

다이어그리드 메가프레임 초고층 건물을 위한 효율적인 해석모델의 개발

Development of Efficient Analytical Model for a Diagrid Mega-Frame Super Tall Building

김 현 수* 강 주 원**
Kim, Hyun-Su Kang, Joo-Won

요 약

비정형 초고층건물을 위한 구조시스템 중에서 다이어그리드 구조시스템은 구조적인 효율성 및 조형성 때문에 널리 사용되고 있다. 근래에는 초고층건물을 위한 구조시스템으로 메가부재의 조합을 통하여 횡방향 강성을 효과적으로 발휘할 수 있는 메가프레임 시스템이 널리 사용되고 있다. 두 가지 구조시스템의 장점을 혼합한 다이어그리드 메가프레임 구조시스템은 미래형 초고층건물에 적용될 유망한 구조시스템으로 평가받고 있다. 그러나 이러한 다이어그리드 메가프레임 구조시스템을 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 다이어그리드 메가프레임시스템을 적용한 초고층건물의 거동을 효율적으로 해석할 수 있는 기법을 제안하여 다이어그리드 메가프레임 초고층건물의 해석과 설계에 소요되는 시간과 노력을 줄이고자 한다. 이를 위하여 다이어그리드 메가프레임의 특징을 활용한 효율적인 모형화기법과 행렬응축기법을 사용하여 해석에 사용되는 자유도수를 최소화한 해석기법을 제안하였다. 예제구조물의 해석을 수행하여 본 연구에서 제안된 해석방법과 일반적인 해석방법에 의한 결과와 비교함으로써 제안된 방법의 효율성과 정확성을 검증하였다.

Abstract

Among structural systems for complex-shaped tall buildings, diagrid system is widely used because of its structural efficiency and beauty of form. Recently, mega frame is favorably employed 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. Diagrid mega frame system is expected to be promising structural system for future super tall buildings. However, it takes tremendous analysis times and engineer's efforts to predict the structural behavior of tall buildings applied with diagrid mega frame system because the diagrid mega frame structure has significant numbers of elements and nodes. Therefore, efficient analytical method for all buildings applied with diagrid mega frame system has been proposed in this study to reduce the efforts and time required for the analysis and design of diagrid mega frame structure. To this end, an efficient modelling technique using the characteristics of diagrid mega frame structures and an efficient analytical model using minimal DOFs by the matrix condensation method were proposed in this study. Based on the analysis of an example structure, the effectiveness and accuracy of the proposed method have been verified by the comparison between the results of the proposed method and the conventional method.

키워드 : 다이어그리드, 메가프레임 구조시스템, 초고층건물, 구조해석, 행렬응축

Keywords : Diagrid, Mega frame structural system, Tall buildings, Structural analysis, Matrix condensation

1. 서 론

최근 주요 세계 여러 도시에 제안되거나 건설되고 있는 초고층 건축물의 경우에 비정형 디자인의 경향이 뚜렷한 현상으로 나타나고 있다. 이는 1억8000만 유로에 달하는 사업비 투자 대비 연평균 100만명 관광객의 유입효과로 개관 후 10년 간 16억 유로의 관

* 선문대학교 건축학부 조교수

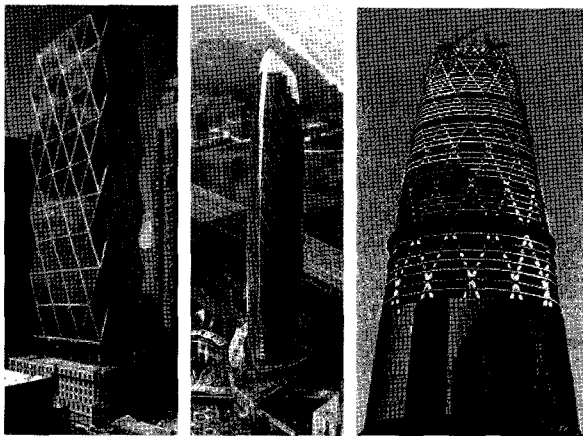
** 교신저자, 영남대학교 건축학부 교수

Tel : 053-810-2429 Fax : 053-810-4625

E-mail : kangj@ynu.ac.kr

광수입 효과를 얻은 스페인 빌바오의 ‘Guggenheim Effect’ 로 촉발된 현대건축의 새로운 디자인 흐름으로 볼 수 있다. 이러한 디자인 흐름은 이전의 정형화된 건물이 아닌 비정형의 자유로운 건축적 형상을 주요한 패러다임의 전환으로 전개해나가고 있다. 국내에서도 현재 추진 중인 6~8개의 100층 이상 초고층 건축물 프로젝트의 상당수가 비정형 형상을 취하고 있음을 알 수 있다. 이러한 비정형 구조물을 위한 구조시스템 중에서 다이어그리드 구조시스템은 구조적 효율성 및 아름다운 조형성으로 인하여 <그림 1>에서 보는 바와 같이 국내외적으로 여러 고층건물에 적용되고 있다.

