

주상복합건물의 효율적인 지진해석

Efficient Analysis of Building Structures with a Rigid Floor System

황 현 식* 이 동 근**
Hwang, Hyun Sik Lee, Dong Guen

국문요약

주상복합건물의 강제거동을 보이는 연결층은 인접한 층에 비해 큰 질량과 강성차에 의해서 수치해석상의 문제점을 일으킨다. 강제거동을 보이는 구조물의 정적해석은 상부와 하부구조물을 별개의 구조물로 보고 2단계에 걸쳐서 근사적으로 수행될 수 있지만, 동적해석은 구조물을 분리해서 행해질 수 없다. 이러한 주상복합건물의 동적해석을 위한 효율적인 모형화기법이 본 연구에서 제시된다. 자유도수를 줄여서 컴퓨터해석시간을 대폭 감소시키는 행렬의 응축기법과 연결층을 모형화하기 위해서 일반적인 보요소에 강체가 연결된 요소를 도입한다. 제안한 모형화기법의 효율성과 정확성을 입증하기 위해서 몇가지 구조해석을 한다.

주요어 : 주상복합건물, 강제, 연결층, 행렬응축

ABSTRACT

Very stiff floor system in a residential-commercial building causes some problems in the numerical analysis procedure due to significant difference in stiffness with adjacent structural elements. Static analysis of structure with a stiff transfer-floor can be performed approximately in two steps for upper and lower parts for the structure. However, it is impossible to perform dynamic analysis in two steps with separate models. An efficient method for dynamic analysis of a structure with a rigid floor system is proposed in this study. The matrix condensation technique is employed to reduce the degree of freedom for upper and lower parts of the structure and a beam elements with rigid bodies at both ends are introduced to model the rigid floor system. Efficiency and accuracy of the proposed method are verified through analysis of several example structures.

Key words : residential-commercial building, transfer slab, matrix condensation

1. 서 론

공간의 활용도를 높이기 위해서 서로 다른 성격의 두 공간을 하나의 건물에 배치해야 하는 필요성을 느끼게 되어 생겨난 새로운 건물형태가 주상복합건물이다. 일반적으로 주상복합건물의 상부는 주거용으로 사용되며 하부는 상업용으로 이용된다.

두 가지의 서로 다른 용도의 건물을 하나의 구조체로 건설하기 위해서는 Setback이 생기거나 상하부의 골조가 정확하게 맞물려서 연결되지 않는 경우가 발생하게 된다. 이렇게 상부의 주거용 공간과 하부의 상업용 공간을 위한 공간 계획상에 큰 차이가 있는 경우가 대부분이며, 이러한 공간들을 서로 연결시키기 위하여 매우 큰 단면을 가지는 보(transfer girder)나 두꺼운 바닥판(transfer slab) 등을 사용하고 있다. 상하부를 연결하는 층의 질량과 강성이 인접한 층의 질량과 강성에 비해서 크게 차이가 나므로 내진설계를

* 비회원 · 삼성중공업 건설부문

** 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 교수

위해서는 반드시 동적해석을 하여야 할 정도로 비정형성이 강한 구조물이다. 따라서 이러한 특성을 가진 구조물에 대한 동적해석기술을 개발하고 내진설계에 활용하도록 하여 안전하고 경제적인 주상복합건물의 구조설계가 가능하도록 할 필요가 있다.

본 연구에서는 그러한 연결층에 대해서는 강체를 가진 부재로 모형화를 하고 있다. 강체를 가진 부재에 대한 유효요소를 사용하면 급격한 강성변화를 가진 구조물의 해석에 대한 정확성을 높일 수 있다. 대형구조물의 해석에 있어서 모형화에 필요한 자유도수의 증가로 해석에 많은 시간이 소요되고, 메모리의 증가로 인해 해석이 비합리적이 되는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 대형구조물의 자유도수를 줄일 수 있는 강성행렬의 응축(condensation)기법을 이용하고 있다. 구조물의 상부와 하부에 대하여 별도로 강성행렬의 응축을 수행하고 이를 결합하여 구조물의 동적해석을 수행하도록 함으로써 구조방식이 현격히 다른 상하부의 연결이 효율적으로 이루어지게 된다. 또, 전체구조물의 해석 결과에서 구조물의 상하부 연결층에 미치는 영향을 밝혀하여 연결층에 배치되는 춤이 큰 보나 두꺼운 슬라브의 해석을 수행함으로써 해석모델의 작성이 간편하면서도 정확성이 유지되는 결과를 얻을 수 있도록 한다.

2. 주상복합건물의 해석

주상복합건물은 상부와 하부의 공간계획상의 모듈(module)차이에 의해서 상부층에 Setback이 발생하거나 기둥선(column line)이 일치하지 않게 된다(그림 1).

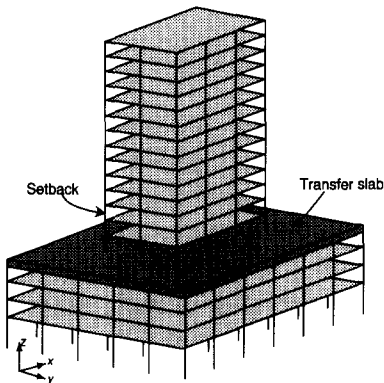


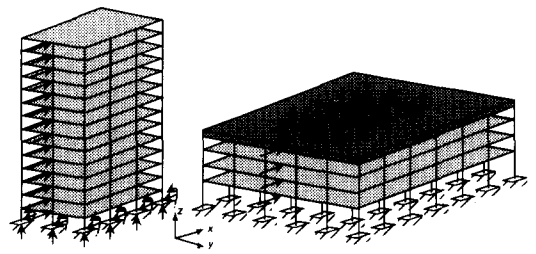
그림 1 주상복합건물

이러한 상부와 하부공간을 구조적으로 연결시키기 위해서는 연결층에 춤이 큰 보(transfer girder)나 매우 두꺼운 슬라브(transfer slab)를 배치하게 된다. 구조물의 상부층과 하부층을 연결하는 보나 슬라브는 강성이 매우 커서 내부 변형이 일어나지 않는 강체거동을 한다고 가정할 수 있다. 이처럼 강체거동을 보이는 연결층을 포함한 구조물의 해석은 다음의 두 가지 방법으로 행해지고 있다.

