20차 모드에서 응축모델 A의 오차가 큰 것을 볼 수 있는데, 이 모델은 메가기둥 및 메가거더 내부에 자유도가 없는 모델이다. 따라서 19차 및 20차 모드는 메가기둥이나 메가거더에서 국부적인 휨거동이 심한 모드임을 예상할 수 있다. 일반적으로 질량참여율의 누계가 90% 이상이 되는 경우 지진하중에 대한 구조물의 동적거동을 비교적 정확하게 나타낼 수 있다고 판단한다. 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 4개의 응축모델은 모두 15차 모드까지 모델 F의 고유진동수와 거의 비슷한 결과를 나타내므로 어떤 응축모델을 선택하던지 지진응답은 모델 F와 유사한 결과를 보일 것으로 예상할 수 있다. 모든 해석모델에 대하여 El Cento(NS, 1940) 지진하중을 가하여 시간이력해석을 수행하였고, 각 해석모델의 최상층 변위 시간이력을 비교하여 그림 15(c)에 나타내었다. 예상한 것처럼 모델 F와 모든 응축모델의 결과가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 메가기둥이나 메가거더의 내부에 자유도를 추가하여 메가요소의 국부적인 거동을 보다 정확하게 표현하고자 한 모델은 메가요소의 국부적인 거동을 유발시키는 구조물 내부의 특별한 하중에 대해서는 보다 효과적이겠지만 지진응답과 같이 구조물의 전체적인 거동을 파악하는 데에는 메가절점의 내부의 한 절점에만 자유도를 남긴 모델이 더욱 효율적이라는 것을 확인할 수 있다.