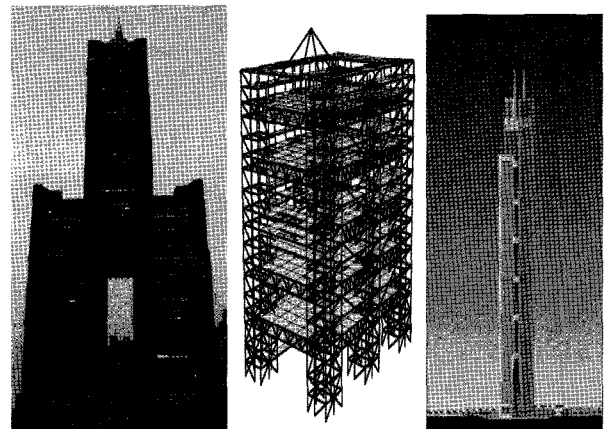
다이어그리드 구조시스템은 Diagonal과 grid의 합성어로서 대각가새를 반복적으로 사용한 형태의 구조이다. 다이어그리드 구조시스템에는 일반적으로 기둥이 사용되지 않으며 경사진 수직부재(Diagrid)와 보가 삼각형 형태의 배치를 이루게 된다.



(a) Hearst Tower (b) 싸이클론 타워 (c) 광저우 West Tower
<그림 1> 다이어그리드 구조시스템이 적용된 구조물

횡하중에 대하여 효과적으로 저항할 수 있는 구조시스템으로서 메가프레임 구조시스템이 <그림 2>에 나타난 바와 같이 근래에 많이 적용되고 있다. 메가프레임 구조시스템은 현재 건설되고 있는 초고층 건물에도 유용하게 사용되고 있지만 이러한 건물보다 훨씬 높은 미래의 초고층 건물에서 활발히 채택될 것으로 기대되는 구조시스템이다. 이 메가프레임 구

조시스템은 여러 개의 보와 기둥을 묶어 하나의 메가칼럼으로 만들고 이 메가기둥들을 몇 개의 층마다 강성이 큰 보 또는 트러스로 구성된 초대형 수평부재, 즉 메가거더로 이어줌으로써 횡하중에 대한 구조물의 강성을 확보하는 시스템이다. 또한 이러한 메가프레임시스템은 모듈화된 대형 구조부재(메가부재)를 반복해서 배치함으로써 구조물을 형성하는 특징을 가지고 있다.



(a) 카오슝 85층 건물 (b) 오사카 국제회의장 (c) AL burj
<그림 2> 메가프레임 구조시스템이 적용된 구조물

다이어그리드 메가프레임 구조시스템을 구성하는 메가부재들은 다수의 다이어그리드와 보 및 트러스 부재로 이루어지는 구조물로서 전체 초고층 건물을 이루는 실제 구조부재의 수는 급격히 증가하게 되어 결과적으로 이 구조시스템을 사용하는 초고층 시스템을 설계하기 위해서는 수만 개에서 수십만 개의 유한요소 및 절점으로 이루어진 모델을 해석해야 하는 경우가 빈번하게 발생한다. 이러한 다이어그리드 메가프레임 구조시스템이 적용된 초고층 건물을 일반적인 유한요소 해석법으로 해석을 수행하기 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