2.1 분리모델 해석법

중간층에 강체와 같은 거동을 보이는 구조물의 정적해석은 그림 2에서 보는 바와 같이 두개의 구조물로 분리해서 생각하고 간단한 정적해석방법을 통해서 근사적으로 행해질 수 있다. 즉, 구조물의 상부와 하부가 연결되는 부위에 매우 큰 단면을 가지는 보나 바닥판을 중심으로 두 개의 구조물로 분리시키고 해석한다. 그 해석순서는 다음과 같다. 먼저 상부구조물에 대해서 구조해석을 수행하며 연결부의 큰 보나 바닥판을 고정지판과 같이 생각하고 경계조건을 줄 수가 있다. 그리고 상부 구조물에 대한 해석을 먼저 수행한다. 이때 상부구조물의 해석결과로부터 얻어지는 연결층의 반력을 하부구조물에 가해지는 외부하중으로 생각하면서 하부 구조물에 대하여 해석을 수행한다. 마지막으로 상하부의 구조물에 대한 해석결과로 얻어지는 부재력을 하중으로 사용하여 연결부의 큰 보나 바닥판에 대한 구조해석을 수행한다.

분리모델 해석법은 해석이 간편한 장점이 있는 반면에, 상부와 하부 구조물을 별개의 구조물로 보고 해석하기 때문에, 구조물의 전체적인 거동을 파악하거나, 연결층과 인접한 부재와의 상호작용(interaction)등을 해석하는 동적해석은 불가능한 단점을 가지고 있다.



(a) 상부구조물 (b) 하부구조물

그림 2 분리모델 해석법

2.2 결합모델 해석법

구조물을 분리하지 않고 해석하는 주상복합건물의 정적 및 동적해석은 다음의 모형화기법에 의해서 수행 될 수 있다. 구조물의 상하부를 연결하는 보나 바닥판은 아주 두꺼운 강체거동을 보이기 때문에 기존의 컴퓨터를 사용한 해석방법에서는 이러한 강체거동을 보이는 구조요소를 일반적인 보요소(*beam element*)나 판요소(*plate element*)로 모형화하여서 사용하고 있다 (그림 3). 보요소나 판요소로 모형화한 연결층의 강성값을 인접한 부재강성에 비해 상당히 크게 주어서 연결층을 강체에 가깝게 모형화하는 방법을 사용한다. (그림 4). 이러한 방법은 기존의 해석 프로그램을 그대로 사용하여 정적 및 동적해석을 수행 할 수 있기 때문에 많이 사용되었으나 한가지 단점이 있다.

강체거동을 나타내기 위해서 주어지는 아주 큰 값의 강성값이 어떤 일정한 범위 내에서는 안정되고 올바른 결과를 보이지만, 이 범위보다 더 큰 값이 주어지면 해석결과가 참값과 비교해 상당한 차이를 보이게 된다. 이것은 강성행렬의 인접한 요소값 사이에 매우 큰 차이가 있기 때문에 수치오차(*numerical error*)가 발생하여 일어나는 현상이다. 강성값조절에 따른 수치오차의 범위는 구조물의 형태에 따라서 다른 양상을 띄고 있다. 따라서, 강체거동을 하는 요소에 강성값을 산정할 때는 반복적인 강성값조절을 통해서 수치오차가 발생하지 않는 안정한 범위를 확인하고, 이 값을 해석에 적용하여야만 구조물의 올바른 해석을 수행할 수 있는 것이다.

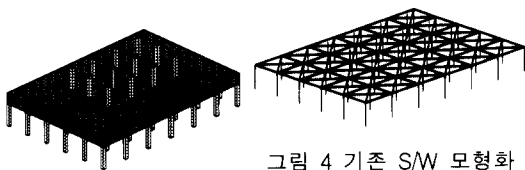


그림 3 연결층

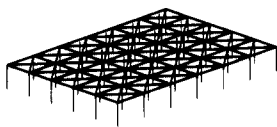


그림 4 기존 S/W 모형화

2.2.1 해석오차

결합모델 해석법의 강성값조절에 따른 수치오차의 범위를 확인하기 위해서 그림 1의 주상복합건물을 해석하였고, 연결층에 대해서는 그림 4와 같이 모형화하였다. 기존의 해석용 프로그램으로는 구조해석의 정확성과 효율성이 입증된 SAP90과 ETABS를 사용하였다.

구조물 그림 1의 해석결과에서 발생한 수치오차를 그림 5과 그림 6에서 비교하고 있다. 구조물의 재료와

단면성질은 뒤의 예제해석에서 기재하고 있고, 하중은 최상층의 x방향으로 1000ton을 가하였다. SAP90의 해석결과는 N값이 5~9에서 안정된 값을 보이지만, 10이상에서는 overflow가 발생하여 결과가 출력되지 않는다. ETABS의 해석결과에서 최상층 변위는 강성이 증가하면서 일정한 값에 수렴하는 것으로 보이지만, 연결층과 연결된 기둥의 축력은 N이 10이상이면 심한 수치오차를 보이고 있다. 즉, 강성값을 조절해서 연결층을 모형화할 때는 한가지의 해석결과만을 가지고 정확한 해석결과임을 확신하기란 어려운 일이다. 반면에, 본 연구의 해석결과는 상당히 정확하면서도 안정된 값을 보임을 알 수 있다.

본 연구에서 제안하는 방법은 강체부분을 가지는 프레임 요소를 사용한 해석법이다. 이러한 방법은 강성값의 조절을 통하여 강체를 모형화하는 것이 아니라 직접 강체요소가 포함되어 있는 프레임 요소를 사용하기 때문에 해석상의 수치오차가 발생하지 않는다. 이러한 요소는 다음 장에서 소개할 좌표변환(*coordinate transformation*)을 통해서 유도될 수 있다.

