

# 바닥판의 휨강성을 고려한 전단벽식 건물의 효율적인 지진해석

## Efficient Seismic Analysis of High-Rise Shear Wall Building Structures considering the Flexural Stiffness of Floor Slabs

김 현 수\*

Kim, Hyun-Su

이 동 근\*\*

Lee, Dong-Guen

(논문접수일 : 2000년 11월 13일 ; 심사종료일 : 2001년 6월 22일)

### 요 지

현재 국내에서는 아파트 건물을 짓는데 벽과 바닥판으로만 이루어진 벽식 구조형식을 많이 사용하고 있다. 이러한 고층 아파트건물을 해석하기 위해서 ETABS나 MIDAS/BDS 같은 상용프로그램이 주로 사용되고 있다. ETABS는 해석상의 편의를 위하여 바닥판을 강막으로 가정하여 모형화하고 바닥판의 휨강성은 고려하지 않고 있다. 이러한 가정은 프레임 구조물을 해석할때에는 합리적이라고 할 수 있다. 그러나 벽식 구조물은 바닥판의 휨강성이 전체 구조물의 횡방향 강성에 큰 영향을 미치므로 바닥판의 휨강성을 고려하지 않으면 전체 구조물의 강성을 과소평가하게 된다. 따라서 바닥판을 판요소로 세분하여 모형화하는 것이 필요하다. 그러나 이때 많은 양의 해석 시간과 컴퓨터 메모리가 필요하게 된다. 따라서 본 연구에서는 부분구조법과 행렬응축기법을 사용하여 해석 시간과 컴퓨터 메모리의 사용을 줄이면서도 바닥판의 휨강성을 효율적으로 해석할 수 있는 해석 기법을 제안하였고 예제를 통하여 검증하였다.

**핵심용어** : 바닥판의 휨강성, 행렬응축기법, 부분구조법

### Abstract

The box system, composed only of reinforced concrete walls and slabs, are adopted by many high-rise apartment buildings recently constructed in Korea. Commercial softwares, such as ETABS or MIDAS/BDS, commonly used for the analysis of high-rise apartment buildings, are employing the rigid diaphragm assumption for simplicity in the analysis procedure. In general, the flexural stiffness of the floor slabs is ignored in the analysis. This assumption may be reasonable for the estimation of seismic response of framed structures. But in the case of the box system used in the apartment buildings, the floor slabs have significant influence on the lateral response of a structure. Therefore, if the flexural stiffness of the slabs in the box system is ignored, the lateral stiffness may be significantly underestimated. For these reasons, it is recommended to use plate elements to represent the floor slabs. However, it would cost tremendous amount of analysis time and computer memory if the floor slabs were subdivided into a finer mesh. In this study, an efficient method is proposed for the efficient analysis of multi-story buildings considering the effect of floor slabs with drastically reduced time and memory for the analysis by using the substructuring technique and matrix condensations.

**Keywords** : flexural stiffness, matrix condensation, substructuring technique

\* 학생회원 · 성균관대학교 건축공학과, 박사과정

\*\* 정회원 · 성균관대학교 건축공학과, 교수

• 이 논문에 대한 토론을 2001년 9월 29일까지 본 학회에 보내주시면 2001년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