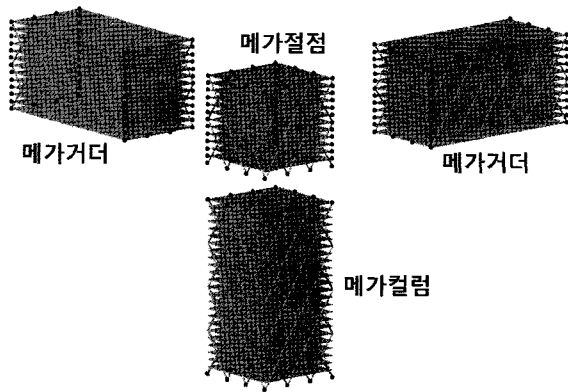
통하여 이루어지며 각각의 단계에서 설계요구 조건을 만족시키는 최적의 시스템 및 부재단면을 알아내기 위하여 반복적인 해석이 필요하게 된다. 경우에 따라서는 수십 회 이상의 재해석 과정이 반복되므로 일반적인 해석방법을 이용하여 다이어그리드 메가프레임 구조시스템을 모형화, 해석, 설계하고자 한다면 반복되는 해석에 엄청난 계산시간과 노력이 필요하게 될 것이다. 따라서 자유도수가 많은 초대형 구조물을 설계할 때 발생하게 되는 이러한 어려운 점을 해결하기 위하여 초대형 구조물의 효율적인 해석기법에 대한 다양한 연구가 현재까지 여러 연구자들에 의하여 진행되어 왔다¹⁻⁷⁾. 그러나 이러한 기존의 연구에서는 다이어그리드 메가프레임 구조시스템의 구조적 특성을 고려한 효과적인 모형화방법이나 해석모델 개발에 대한 연구는 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 미래형 초고층 건물에 유용하게 사용될 것으로 기대되는 다이어그리드 메가프레임 구조시스템이 적용된 초고층건물의 효율적인 해석기술을 제안하는 것을 목표로 한다. 또한 기존의 일반적인 행렬응축기법에서 소거되는 자유도수가 많으면 행렬응축 자체에 상당한 해석시간이 소요된다. 따라서 본 연구에서는 다단계 행렬응축기법을 도입하여 행렬응축에 소요되는 시간을 최소화하였다.

다이어그리드 메가프레임 구조시스템에서는 여러 개의 구조부재로 이루어진 메가부재가 여러 곳에 반복적으로 사용되므로 본 논문에서는 이러한 특징을 활용하여 메가부재를 행렬응축기법⁸⁾을 사용하여 하나의 메가요소로 모형화하였다. 메가요소는 부재의 위치에 따라서 메가거더, 메가기둥, 메가절점점으로 나누어지며 이러한 메가요소를 조합하여 메가프레임을 만들고 다시 메가프레임을 쌓아올려서 전체 구조물을 모형화하였다. 각각의 단계에서 조립에 필요한 최소한의 자유도만을 남기고 나머지 자유도는 행렬응축기법을 이용하여 소거하여 전체구조물에 남는 자유도 수를 최소화하였다. 많은 양의 자유도를 한꺼번에 행렬응축기법을 사용하여 소거를 하게 되면

행렬응축에 상당히 많은 시간이 소요되게 되어 자유도 소거를 통한 해석의 효율성이 저하된다. 따라서 본 연구에서는 메가절점 단위 응축, 메가층 단위 응축 등의 다단계 응축의 개념을 도입함으로써 행렬응축에 소요되는 시간과 컴퓨터 메모리를 최소화하도록 하였다.

2. 다이어그리드 메가프레임 구조시스템의 모형화기법

다이어그리드 메가프레임 구조시스템은 전술한 바와 같이 다수의 다이어그리드와 보들이 밀집된 메가부재로 구성된다. 이 메가부재들은 다이어그리드로 인하여 외부가 둘러싸여져 있으므로 강성이 매우 크고 일체화된 거동을 하므로 개개의 단일 부재와 유사한 거동을 하게 된다. 그러므로 다이어그리드 메가프레임 구조시스템은 메가칼럼 및 메가거더로 이루어진 저층 골조와 비슷한 거동을 나타내는 특징을 보여준다. 따라서, 메가부재가 연결되는 부분에 존재하는 자유도만을 사용해서 해석을 하더라도 다이어그리드 메가프레임 구조물의 전체적인 거동을 파악할 수 있으리라 판단된다. 이러한 방법을 사용하면 수십만 개의 자유도로 이루어진 평형방정식 대신에 수십 개에서 수백 개로 이루어진 평형방정식을 풀면 되므로 해석의 효율적을 크게 향상시킬 수 있다. 그러나 수십만 개의 자유도를 행렬응축기법을 통하여 한꺼번에 소거를 한다면 행렬응축에 막대한 시간이 소요될 것이다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하고 구조적 특징을 효율적으로 반영하기 위하여 메가칼럼 및 메가거더 그리고 접합부를 메가요소로 정의하고 정의된 메가요소를 이용하여 단위 메가프레임을 구성하고 단위 메가프레임을 이용하여 전체 구조물을 구성하는 과정을 이용한다. 이러한 메가요소 단위의 모형화과정을 <그림 3>에 나타내었다.