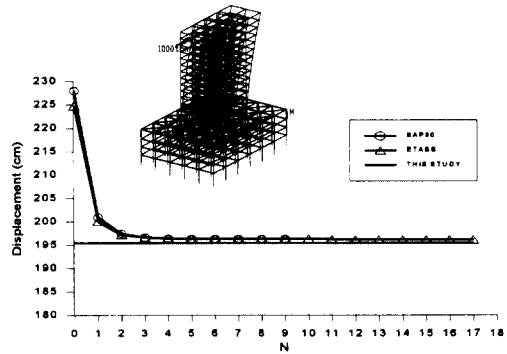


그림 5 구조물의 최상층 변위비교

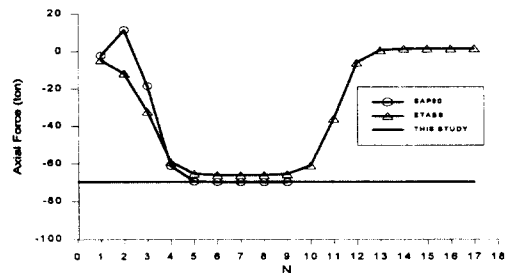


그림 6 구조물 M부재의 축력비교

3. 효율적인 해석모델의 개발

본 연구에서는 주상복합건물의 상층부와 하층부를 연결시키는 춤이 큰 보나 두꺼운 슬라브의 해석을 보다 정확하고 간편하게 할 수 있는 해석기법을 이용하고 있다. 강체를 가진 부재에 대한 유한요소를 사용하여 급격한 강성변화를 가진 구조물의 해석에 대한 정확성을 높일 수 있게 하였다.

슬라브는 면내변형을 무시할 만큼 무한히 강한 면내강성을 가지고 있다. 이러한 슬라브의 영향을 고려할 수 있도록, 한 층의 모든 자유도중에 평면의 이동 및 회전에 관한 자유도를 대표점(master node)으로 변환하여 슬라브의 영향을 골조해석에 고려한다.

초고층 대형구조물의 자유도 수를 줄일 수 있는 강성행렬에 대한 행렬의 응축기법을 이용하여 구조물의 상부와 하부에 대한 별도의 행렬응축을 수행하고 이를 결합하여 전체구조물의 동적해석을 수행하도록 함으로써 구조방식이 현저히 다른 구조물에 대한 해석을 보다 효율적이고 안정되게 이루어지게 한다.

전체구조물의 해석결과에서 구조물의 상하부 연결층에 미치는 영향을 발체하여 연결층에 배치되는 춤이 큰 보나 두꺼운 슬라브의 해석을 수행함으로써 해석모델의 작성이 간편하면서도 정확성이 유지되는 결과를 얻을 수 있도록 한다.

3.1 강체의 모형화

주상복합건물의 연결층에 배치되는 transfer girder 나 transfer slab는 내부의 변형이 없는 강체와 같은 거동을 보이게 된다. 이러한 강체거동을 보이는 연결층을 강체요소로 모형화해서, 일반적인 보요소(*beam element*)에 강체가 연결된 것으로 모형화할 수 있다.

그림 7은 부재의 양단에 강체가 연결된 연성부재를 나타낸 것이다. 일반적인 연성부재의 양 단부절점의 자유도를 축변환기법에 의해서 강체내부의 관심있는 자유도로 변환할 수 있다. 즉, 보요소(*i*부재)에 강체가 연결된 요소로 확장할 수 있고 자유도는 강체내부의 자유도만이 존재하게 된다. 연성부재의 강성을 K_i 라고 하고 강체가 연결된 부재의 강성을 K_m 라고 하면 다음의 식과 같이 축변환기법을 통해서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$K_{Bi} = T_i K_i T_i^T \quad (1)$$

프레임의 강성행렬 K_i 를 강체가 연결된 프레임의 강성행렬 K_{Bi} 로 변환시키면, 강체가 있는 구조물에 대한 보다 정확한 해석결과를 도출해 낼 수 있다.

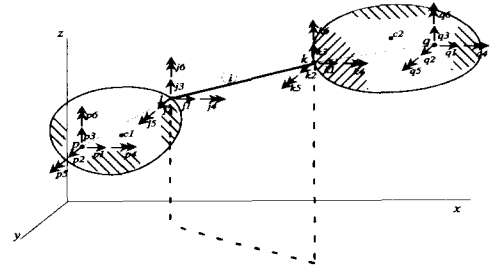


그림 7 강체가 연결된 보요소

동적해석을 수행하기 위해서는 질량행렬 M_i 가 필요하다. 질량행렬 역시 강성행렬과 동일한 방법으로 자유도변환 기법을 사용하면, 강체를 포함한 보요소의 질량행렬을 다음의 식과 같이 유도할 수 있다.

$$M_{Bi} = T_i K_i T_i^T \quad (2)$$

질량행렬의 형성에 대한 내용은 3.7절에서 자세히 설명하기로 한다.

3.2 강막의 모형화

일반적인 건물은 각 층마다 슬라브가 배치된다. 각 층의 평면에 배치되는 슬라브는 면내에는 무한한 강성을 가지고 있고, 평면의 법선방향(normal)에는 유연한(*flexible*) 거동을 한다고 가정할 수 있다. 이처럼 강막(*rigid diaphragm*)과 같은 거동을 보이는 슬라브의 영향을 골조해석에 고려하려면 정확한 해석을 할 수 있는 것이다.

강막과 같은 거동을 보이는 평면내에 위치한 보는 면외에 작용하는 하중만을 분담하게 되는 것으로 보고 그림 8과 같이 부재에 6개의 자유도만을 가지고 있는 것으로 가정할 수 있다. 반면에, 기둥의 자유도는 모두 고려하여 그림 8과 같이 모형화하였다.