현재 국내에서 많이 건설되고 있는 고층아파트는 콘크리트 벽과 바닥판만으로 구성되는 벽식 구조형태(Box System)를 주로 도입하고 있다. 벽식 구조형태는 벽과 바닥판의 합성작용으로 인하여 수평 및 수직하중에 효율적으로 저항하는 방식으로 알려져 있으며 시공시 터널 폼(tunnel form)을 사용함으로써 건물 내외면의 미려한 시공 효과와 함께 벽체의 미장을 생략, 상당한 공기의 절감을 가져오는 이점이 있다. 이러한 구조를 적용한 고층아파트건물의 해석에는 일반적으로 ETABS와 같은 상용 프로그램이 많이 사용되고 있다. ETABS는 해석의 단순화를 위하여 바닥판의 면내강성을 무한대로 가정하는 강막가정을 사용한다.<sup>4)</sup> 이 경우에 바닥판의 휨강성은 일반적으로 무시한다. 그러나 벽식 구조에서는 바닥판의 휨강성이 구조물의 횡방향 강성에 큰 영향을 미치게된다. 이러한 이유 때문에 바닥판을 정확히 모형화하기 위해서는 판요소를 사용하여 바닥판을 세분하는 것이 필요하다. 그러나 바닥판을 판요소로 세분하여 전체 건물을 모형화 한다면 상당히 많은 양의 해석 시간과 컴퓨터 메모리가 필요하게 되므로 실무에 적용하기에는 많은 어려움이 따른다. 전단벽식 건물의 해석에 대한 기존의 연구는 바닥판의 면내 강성을 무한대로 가정하는 강막가정의 적용시의 문제점에 대한 연구<sup>1),2)</sup>와 해석의 효율성보다는 정확성에 주안점을 둔 연구<sup>3)</sup>가 주로 수행되어왔다.

따라서 본 연구에서는 바닥판의 휨강성이 벽식 구조물과 프레임 구조물의 전체 거동에 미치는 영향에 대하여 분석하여 보았고 바닥판의 휨강성을 고려하여 고층 건물을 해석할 때 소요되는 해석 시간과 컴퓨터 메모리를 줄일 수 있는 개선된 해석 기법을 제안하였다. 제안된 해석 기법은 슈퍼요소(super element)와 부분구조법<sup>7)</sup>(substructuring technique), 행렬응축기법<sup>9)</sup>(matrix condensation technique)을 적용하였고 바닥판과 전단벽의 적합조건을 만족시키기 위해서 가상의 보를 사용하였다.