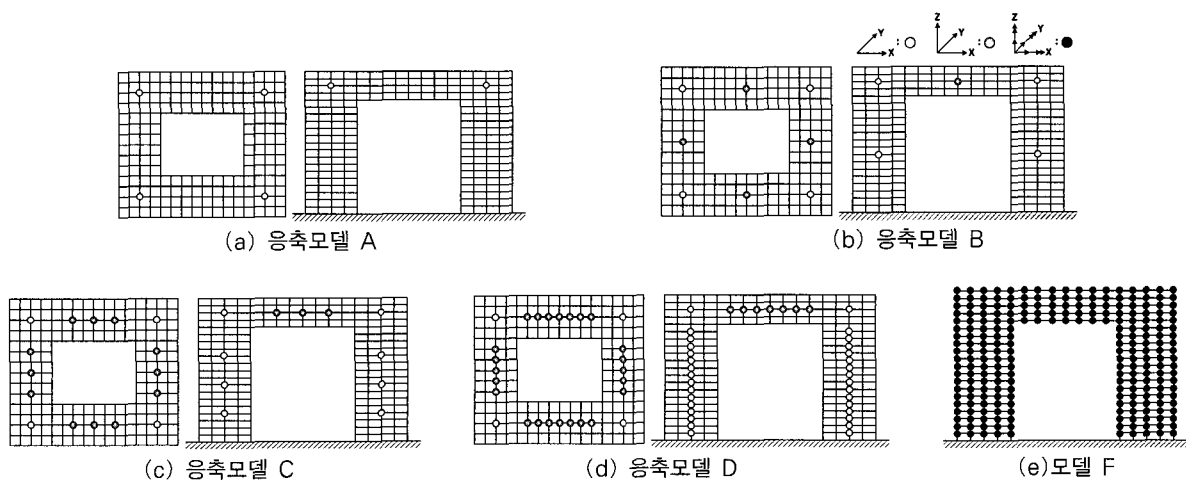


그림 14 응축모델의 종류

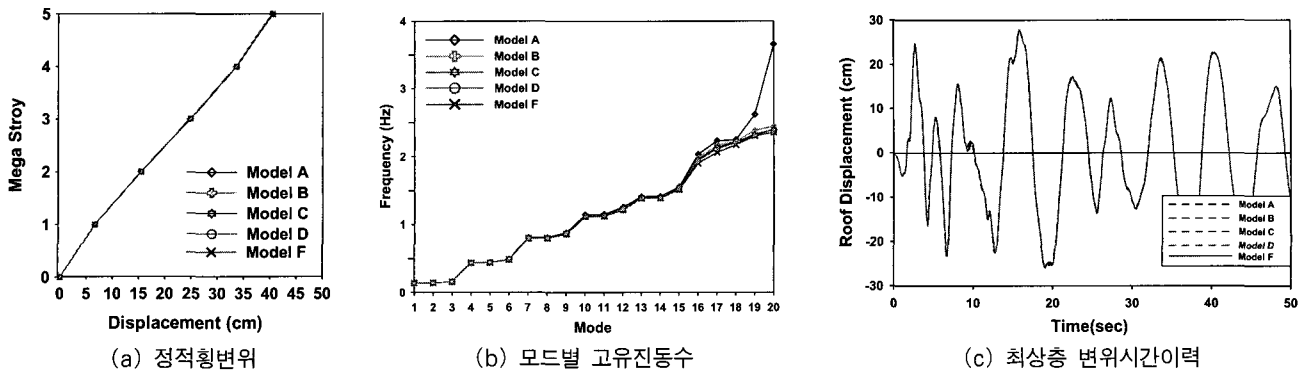


그림 15 해석결과의 비교

정적 및 동적해석결과를 통하여 본 논문에서 제안한 4가지의 응축모델 중 어떤 것을 사용하더라도 엔지니어링 측면에서는 매우 정확한 지진응답을 얻을 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 개발한 초대형 골조시스템 전용 해석프로그램의 효율성을 검토해보기 위하여 해석에 소요되는 자유도수와 해석시간을 표 2에 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, 단위 초대형 골조 및 전체구조물 구성과정에서 행렬응축에 시간이 소요되는 것을 알 수 있다. 그러나 행렬응축 후 정적 및 동적해석에 사용되는 자유도수를 모델 F에 비하여 대폭 줄일 수 있기 때문에 전체해석에 소요되는 시간을 줄일 수 있다. 응축모델 A~D를 보면 해석시간이 모델 F의 1~2% 정도밖에 안 되는 것을 확인할 수 있다. 메가기둥이나 메가거더 내부에 자유도를 남겨서 해석에 사용되는 자유도수가 증가할수록 해석에 소요되는 시간은 조금씩 더 증가된다. 표 2에서 ‘-’으로 표시된 항목은 해당사항 없음을 나타내고 ‘0.000’으로 표시된 항목은 컴퓨터에 측정할 수 있는

시간(1/1000초)보다 빠른 시간에 그 과정이 수행되었음을 나타낸다. 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.

7. 결론 및 추후 연구과제

초대형 골조시스템은 여러 개의 부재로 이루어진 대형구조부재가 하나의 모듈로서 반복적으로 사용되는 특징을 갖고 있다. 본 연구에서는 이러한 특징을 최대한으로 이용하여 초대형 골조시스템 전용 전후처리 및 해석프로그램을 개발하였다. 예제구조물의 해석을 통하여 개발된 해석프로그램의 정확성과 효율성에 대하여 검토하였고 본 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 본 연구에서 개발한 초대형 골조구조물 전용 전처리기를 사용하면 초대형 골조구조물의 구조적 특징에 기반한 메가요소, 단위 초대형 골조, 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

표 2 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	141.266	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	0.859	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	0.062	35.531	10.610	863.202	2.41

하여 모형화 과정의 효율성을 저하시키지 않고 부재의 단면과 재질을 쉽게 변경할 수 있다.

2. 초대형 골조구조물을 해석한 후 일반적인 상용프로그램을 사용하여 해석결과를 분석을 한다면 무수히 많은 구조부재 때문에 구조물의 거동을 파악하기가 쉽지 않고 프로그램의 동작시간도 길어져서 작업의 효율성이 떨어지게 된다. 그러나 본 연구에서 개발한 대형 골조구조물 전용 후처리기를 사용하면 다수의 구조부재로 이루어진 메가요소를 하나의 보요소로 표현하기 때문에 구조물의 전체적인 거동을 파악하기가 매우 용이하리라 판단된다. 특히 구조물의 전체적인 거동을 빠른 시간 안에 다양한 구조시스템을 적용시켜가면서 파악해야 할 필요가 있는 구조물의 초기설계 단계에서 효과적으로 사용될 수 있으리라 기대된다.
3. 본 연구에서는 초대형 골조시스템의 거동을 나타낼 수 있는 최소한의 자유도만을 사용하여 해석을 수행함으로써 해석에 소요되는 시간을 효과적으로 줄일 수 있었다. 해석에 사용되지 않는 자유도를 한꺼번에 응축을 한다면 상당한 양의 컴퓨터 메모리와 계산시간이 응축 과정에 소요되므로 본 연구에서는 메가요소와 단위 초대형 골조의 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 계산해야 할 역행렬의 크기를 줄일 수 있어서 행렬응축에 소요되는 시간을 더욱 감소시킬 수 있다.
4. 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 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산C04-01)에 의한 것임을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 김현수, 김승준, 이동근 (2005), 초대형 골조시스템의 효율적인 해석모델, 한국전산구조공학회 학술발표회논문집, 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.
- Bouhaddi, N., Fillod R. (1992), A method for selecting master dof in dynamic substructuring using the Guyan condensation, *Computers and Structures*, 45, pp.941~946.
- Guyan, R.J. (1965), Reduction of stiffness and mass matrices, *AIAAJ*, 3(2), 1965, p.380.
- Hurty, W.C., Collins, J.D., Hart G.C. (1971), Dynamic analysis of large structures by model synthesis technique, *Computers and Structures*, 1, pp.535~563.
- Kim, H.S., Lee, D.G, Kim, C.K. (2005), Efficient three dimensional seismic analysis of a high-rise building structure with shear walls, *Engineering Structures*, 27, pp.963~976.
- Leung, A.Y.T. (1988), A simplified dynamic substructure method, *Earthquake Eng Struct Dyn*, 16, pp.827~837.
- Petersson, H., Popov, E.P. (1977), substructuring and equation system solutions in finite element analysis, *Computers and Structures*, 7, pp.197~206.
- Ryszard, M.K., Rpbert, S., Max, B.K. (1995), *Structural Systems for Tall Buildings*, McGraw-Hill, Inc.
- Weaver, W., Jr., Johnson, P.R. (1987), *Structural Dynamics by Finite Elements*, Prentice Hall.
- Wolfgang, S. (1990), *The Vertical Building Structure*, Van Nostrand Reinhold, New York.