〈그림 3〉 다이어그리드 메가요소를 이용한 모형화

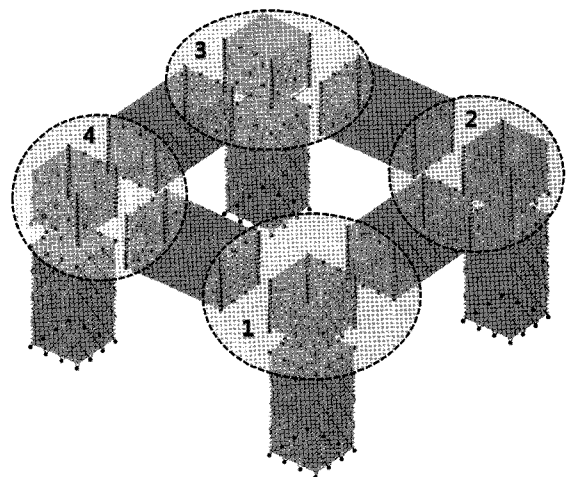
그림에 나타난 바와 같이 메가부재들은 메가절점을 통해서 서로 연결이 된다. 각각의 메가부재들이 구성하는 다이어그리드, 보, 슬래브 등은 일반적인 유한요소를 사용하여 모형화되고 하나의 독립된 메가요소로서 구성된다. 각각의 메가부재를 모형화하기 위한 메가요소들은 그림에서 짙은 색으로 표시한 서로간의 연결을 위한 절점에 존재하는 자유도만을 남기고 나머지 모든 자유도는 행렬응축기법을 사용하여 소거하게 된다. 이를 위해서 본 연구에서는 일반적으로 널리 사용되고 있는 Guyan의 행렬응축기법⁸⁾을 적용하였다. 이렇게 메가요소의 구성단계에서 행렬응축기법을 도입하여 자유도를 소거하게 되면 행렬응축과정에서 계산해야하는 역행렬의 크기가 전체구조물의 자유도를 한꺼번에 응축할 때에 비하여 상당히 줄어들기 때문에 행렬응축시간을 크게 줄일 수 있다.

메가요소를 정의하고 이를 조합하여 다이어그리드 메가프레임 구조시스템을 모형화하는 방법을 사용하면 메가요소에서 응축시킬 자유도를 쉽게 지정할 수 있고 해석에 사용되는 자유도수를 대폭 줄일 수 있으므로 효율적인 해석이 가능하게 된다. 또한 다이어그리드 메가프레임 구조시스템은 동일한 메가부재가 여러 위치에서 반복적으로 사용되는 특징이 있다. 따라서 한번 구성된 메가요소의 강성 및 질량 행렬을 반복적으로 사용할 수 있으므로 모형화 및 해석의 효율성을 크게 향상시킬 수 있다. 또한 이러

한 방법을 사용하면 전체구조물의 형상과 관계없이 메가요소만을 대상으로 모형화를 하게 되므로 모형화작업이 보다 간편해진다.

3. 효율적인 해석모델 생성을 위한 단계 행렬응축

앞 절에서 생성한 메가요소와 메가절점을 조합하면 단층의 단위 메가프레임을 구성할 수 있다. 이렇게 구성된 단층의 단위 메가프레임을 수직방향으로 쌓아올리면 본 논문에서 대상으로 삼고 있는 다이어그리드 메가프레임 전체구조물을 생성할 수 있다. 〈그림 3〉에 나타난 메가요소와 메가절점을 이용하여 단위 다이어그리드 메가프레임을 구성한다면 연결을 위한 다수의 절점에 존재하는 자유도가 해석과정에 사용될 것이다. 본 연구에서는 이 단계에서 단위 메가프레임을 쌓아올릴 때 연결을 위한 자유도만을 제외하고 메가요소의 연결에 사용된 자유도를 응축하여 더 효율적인 해석모델을 생성하고자 한다. 이때 메가요소의 연결에 사용된 자유도를 한꺼번에 모두 소거하는 것보다는 〈그림 4〉에 나타난 바와 같이 각각의 메가절점에 연결된 자유도를 단계별로 응축하는 것이 더욱 효과적이다.



〈그림 4〉 단계별 응축을 통한 단위 다이어그리드 메가프레임의 생성

이렇게 소거될 자유도를 메가절점단위로 응축했을 경우와 한번에 응축했을 경우의 자유도수를 비교하여 <표 1>에 나타내었다.