## 2. 바닥판의 휨강성이 고층건물의 지진거동에 미치는 영향

### 2.1 예제구조물

지진하중과 같은 횡하중이 고층건물에 가해졌을 때

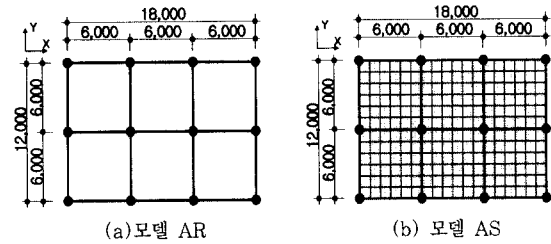


그림 1 예제 구조물 A의 평면

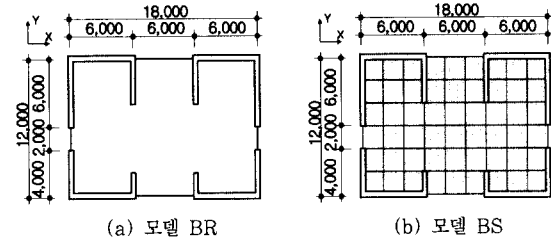


그림 2 예제 구조물 B의 평면

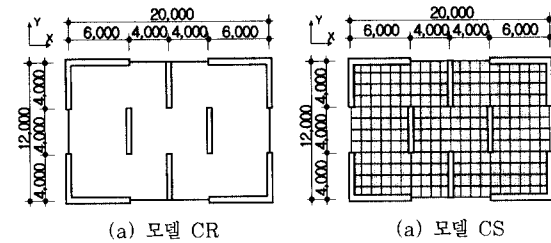


그림 3 예제 구조물 C의 평면

바닥판의 휨강성이 고층건물의 전체 거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 아래와 같이 하나의 전형적인 프레임 구조물과 두 개의 조금 다른 벽식 구조물을 선택하였다. 모델 AR, BR, CR은 ETABS와 같은 상용 프로그램에서 사용하는 일반적인 모형화 방법<sup>4)</sup>으로 바닥판을 강막으로 가정하고 바닥판의 휨강성은 고려하지 않은 모델이다. 이때 건물의 해석 모델은 층당 3개의 자유도로 표현된다. 모델 AS, BS, CS는 바닥판의 휨강성을 고려하기 위해서 판요소를 사용하여 그림에서 보는 것처럼 바닥판을 세분하여 모형화한 모델이다. 바닥판을 나타내는 판요소와 연결된 보 또는 전단벽을 나타내는 요소도 같은 위치에서 분할하여 판요소와의 적합조건을 고려하였다. 구조물 B는 전단벽이 균일하게 배치된 벽식 구조물이고 구조물 C는 불규칙적으로 배치된 구조물이다.

## 2.2 구조물의 변형형상

모델 AS와 모델 BS에 Y축 방향으로 지진하중이 가해졌을 때 발생하는 구조물의 변형을 그림 4에 나타내었다. 모델 AS의 경우에는 프레임 구조물로서 전형적인 전단변형의 형상을 나타낸다. 그림에서 보와 같이 바닥판의 휨은 크게 일어나지 않는다. 또 그림 5(a)에서 보는 바와 같이 바닥판과 바닥판을 둘러싸고 있는 보의 거의 같은 형상으로 휘어지므로 그림 4(a)에서는 보가 휘는 모습만 볼 수 있다. 그리고 그림 4(a)에서 상층 부보다는 하층부에서 바닥판이 더 많이 휘는 것을 볼 수 있다. 모델 BS의 경우에는 바닥판이 상하로 움직이면서 휘는 모습을 볼 수 있다. 그림을 보면 바닥판의 휨은 구조물의 상부로 갈수록 더욱 심하다는 것을 알 수 있다. 이는 벽식 구조물이 휨거동을 하기 때문이며 이러한 경향은 구조물이 고층일수록 더욱 커진다. 벽식 구조물의 경우에는 전단벽과 전단벽 사이가 바닥판만으로 연결되어 있고 또한 전단벽 사이의 거리가 일반적으로 프레임 구조물의 경간보다 짧기 때문에 그 만큼 변형시 바닥판에 축적되는 변형 에너지가 커지게 된다. 그림 5에 벽식 구조물과 프레임 구조물 바닥판의 변형형상을 나타내었다.