보에 대한 자유도를 다음의 그림 8에서 나타내고 있다. 절점당 3개의 자유도는 슬라브의 강막가정에 의한 자유도의 구속과는 무관한 자유도이다. 즉, 강막에 대한 자유도 변환을 수행할 필요가 없다.

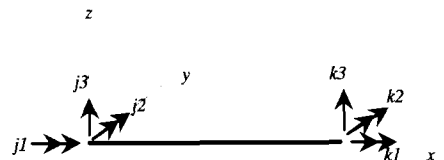


그림 8 보의 자유도

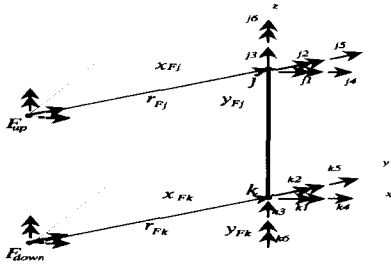


그림 9 기둥의 자유도

기둥의 보요소를 그림 9에서 나타내고 있다. 그림에서 첨자 $j1, j2, j3$ 은 위 바닥판의 강제 거동과 직접 연관되지 않는 절점자유도에 해당하는 부분이다. 첨자 $k1, k2, k3$ 은 아래층의 자유도로써 바닥판에 무관한 부분이다. 반면에, 상부의 $j4, j5, j6$ 과 하부의 $k4, k5, k6$ 은 각 층의 강제거동과 연관된 부분의 자유도이다. 그러한 첨자는 한 층에서의 x, y 축방향 이동과 z 축에 대한 회전자유도로 이루어져 있다. 기둥의 12×12 의 강성행렬을 3×3 의 부행렬(submatrix)로 분류할 수 있다.

$$K_i = \begin{bmatrix} K_{11} & & & \text{sym.} \\ K_{21} & K_{22} & & \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \\ -K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} \end{bmatrix} \quad (3)$$

기둥의 양단부의 자유도를 강막의 대표점의 자유도로 변환하기 위한 변환행렬 T_i 는 대각에 네 개의 3×3 부행렬을 포함하고 있다. 첫 번째와 두 번째 행렬은 단위행렬, 세 번째와 네 번째의 행렬은 2차원의 축변환행렬이다. 첨자 j 는 상층을 의미하고 k 는 하층을 의미한다. 기둥의 강성행렬은 다음과 같이 변환되어야 한다.

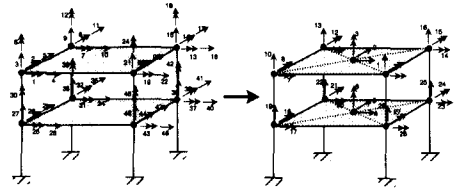
$$K_{Fi} = T_i K_i T_i^T \quad (4)$$

식(4)를 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$K_i = \begin{bmatrix} K_{11} & & & \text{sym.} \\ K_{21} & K_{22} & & \\ T_{Fj}K_{31} & T_{Fj}K_{32} & T_{Fj}K_{33}T_{Fj}^T & \\ T_{Fk}K_{41} & T_{Fk}K_{42} & T_{Fk}K_{43}T_{Fj}^T & T_{Fk}K_{44}T_{Fk}^T \end{bmatrix} \quad (5)$$

이상에서 유도한 각 부재의 자유도 변환기법을 다음의 그림 10과 같이 전체 구조물에 적용할 수 있다. 평면내에 위치한 절점의 모든 자유도중에 평면의 이동과 회전을 고려하는 자유도만을 각 층의 대표점의

자유도로 변환할 수 있다 (그림 10(b)). 즉, 그림 10(a)는 절점당 6개의 자유도를 가지는 보요소로 이루어진 3차원 골조이다. 각 층의 보와 기둥이 접하는 절점은 한 평면내에 존재한다. 여기서 각 층의 평면의 이동과 회전에 관한 자유도에 대해서 자유도 변환을 수행하면 그림 10와 같이 된다.



(a) 변환전의 자유도 (b) 변환후의 자유도
그림 10 강막을 고려한 골조의 자유도 변환

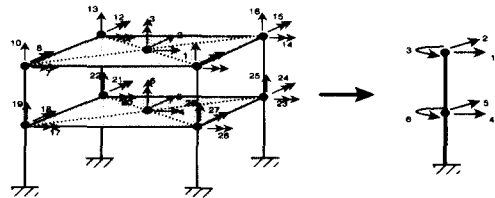
3.3 행렬의 응축기법

본 연구에서 소개하는 행렬의 응축기법(Matrix Condensation Technique)을 이용해서 행렬의 크기를 줄이면, 자유도 수의 감소로 인하여 계산량을 상당히 줄일 수 있고, 아울러 작은 기억용량을 가진 컴퓨터 시스템에서도 대형 구조물의 해석이 가능해진다.

구조물 바닥판의 면내변형을 무시하는 강막가정(rigid diaphragm assumption)을 이용해서 구조물의 3차원 해석시 강제거동을 보이는 바닥판의 이동과 변위에 대한 자유도만을 남기고 나머지 자유도는 소거시킨다.

그림 11(a)에서 각 층의 평면의 이동과 회전에 관한 벡터를 F , 그 외의 자유도에 관한 벡터를 A 라고 하면, 식(6)과 같이 하중(A), 강성(K), 변위(D)의 요소를 배열시킬 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A_A \\ A_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{AA} & K_{AF} \\ K_{FA} & K_{FF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_A \\ D_F \end{bmatrix} \quad (6)$$



(a) 응축전의 자유도 (b) 응축후의 자유도

그림 11 3차원 골조의 자유도 응축 기법

위의 식을 전개해서 관심갖는 자유도의 변위에 해서 정리하면 다음과 같다.

$$A_F^* = K_{FF}^* D_F \quad (7)$$

여기서 A_F^* 와 S_{FF}^* 는 다음과 같다.

$$A_F^* = A_F - K_{FA} K_{AA}^{-1} A_A \quad (8)$$

$$A_{FF}^* = K_{FF} - K_{FA} K_{AA}^{-1} K_{AF} \quad (9)$$

강성행렬 K_{FF}^* 는 확장 행렬(full matrix)이지만 행렬의 응축과정을 거쳐서 수평자유도만 남기므로 자유도가 상당히 줄어들게 된다. 수직하중이나 모멘트가 응축과정을 거치면 등가의 수평하중(equivalent lateral load)인 A_F^* 로 변환되어 나타나게 되므로 수직하중이나 모멘트에 의한 횡방향변위를 계산할 수 있다.