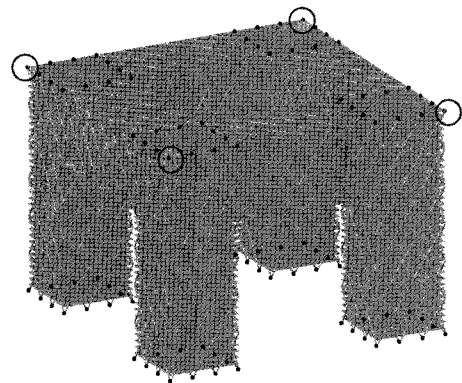
<표 1> 단위 메가프레임의 응축방법에 따른 자유도수

	한번에 응축	메가절점단위 응축			
		1번	2번	3번	4번
응축 자유도수	1080	270	270	270	270
남은 자유도수	576	504	648	792	576

<그림 4>에 나타낸 예제모델에는 4개의 메가절점이 존재하므로 전체 응축되는 자유도의 1/4개가 각각의 메가절점을 응축할 때 소거되는 것을 알 수 있다. 각각의 메가절점단위로 응축을 할 때마나 남은 자유도 수는 누적되게 된다. 메가절점 단위로 응축할 때 하나의 메가절점에 응축해야할 자유도의 개수를 N이라고 한다면 행렬응축과정 중에서 가장 많은 시간이 소요되는 소거되는 자유도에 대한 강성행렬의 역행렬을 계산하기 위해서는 N^3 의 연산량이 소요된다. 총 4개의 메가절점이 존재하므로 메가절점 단위로 행렬응축을 수행한 경우에는 전체적으로 $4N^3$ 의 연산량이 소요될 것이다. 그러나 메가프레임 단계에서 소거되는 자유도를 한꺼번에 응축할 경우에는 $(4N)^3=64N^3$ 의 연산량이 소요되므로 메가절점단위로 행렬응축을 할 때보다 약 16배의 연산량이 더 필요한 것을 알 수 있다. 그러나 행렬응축과정에는 역행렬을 구하는 계산 이외에도 여러 가지 연산과정이 필요하므로 실제 16배의 연산량 차이는 발생하지 않게 된다.

이러한 방법으로 생성한 단위 다이아그리드 메가프레임을 <그림 5>에 나타내었다. 그림에서 짙은 색으로 나타낸 절점에 있는 자유도만 남고 나머지 모든 자유도는 행렬응축기법으로 소거된 상태이다. 그림에서 보는 바와 같이 메가요소 사이의 연결에 사

용된 모든 자유도는 응축되어 사라진 것을 알 수 있다. 남아있는 절점은 단위 다이아그리드 메가프레임을 쌓아올려서 전체 다이아그리드 메가프레임 구조물을 생성할 때 연결을 위해서 필요한 최소한의 절점임을 알 수 있다. 그림에서 동그란 원 안에 들어있는 4개의 절점은 전체 다이아그리드 메가프레임 구조물의 거동을 표현하기 위한 자유도가 있는 절점으로써 각각의 절점에 2개의 수평방향 이동자유도와 1개의 수직방향 이동자유도가 존재하게 된다.



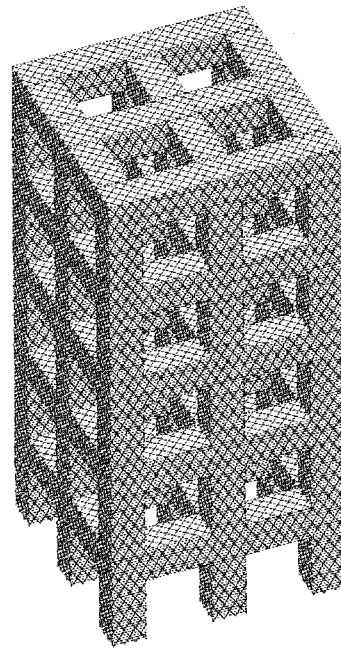
<그림 5> 단위 다이아그리드 메가프레임

위에 나타낸 단위 다이아그리드 메가프레임을 쌓아올려 전체 다이아그리드 메가프레임 구조물을 구성한 후 실제 구조물의 거동을 표현하는데 사용할 최소한의 자유도만을 남겨두고 나머지 자유도를 응축해서 해석을 하는 것이 효율적이다. 이렇게 생성된 전체 다이아그리드 메가프레임 구조물 단계에서 행렬응축을 할 경우에 소거되는 모든 자유도를 한꺼번에 응축하고자 한다면 앞에서 설명한 바와 같이 행렬응축과정에서 상당한 양의 계산시간 및 컴퓨터 메모리가 소요되게 된다. 예를 들어 <그림 5>에 나타낸 단위 다이아그리드 메가프레임을 5번 쌓아올려 총 5개의 메가층으로 이루어진 180층의 초고층 구조물을 만든다고 가정할 때 한 번의 응축으로 최종 해석모델을 만든다면 한 번에 1380개의 자유도가 소거되고 60개의 자유도가 남게 된다. 따라서 역행렬을 구해야할 강성 및 질량행렬의 크기가 1380×1380 이