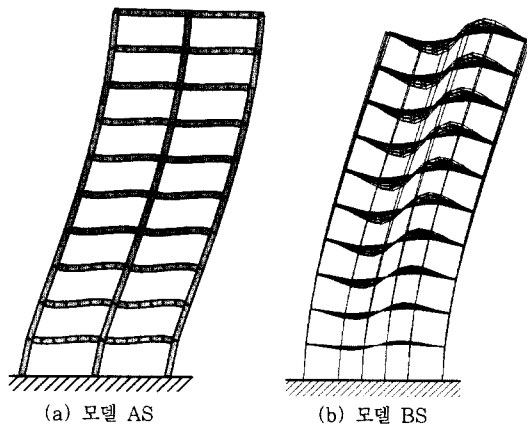


그림 4 지진하중에 의한 구조물의 변형

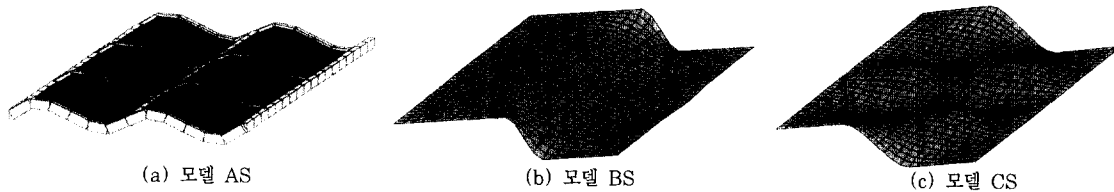


그림 5 지진하중에 의한 바닥판의 변형

벽식 구조물 바닥판의 변형 형상을 보면 횡하중을 Y 방향으로 가하였지만 바닥판은 Y방향 뿐만 아니라 X 방향으로도 심하게 휘어지는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 지진하중과 같은 횡하중이 구조물에 가해졌을 때 바닥판의 휨강성이 구조물의 전체 거동에 미치는 영향을 더욱 크게 한다. 이에 반하여 프레임 구조물의 경우에는 바닥판이 하중을 가하는 방향으로만 휘어지고 또한 휨이 발생하더라도 대부분의 변형 에너지는 보에 축적이 되기 때문에 그만큼 바닥판이 구조물의 전체 거동에 미치는 영향은 작아지게 된다. 모델 BS는 전단벽이 규칙적으로 배치되어 있기 때문에 모델 CS보다는 바닥판이 조금 휘고 주로 한쪽 방향으로만 휘어지게 된다. 따라서 모델 BS는 바닥판이 구조물의 횡방향 강성에 미치는 영향이 모델 CS보다는 작아지게 된다.

## 3. 예제해석을 통한 지진거동 분석

본 논문에서는 바닥판의 휨강성이 구조물의 지진거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 그림 1, 2, 3에 나타난 6개의 평면에 대해서 10층과 20층으로 모형화하여 총 12개의 구조물에 대해서 등가정적해석, 고유치해석 및 응답스펙트럼해석을 수행하였다. 모델 AR10, BR10, CR10은 강막가정을 사용하여 모형화한 10층 예제구조물이고 모델 AS10, BS10, CS10은 바닥판을 판요소를 사용하여 모형화한 모델이다. 모델 AR20, BR20, CR20, AS20, BS20, CS20은 같은 방법으로 모형화한 20층 구조물을 나타낸다. 모든 예제구조물은 철근콘크리트조이다. 또한 본 연구에서는 구조물의 전체적인 거동만 파악하게되므로 프레임 구조물 보의 크기는 50cm×30cm, 기둥의 크기는 50cm×50cm로 일정하게 하였다. 모든 구조물의 바닥판 두께는 13.5cm로 하였고 벽식 구조물에서 전단벽의 두께는 18cm로 하였다.

### 3.1 등가정적 해석에 의한 횡변위의 비교

10층과 20층 구조물에 대하여 등가정적해석을 수행한 후 각 층의 횡변위를 그림 6, 7, 8에 나타내었다.