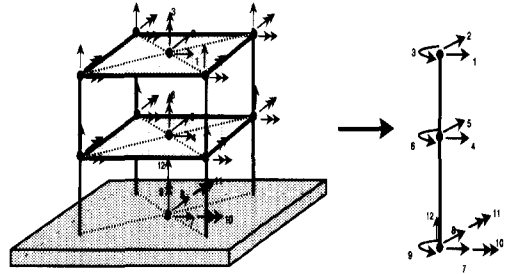
동적 평형방정식을 만족하기 위해서는 질량행렬의 자유도수 역시 강성행렬의 자유도 수만큼 소거하여야 한다. 동적응축과정을 통해서 질량행렬을 응축하게 되면 가장 정확한 해석결과를 도출해 낼 수 있다. 그런데, 질량행렬을 응축하지 않고 관심갖는 자유도 방향으로만 질량이 작용한다고 가정하여 모형화했을 경우와 응축된 질량을 사용했을 때의 동적 해석결과를 비교해 볼 때, 고차 모드에서는 약간의 오차를 보이고 저차 모드에서는 1%미만의 오차를 보이고 있었다. 본 연구의 목적이 구조물의 횡방향 거동을 파악하는데 있기 때문에, 연직진동과 같은 고차모드의 영향을 크게 고려하지 않는다. 따라서, 횡방향 거동을 해석하는데 있어서 질량행렬의 응축기법을 사용하지 않더라도 정확성이 크게 감소되지 않기 때문에 집중질량을 사용하고 해석절차를 단순화시켜서 해석의 효율성을 높였다.

3.4 상부 구조물의 모형화

주상복합건물에 대해서 앞절에서 언급한 강체와 강막을 고려하는 기법과 행렬의 응축기법을 상부와 하부구조물에 별개로 적용하여 상하부의 구조시스템이 전혀 다른 경우에 각 시스템의 특성을 구조해석에 보다 효율적으로 적용할 수 있도록 하였다.

일반층에서는 강막가정을 하여 평면의 이동과 회전

을 고려하는 3개의 자유도에 대해서 자유도변환을 수행하고, 강체거동을 보이는 연결층에는 그 층에 위치한 절점의 6개의 자유도를 모두 변환한다. 각 부재(기둥)의 절점의 자유도에 대한 변환을 수행한 후, 각 층의 대표점으로 변환된 자유도만을 남기고 나머지 자유도는 응축기법에 의해서 소거시킨다. 이러한 상부구조물의 모형화는 다음의 그림 12와 같다.



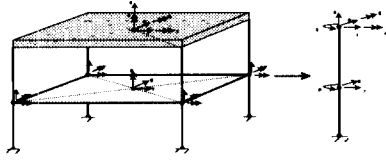
(a) 원형의 구조물 (b) 막대모델

그림 12 상부구조물의 모형화

강체 내부의 한 절점의 자유도를 6개 모두 고려하는 이유는 상부와 하부 구조물의 강성을 별개로 유도하는 데서 발생할 수 있는 구조물들 간의 곡률의 불일치를 막기 위한 것이다. 그러한 연결층의 6개의 자유도는 상부 구조물과 하부 구조물을 연결하는 고리역할로써 상하부 구조물의 횡방향 변위뿐아니라 회전에 대해서도 연속이 되게 연결시켜 준다. 연결층의 자유도를 6개로 정하지 않고 횡방향에 대한 자유도만을 정했을 경우, 횡 변위는 실제 구조물의 변위보다 더 줄어들게 된다. 따라서, 2단계에 걸쳐서 강성행렬을 조합할 경우에는 반드시 연직과 회전에 대한 자유도도 고려하여야 한다.

3.5 하부 구조물의 모형화

상부 구조물과는 별개의 구조물로 인식하는 하부 구조물은 최상부에 강체를 가진 것으로 해석하고, 강체는 6개의 자유도를 내포하고 각 층당 3개의 자유도를 가지게 된다. 강성행렬의 자유도번호는 그림 13에서 보는 바와 같이 상부 구조물의 자유도 번호와는 별개로 형성된다. 강체와 강막을 고려하는 기법과 행렬의 응축기법은 상부구조물과 동일한 방식으로 행해진다.



(a) 원형의 구조물 (b) 막대모델
그림 13 하부 구조물의 모형화

3.6 상부와 하부 구조물의 결합

각각 독립적으로 형성된 상하부 구조물의 강성행렬을 연결층을 중심으로 하나의 강성행렬로 조합하여야 한다. 강성행렬의 응축이 끝난 상부 구조물의 강성행렬을 K_{FFU} 라 하고, 하부 구조물의 강성행렬을 K_{FFL} 이라 하자. 조합된 강성행렬인 K_{FFC} 는 다음 식 (10)과 같이 된다.

$$K_{FFC} = K_{FFU} + K_{FFL} \quad (10)$$

식 (10)을 행렬형태로 표현하면, 그림 14가 된다. 그림 14에서 빗금이 겹쳐지는 부분이 연결층인 강체부분이 된다. 상부 구조물의 자유도 번호는 동일하지만, 하부 구조물 자유도 번호는 강체부분을 중심으로 뒤로 밀려서 형성이 된다. 즉, 그림에서 조합된 하부 구조물 자유도번호는 1~9에서 7~15로 재배치(rearrangement)된다. 따라서 실제 구조물과 같은 형태로 강성행렬이 이루어지게 된다. 최종적인 구조물의 모형화는 다음과 같게 된다.