된다. 본 연구에서는 전체 다이어그리드 메가프레임 구조물의 모형화 과정에서 소요되는 행렬응축시간을 절약하기 위해서 메가층 단위의 행렬응축기법을 도입하였다. 이 기법을 적용하게 되면 하나의 메가층을 응축할 때 소거되는 자유도는 276개로서 전체 자유도를 한꺼번에 응축할 때에 비하여 1/5로 줄어드는 것을 알 수 있다. 이것은 메가층수를 5층으로 가정했기 때문이며 메가층수가 더 높아질수록 메가층 단위 응축기법의 효율성은 더욱 증대될 것이다. 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 메가층 단위 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.

4. 다이어그리드 메가프레임 초고층 구조물의 예제해석

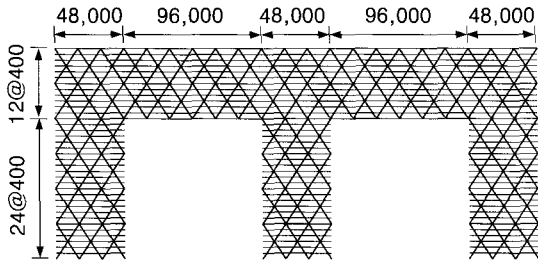
본 논문에서 제안한 다이어그리드 메가프레임 초고층 구조물의 효율적인 해석을 위한 해석기법의 효율성과 정확성을 검증하기 위하여 다이어그리드 메가프레임 구조시스템의 특징을 잘 나타내는 예제 구조물을 선택하여 정적해석, 고유치해석 및 시간이력 해석을 수행하였고 논문에서 제안된 방법과 일반적인 해석방법의 결과를 비교하였다. 본 논문에서는 다이어그리드 메가프레임 구조시스템을 적용한 초고층 예제구조물로서 <그림 6>에 나타난 180층의 다이어그리드 메가프레임 구조물을 사용하였다.



<그림 6> 180층 예제 다이어그리드 메가프레임

예제구조물은 한 층의 높이가 4m이므로 전체 구조물의 높이가 720m인 초고층 철골 구조물이다. 예제 다이어그리드 메가프레임 구조물을 모형화하기 위하여 <그림 7>에 나타난 36층의 단위 다이어그리드 메가프레임을 5번 위로 쌓아올려서 180층의 전체 구조물을 구성하였다. 단위 다이어그리드 메가프레임은 총 9개의 메가기둥을 가지고 있는데 여기서는 1개의 메가요소를 사용하여 9개의 메가기둥을 모형화 하였다. 메가거더를 모형화하기 위해서는 각각 가로와 세로방향으로 놓여있는 2개의 메가요소를 이용하였고 메가절점은 각각 9개의 메가요소를 사용하여 모형화하였다. <그림 7>에 나타난 바와 같이 다이어그리드는 예제구조물의 3개 층에 걸쳐서 설치되고 수평방향 격자간격은 16m이다. 이러한 다이어그리드 설치 모듈은 전체구조물에 동일하게 적용된다. 예제구조물에서 메가절점은 $48\text{m} \times 48\text{m}$ 평면을 갖는 층고 4m의 24층 구조물이며 메가절점은 같은 평면을 갖는 12층 구조물로서 단위 다이어그리드 메가프레임에서 사용되는 위치에 따라서 9가지의 메가요소로 구분된다. 그리고 가로와 세로방향으로 사용된 메가거더는 각각 $48\text{m} \times 96\text{m}$ 및 $96\text{m} \times 48\text{m}$ 평면의

12층 구조물이다. 사용된 중력방향 하중은 고정하중 360kgf/m²(슬래브 두께 15cm), 적재하중 250kgf/m²(오피스)이다.



〈그림 7〉 예제 단위 다이어그리드 메가프레임의 입면

일반적으로 초고층 건축물의 구조설계는 강도설계보다는 강성설계에 의해서 결정된다고 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 예제 다이어그리드 메가프레임 초고층건물의 단면설계시 풍하중에 의하여 발생하는 최대 횡변위가 구조물 높이(720m)의 1/500(1.44m)이 넘지 않도록 하였다. 본 연구의 목표는 부재 단면의 최적설계가 아니라 효율적인 해석기법의 개발이므로 다이어그리드 부재의 단면만 메가층 단위로 변화시켜서 대략적인 초기설계만을 수행하였다. 이때 사용한 풍하중은 KBC2009를 바탕으로 생성하였으며 노풍도 B, 기본풍속 30m/sec, 중요도계수 1.0의 값을 사용하였으며 사용된 강재는 SM490이다.