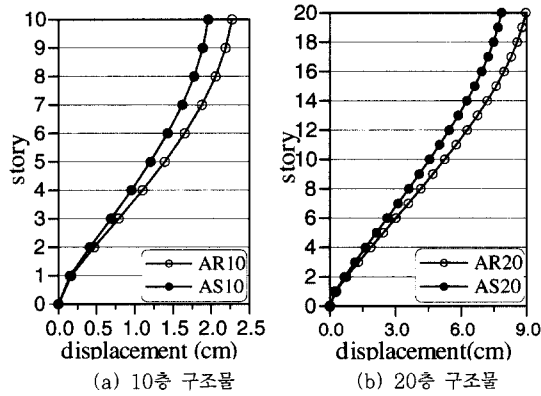


그림 6 구조물 A의 정적 횡변위

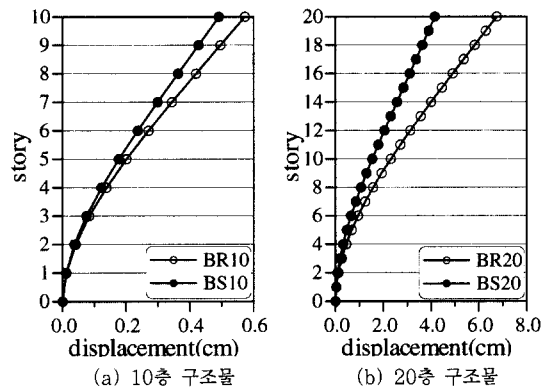


그림 7 구조물 B의 정적 횡변위

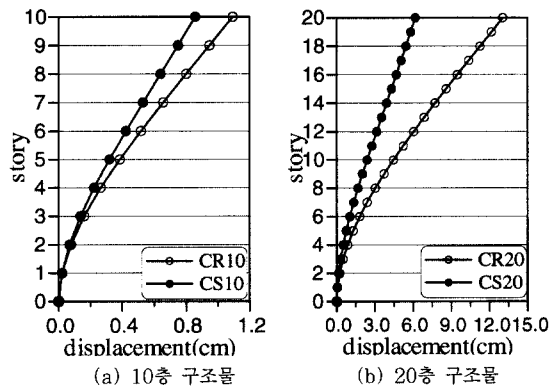


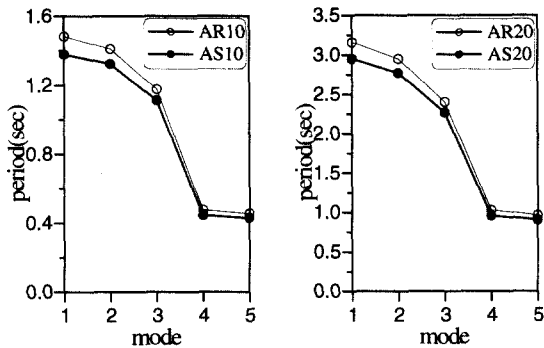
그림 8 구조물 B의 정적 횡변위

등가정적해석시 지역계수는 0.12, 중요도 계수는 1, 지반계수는 1, 반응수정계수는 프레임 구조물일 경우에는 4.5, 벽식 구조물 일 경우에는 3.0으로 하였다.

모든 경우에 바닥판의 휨강성을 고려하지 않았을 때 구조물의 횡변위가 더 많이 발생하였다. 10층 프레임 구조물의 최상층의 횡변위를 비교했을 때 바닥판의 휨강성을 고려하지 않은 모델이 휨강성을 고려한 모델보다 약 15%정도 변위가 더 발생하였다. 10층 벽식 구조물에서는 최상층의 변위 차이가 각각 19%(구조물 B)와 27%(구조물 C)로 프레임 구조물보다는 많은 차이가 발생하였다. 또 같은 벽식 구조물이라 하더라도 구조물 바닥판의 변형이 심하면 즉 바닥판에 축적된 변형에너지가 크면 변위의 차이도 더 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 20층 프레임 구조물에서는 최상층 변위의 차이가 약 14%정도가 발생했다. 즉 프레임 구조물의 경우에는 층수에 상관없이 바닥판의 휨강성은 전체구조물의 지진거동에 큰 영향을 미치지 못하는 것을 알 수 있다. 20층 벽식 구조물일 때에는 최상층의 변위 차이가 각각 85%(구조물 B)와 111%(구조물 C)에 달하였다. 즉 벽식 구조물의 경우에는 층수가 높아질수록 바닥판의 휨강성이 전체 구조물의 횡방향 강성에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