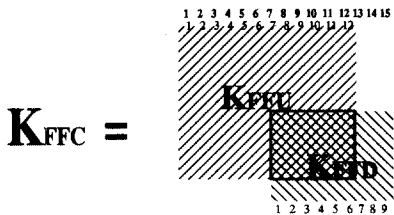
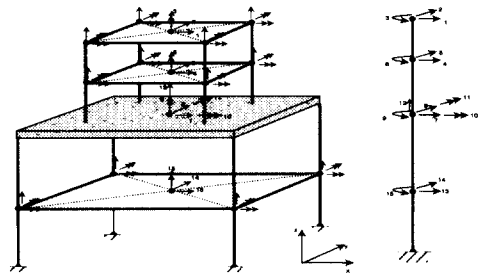


그림 14 강성행렬의 조합

이상에서 언급한 주상복합건물에 대한 모형화기법을 이용하면, 복잡한 3차원의 주상복합건물이 그림 15(b)와 같은 간단한 형태의 막대모델로 이상화시킬 수 있다. 일반층에는 3개의 자유도, 연결층에는 6개의 자유도를 가지게 되는 막대모델을 이용하면 구조물의 층수와 경간(bay)이 많아질수록 자유도수의 감소로 인한 구조해석의 효율성이 높아지게 된다.



(a) 원형의 구조물 (b) 막대모델
그림 15 주상복합건물의 모형화

3.7 질량행렬의 형성

구조물의 동적해석을 수행하기 위해서 형성되는 구조물의 질량행렬은 강성행렬과 같이 응축기법을 사용하지 않고, 관심갖는 자유도에만 질량이 작용한다고 가정하여 해석의 효율성을 높이도록 한다. 즉, 일반층에 위치한 기둥과 보가 접하는 절점의 질량벡터는 평면내의 x,y방향 이동질량의 성분만을 가지고 있고, 강체거동을 보이는 연결층과 기둥이 접한 절점의 질량은 x, y, z방향의 이동질량성분으로 이루어진다. 또, 각 층의 고정하중과 적재하중에 의한 질량역시 각 층의 대표점에서 일반층에는 3개의 질량성분과 연결층에는 6개의 성분을 가지는 벡터로 이루어져 있다.

구조물의 질량은 구조물의 자중과 각 층의 슬라브에 작용하는 적재하중을 포함한다. 보 요소의 자중은 lumped mass를 사용하여 모든 질량이 부재의 양 단부에 집중하는 것으로 가정하고, 슬라브의 자중과 적재하중은 각 층의 질량중심에 작용하는 것으로 가정하여 계산하였다. 보 요소의 단부에 작용하는 질량은 각 층의 대표점에 대해서 자유도변환을 수행하여 각 층의 대표점에 대한 집중질량으로 변환할 수 있다.

층질량의 형성과정을 그림 16에서 표현하고 있다. 그림 16(a)는 구조물의 동적거동에 관성력으로 작용하는 질량으로서, 기둥과 보의 질량 (b)와 슬라브의 질량과 적재하중에 의한 질량 (c)로 나누어서 조합된다. 보요소의 질량은 각 절점으로 lump 시킨 후, 각 층의 대표점에 관한 질량으로 변환한다 (그림 16(d)). 또, 슬라브의 질량과 적재하중에 의한 질량 (c)는 각 층의 질량중심에 곧바로 작용한다고 가정하여, 그 층의 대표점으로 그림 (e)처럼 대표점으로 자유도 변환한다. 이와 같이 별개로 형성된 질량을 조합하면 그림 16(f)와 같은 막대모델의 집중질량으로 단순화시킬 수 있다.

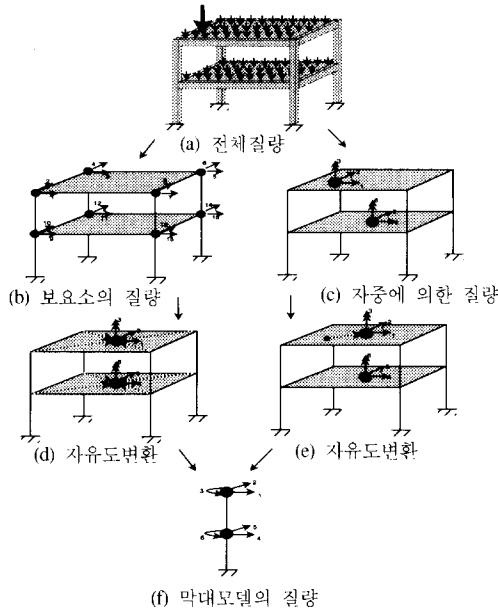


그림 16 질량의 형성

4. 건물의 예제해석

해석모델의 정확성과 효율성을 입증하기 위해서 본 논문에서 제시하는 모형화기법을 사용해서 개발한 해석프로그램의 해석결과를 범용 구조해석 프로그램인 SAP90과 ETABS의 해석결과와 비교한다. 3차원의 동적해석을 수행하여 구조물의 진동수, 모드 형상, 그리고 시간이력해석 결과등을 비교한다. 1940년 El-Centro(N-S)지진기록을 동적하중으로 사용한다. 구조물의 탄성계수는 $210\text{ton}/\text{cm}^2$ 이고, 포와송비는 0.17이다. 기둥과 보의 부재크기는 표 1과 같다. 보요소로 모형화한 연결층의 강성은 수치오차가 발생하지 않는 범위를 확인하여 하부층 기둥강성 I_{c0} 에 10^0 을 곱한 값으로 정한다. 전체모드에 대해서 5%감쇠율을 가지며, 층 질량을 산정하기 위해서 상부의 14층에 72ton, 연결층에 720ton, 그리고 하부의 3층에 468ton의 고정하중을 가하였다. 사용한 단위는 ton, cm, sec이다.