예제구조물에 대하여 구조물의 자유도를 전혀 응축시키지 않고 일반적인 방법으로 구조해석을 수행하였을 경우(일반모델)와 본 연구에서 제안된 다단계 응축기법을 적용한 해석모델을 사용한 경우에 대하여 해석결과를 비교하였다. 이때 풍하중을 사용한 풍응답해석 및 고유치해석, 그리고 지진하중(EI Centro, 1940, NS)을 사용한 시간이력해석을 수행하였다. 두 가지 해석모델의 풍하중에 의한 횡변위를 비교하여 〈표 2〉에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 본 논문에서 제안된 해석모델이 세분모델의 해석결과와 1%의 오차도 발생하지 않는다. 따라서

정적행렬응축을 사용한 해석은 이론적으로 계산과정에서 발생하는 수치오차를 제외하면 응축을 하지 않은 해석결과와 같다는 사실을 확인할 수 있다.

〈표 2〉 해석모델별 풍하중에 의한 횡변위 비교

층	일반모델	제안모델
180	1,423 m	1,418 m
144	1,169 m	1,164 m
108	0,854 m	0,850 m
72	0,507 m	0,505 m
36	0,183 m	0,182 m

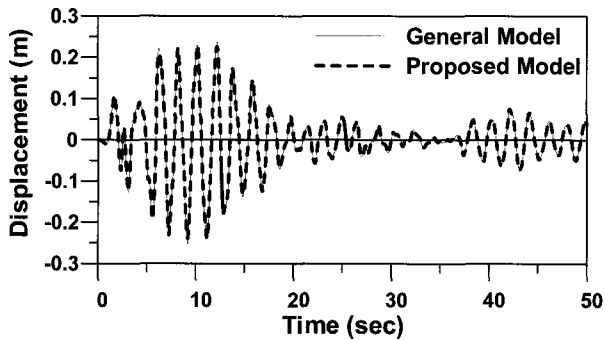
일반모델과 제안모델의 모드별 고유진동주기를 10차 모드까지 비교하여 〈표 3〉에 나타내었다. 모드의 차수가 높아질수록 구조물의 국부적인 거동이 증가하므로 두 모델의 오차가 커질 가능성이 있다. 〈표 3〉에 나타난 제안모델과 일반모델의 모드별 누적 질량참여율을 보면 4차 모드까지만 고려하여도 질량참여율의 누계가 90%이상이 되는 것을 알 수 있다.

〈표 3〉 해석모델별 고유진동주기 및 누적질량참여율

모드	일반모델 누적 질량참여율(X)	일반모델 고유진동주기	제안모델 고유진동주기
1	79.9%	1.920 sec	1.918 sec
2	79.9%	1.920 sec	1.918 sec
3	79.9%	1.762 sec	1.760 sec
4	91.2%	0.710 sec	0.706 sec
5	91.2%	0.710 sec	0.706 sec
6	91.2%	0.650 sec	0.645 sec
7	95.0%	0.436 sec	0.429 sec
8	95.0%	0.436 sec	0.429 sec
9	95.0%	0.399 sec	0.390 sec
10	96.6%	0.321 sec	0.313 sec

〈표 4〉 모델별 자유도수 및 해석시간의 비교 (단위: 초)

해석	자유도수	강성 및 질량행렬 구성			정적해석	고유치해석	시간이력 해석	전체 해석시간	비율 (%)
		메가 요소	단위 메가프레임	전체구조물					
일반모델	295,900	-	-	286.22	851.52	93.36	13672.92	14,904.02	100.00
제안모델	135	272.24	181.23	102.25	0.04	0.83	1.77	558.36	3.81



〈그림 8〉 지진하중에 의한 최상층 변위시간이력비교

일반모델과 제안모델에 대하여 El Cento (NS, 1940) 지진하중을 가하여 시간이력해석을 수행한 후 각 모델의 최상층 변위시간이력을 비교하여 〈그림 8〉에 나타내었다. 본 연구에서 사용된 지진하중 해석시간은 50초이고 시간간격은 0.01초이다. 그래프를 보면 앞에서 예상한 것처럼 일반모델과 제안모델의 결과가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 본 연구에서 제안한 방법으로 대부분의 자유도를 응축하고 메가층에 존재하는 최소한의 자유도만을 사용하여도 지진하중과 같이 구조물의 전체적인 거동을 파악하는 데에는 효율적이라는 것을 확인할 수 있다.

본 논문에서 제안한 해석기법의 효율성을 검토해 보기 위하여 해석에 소요되는 자유도수와 해석시간을 비교하여 〈표 4〉에 나타내었다. 표에서 볼 수 있듯이 일반모델은 295,900개의 자유도로 이루어져 있고 해석과정에 이 모든 자유도가 사용되므로 정적 및 동적해석에 비교적 많은 시간이 소요된다. 특히 시간이력해석과정에서 가장 많은 시간이 소요되는

것을 알 수 있다. 본 연구에서 제안한 모델을 보면 메가요소, 단위 메가프레임 및 전체구조물 구성과정에서 행렬응축에 일반모델보다 많은 시간이 소요되는 것을 알 수 있다. 그러나 행렬응축 후 정적 및 동적해석에 사용되는 자유도수는 일반모델에 비하여 대폭 줄어들기 때문에 전체해석에 소요되는 시간을 줄일 수 있다. 전체 해석시간을 보면 제안모델이 일반모델의 해석시간에 3.81%밖에 안 되는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 인텔 Core 2 Duo 2.66GHz의 CPU와 4.0GB의 메모리를 탑재한 컴퓨터를 사용하였다.

5. 결론

본 연구에서는 다이어그리드 메가프레임 초고층 건물의 효율적인 모형화 및 해석방법을 제안하였고 제안된 기법의 정확성 및 효율성을 검토하였다. 본 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 다이어그리드 메가프레임 구조시스템이 적용된 초고층 건물의 설계과정에서 최적의 시스템 선정 및 단면설계를 위하여 반복적인 해석이 필요하게 되는데 수십만 개의 자유도로 구성된 일반적인 유한요소 해석모델을 사용하면 많은 계산시간과 노력이 필요하게 된다. 그러나 본 연구에서 제안한 해석모델을 사용하면 다이어그리드 메가프레임 초고층 건물의 거동을 정확하게 표현하면서도 해석에 소요되는 시간을 효과적으로 줄일 수 있었다.

2. 해석에 필요한 최소한의 자유도만을 남기고 수십만 개가 넘는 나머지 자유도를 한꺼번에 응축을 한다면 상당한 양의 컴퓨터 메모리와 계산시간이 응축과정에 소요될 것이다. 따라서 본 논문에서는 메가요소와 단위 메가프레임의 개념을 도입하여 행렬응축과정을 여러 차례 나누어 수행하는 다단계 행렬응축기법을 사용함으로써 행렬응축에 소요되는 시간을 대폭 감소시킬 수 있다. 이것이 기존의 일반적인 행렬응축기법과의 차별성이라고 할 수 있다.
3. 다이어그리드 메가프레임 초고층 건물의 전체적인 거동특징은 저층 골조와 비슷한 양상을 보이므로 메가절점에 존재하는 한 개의 절점만을 사용해서 비교적 정확하게 전체 구조물의 거동을 나타낼 수 있었다.

- Computers and Structures, 45, pp. 941-946
5. W.C., Hurty, J.D., Collins, and G.C., Hart (1971) Dynamic analysis of large structures by model synthesis technique, Computers and Structures, 1, pp. 535-563
6. H.S., Kim, D.G., Lee, and C.K. Kim (2005) Efficient three dimensional seismic analysis of a high-rise building structure with shear walls, Engineering Structures, 27, pp. 963-976
7. A.Y.T., Leung (1988) A simplified dynamic substructure method, Earthquake Eng Struct Dyn, 16, pp. 827-837
8. R.J., Guyan (1965) Reduction of stiffness and mass matrices, AIAAJ, 3(2), 380.

(접 수 일 자 : 2011년5월12일)

(심사완료일자 : 2011년7월26일)

(게재확정일자 : 2011년7월31일)

감사의 글

이 논문은 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2011-0004303).

- 참고문헌 -

1. G.C., Archer (2001), A technique for the reduction of dynamic degrees of freedom, Earthquake Eng Struct Dyn, 30, pp. 127-145
2. N., Bouhaddi, and R., Fillod (1996), Substructuring by a two level dynamic condensation method, Computers and Structures, 49, pp. 403-409
3. N., Bouhaddi, and R., Fillod (1996) Model reduction by a simplified variant of dynamic condensation, Journal of Sound and Vibration, 191(2), pp. 233-250
4. N., Bouhaddi, and R., Fillod (1992) A method for selecting master dof in dynamic substructuring using the Guyan condensation,