표 1 부재크기

	층	단면
보	1-3	70×50
	5-8	60×45
	9-11	55×45
	12-14	55×40
	15-18	50×40
기둥	1-2	70×70
	3-4	65×65
	5-7	55×55
	8-10	50×50
	11-14	45×45
	14-18	40×40

4.1 해석결과

고유치해석을 통해서 해석된 구조물의 고유 진동수와 질량참여계수를 표 2에 나타내었고, 평면의 이동 및 회전의 진동모드를 구분해서 비교하고 있다. 본 연구의 해석결과는 연결층을 내부변형이 전혀 없는 강체로 보기 때문에 구조물이 SAP90과 ETABS의 경우보다 더 stiff하게 진동하고 있고, 해석오차는 정적해석결과처럼 1%미만으로 적게 발생하고 있다.

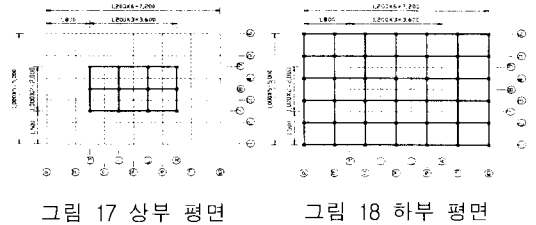


그림 17 상부 평면

그림 18 하부 평면

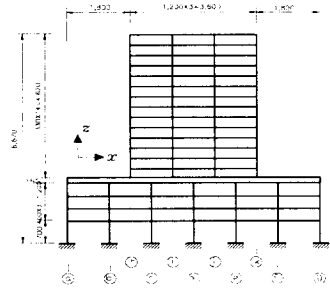


그림 19 구조물의 정면

표 2 진동수와 질량참여계수 비교

모드		진동수 (Hz)			질량참여계수 (%)		
		SAP90	ETABS	본연구	SAP90	ETABS	본연구
X 방향	1	0.585	0.584	0.586	36.92	36.90	36.94
	2	1.375	1.375	1.379	48.16	48.19	48.15
	3	1.872	1.872	1.876	9.93	9.92	9.94
	4	2.947	2.947	2.953	0.61	0.61	0.61
Y 방향	1	0.594	0.591	0.595	36.16	36.10	36.19
	2	1.413	1.412	1.417	47.85	47.92	47.81
	3	1.909	1.909	1.915	11.21	11.18	11.22
	4	2.996	2.995	3.004	0.64	0.65	0.65
비틀림	1	0.833	0.833	0.835	-	12.45	12.45
	2	1.782	1.782	1.786	-	78.93	78.93
	3	2.388	2.393	2.394	-	3.04	3.07
	4	3.962	3.965	3.970	-	0.15	0.15

구조물이 대칭이기 때문에 각각의 진동모드는 순수하게 각 방향으로만 진동하게 된다. 해석결과중에서 가장 주목해야 할 부분이 질량참여계수이다. 일반층에 비해서 연결층에 상대적으로 많은 질량이 분포되어 있기 때문에, 연결층의 변형율이 상부층의 변형율에 비해서 더 크게 발생하는 2차모드의 영향이 구조물의 전체 거동에 더 지배적인 것으로 나타났다. 따라서, 정형 구조물의 1차 진동모드의 영향을 기본으로 하여 근사적으로 지진하중을 산정해서 해석을 수행하는 등가정적해석을 주상복합건물에 적용하는 것은 상당히 불합리하고 위험한 해석방법이라 할 수 있다.

구조물의 진동모드형상이 그림 20, 21, 22에 나타나 있다. 세 가지 해석프로그램에서 해석결과가 겹쳐서 보일 정도로 상당히 일치하는 모드형상을 띄고 있다. x, y방향의 모드와 비틀림 모드의 1차모드에서 구조물의 모드형상이 연결층(4층)에서 중간변위가 적게 발생하기 때문에, 구조물의 모드형상이 정형의 구조물과는 다른 양상을 띄고 있다. 즉, 일반층과 심한 강성차를 보이는 연결층 주위에서 응력집중이 발생하게 될 것이고, 따라서, 연결층과 인접한 부재에 대한 정확한 해석 및 설계가 필요하다.

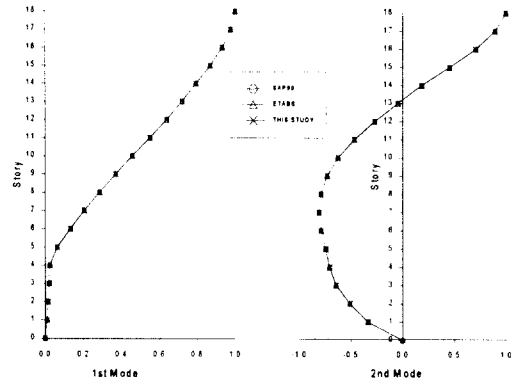


그림 22 구조물의 비틀림 진동모드형상

그림 23과 그림 24는 구조물의 x방향 지진해석결과로서 최상층과 연결층의 시간에 대한 변위의 시간이력곡선을 보여주고 있다. 전체 해석시간 중에 구조물의 반응값이 크게 발생하는 시간(duration of strong motion)대에 대해서 해석결과를 비교하고 있다. 최상층의 최대변위는 6.15초에서 24cm 정도이고 연결층은 2.27초에서 6cm이다(표3 참고). SAP90과 ETABS, 그리고 본 연구의 해석결과가 시간이력해석시간(0초~20초)동안 거의 일치하는 것을 그림을 통해 확인할 수 있다. 표 3은 시간이력해석결과와 최대값중에 최상층(18층)과 연결층(4층)을 비교한 것이다. 본 연구의 해석결과가 범용해석프로그램의 해석결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

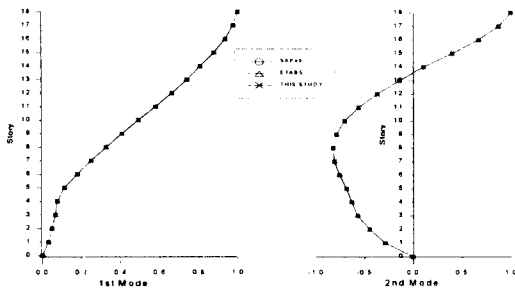


그림 20 구조물의 X방향 진동모드형상

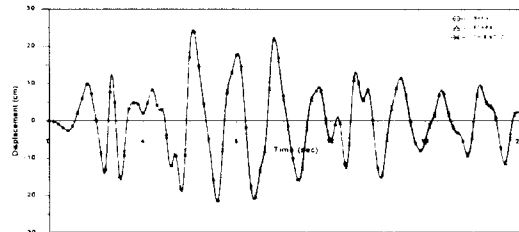


그림 23 18층의 변위시간이력

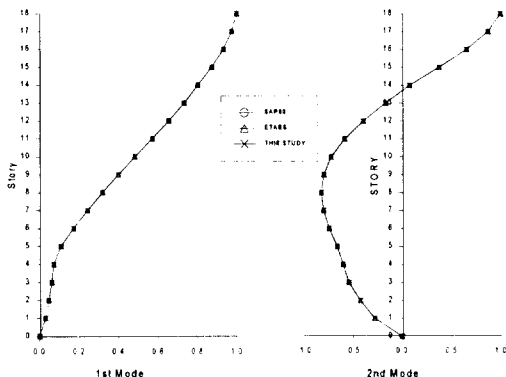


그림 21 구조물의 Y방향 진동모드형상

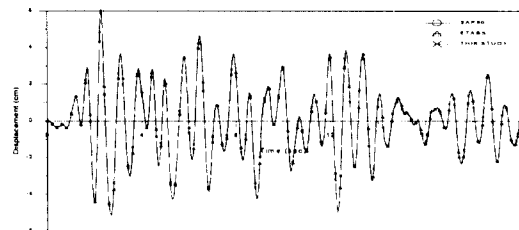


그림 24 연결층의 변위시간이력

표 3 시간이력해석 최대값비교

		SAP90	ETABS	본 연구
최상층 (18층)	시간	6.15	6.15	6.15
	최대값	24.55	24.52	24.53
	시간	7.16	7.17	7.16
연결층 (4층)	최소값	-21.67	-21.72	-21.70
	시간	2.27	2.27	2.27
	최대값	6.09	6.09	6.08
	시간	2.69	2.69	2.68
	최소값	-5.11	-5.13	-5.09

5. 결 론

본 연구를 통해서 상부와 하부 구조물의 2단계로 나뉘어 수행되던 주상복합건물의 근사적인 정적해석보다 훨씬 정확한 결과를 더욱 효과적으로 얻을 수가 있게 되었다. 본 연구의 3장에서 언급한 모형화기법을 이용하면, 비정형성이 매우 강한 주상복합건물의 동적해석이 보다 효율적으로 됨으로 인해서 구조물의 동적저동을 정확히 파악하여 보다 안전하고 경제적인 구조물의 설계가 효과적으로 이루어질 수 있게 될 것이다.

본 연구의 해석 프로그램 SFBC에 의한 해석결과는 SAP90과 ETABS에 의한 해석결과와 비교해 볼 때, 강체를 가지는 구조물의 설계용으로 사용하기에 충분히 정확하고 안정된 해석결과임을 알 수 있다. 그리고 행렬 응축기법을 이용함으로써 컴퓨터의 계산 용량을 줄일 수 있어서 대형 건물의 구조해석을 소형의 개인용 컴퓨터로 할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다. SFBC에 의한 해석시간은 SAP90과 ETABS에 의한 해석속도보다 상당히 빠른데, 대형건물일수록 이러한 속도차이는 더 커질 것으로 판단된다. 그러므로 본 연구에서 제안한 해석방법은 주상복합건물의 구조설계에 매우 정확하고 합리적인 방법으로 적용할 수 있다.

본 연구에서는 주상복합건물의 동적해석에 관한 연구가 3차원 골조 구조물에 대해서 이루어졌다. 본 연구에서 개발된 기술에 전단벽요소를 첨가시키면 실제의 주상복합건물의 해석과 설계에 적용할 수가 있을 것이다. 또, 연결층과 인접한 부재력을 이용해서 연결층에 대한 판의 해석을 수행하면, 정적 및 동적해석에

서 발생하는 연결층의 부재력을 간단하게 구할 수 있다. 이러한 연결층의 부재력을 산출해서 연결층에 대한 내진설계의 자료로 활용할 수 있을 것이다. 따라서 주상복합구조물의 설계에 신뢰성을 가진 구조해석이 가능하게 되므로 불량 구조시스템의 판별을 통한 구조안전성 확보에도 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 초대형구조시스템 연구센터(STRESS)의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 이동근, 신영수, 조한욱, "고층건물의 해석 및 설계," 한국전산구조공학회, 교재 11-2.
2. 이동근, 윤정방, "구조동역학의 개념 및 내진설계," 전산구조공학회, 교재 8-1.
3. 황철성, 정성진, 변문주, "상용구조해석 프로그램의 이론 및 적용," 한국전산구조공학회, 교재 10-3.
4. 김경호, 이동근, "고층건물이 효율적인 구조해석," 대한토목학회 논문집, 제7권 2호, pp. 141-153.
5. Smith, B. S., and Coull, A., *Tall Building Structures Analysis and Design*, John Wiley & Sons, pp. 150-151.
6. Weaver, W., and Johnson, P. R., *Structural Dynamics by Finite Elements*, Prentice Hall, pp.282-290, pp. 411-423,
7. Weaver, W., and Gere, J. M., *Matrix Analysis of Framed Structures*, Van Nostrand Reinhold, Third Edition.
8. Timoshenko, S. P., Weaver, W., and Young, D. H., *Vibration Problem in Engineering*, John Wiley & Sons, Fifth Edition.
9. Humar, J. L., and Khandocker, J. U., "A computer program for three dimension analysis of building," *Computers and Structures*, Vol. 11, 1980, pp. 369-387.
10. Gluck, J. I., and Kalev, I., "Computer method for analysis of multistory structures," *Computers and Structures*, Vol. 2, 1972, pp.897-913.