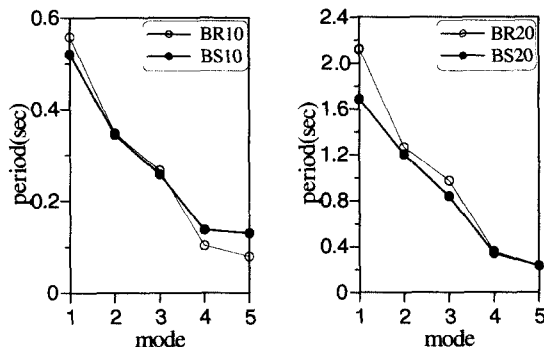
### 3.2 고유치 해석

예제 구조물에 대한 고유치 해석 결과를 그림 9, 10, 11에 나타내었다. 모형화 방법에 상관없이 각각의 구조물 질량은 일정하기 때문에 구조물의 고유진동주기는 강성에 의해서 차이가 나게된다. 즉 대략적으로 바닥판의 휨강성을 고려하였을 때와 고려하지 않았을 때의 주기의 비는 정적변위비의 제곱근만큼 발생하게 된다. 고유치 해석한 결과를 보면 모든 예제 구조물에 대해서 바닥판의 휨강성을 고려하였을 때가 고려하지 않았을 때보다 주기가 짧아지는 것을 볼 수 있다. 정적변위의 경우와 마찬가지로 그림 9의 프레임 구조물의 경우는 층수에 관계없이 주기 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 벽식 구조물의 경우에는 10층 구조물보다 20층 구조물에서 주기 차이가 크게 발생함을 알 수 있다.



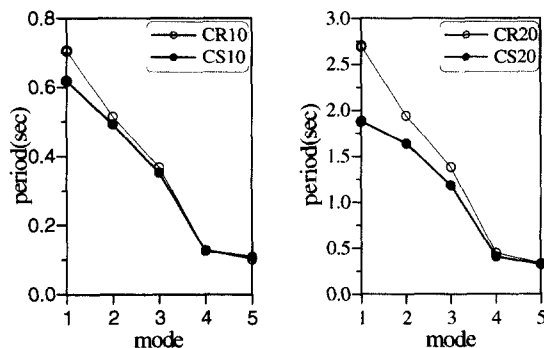
(a) 10층 구조물 (b) 20층 구조물

그림 9 구조물 A의 고유진동주기



(a) 10층 구조물 (b) 20층 구조물

그림 10 구조물 B의 고유진동주기



(a) 10층 구조물 (b) 20층 구조물

그림 11 구조물 C의 고유진동주기

3.3 응답스펙트럼 해석

구조물의 고유진동주기가 달라지면 응답스펙트럼 해석을 수행할 때 응답스펙트럼에서 얻어오는 가속도 값이 차이가 나게된다. 일반적으로 바닥판의 휨강성을 고

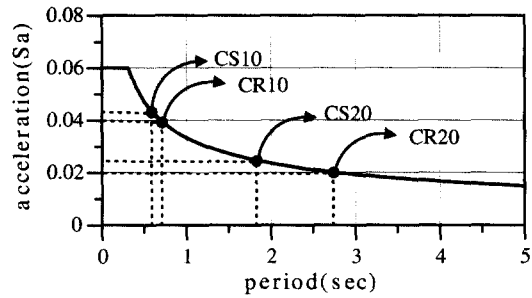


그림 12 모형화 방법에 따른 가속도의 차이

표 1 밀면 전단력 비교(단위 : tonf)

모델	AR10	AS10	BR10	BS10	CR10	CS10
밀면 전단력	19.0	19.8	36.8	38.4	41.8	47.8
모델	AR20	AS20	BR20	BS20	CR20	CS20
밀면 전단력	25.8	26.8	42.0	47.8	47.8	54.7

려하지 않은 모델이 고려한 모델보다 고유진동주기가 더 길어지게 된다. 즉 그림 12의 일반적인 설계스펙트럼에서 보는 바와 같이 CR20이 CS20보다 진동주기가 더 길기 때문에 응답스펙트럼에서의 가속도 값은 더 작아지게 된다. 이와 같이 바닥판의 휨강성을 고려하지 않게 되면 응답스펙트럼에 의해서 계산되는 지진하중이 상대적으로 작게 계산되게 된다.

또한 주기의 차이가 별로 크지 않더라도 하더라도 주기가 짧을 때는 응답스펙트럼의 기울기가 급해지므로 가속도의 차이가 커지게 된다. 응답스펙트럼에 의해서 계산된 지진하중이 구조물에 가해졌을 때 구조물에 발생하는 밀면 전단력을 표 1에 나타내었다.

응답스펙트럼 해석시에는 표 1에서 보는 바와 같이 바닥판 휨강성의 고려 여부에 따라서 고유진동주기가 달라지므로 바닥판의 휨강성을 고려하지 않고 강막가정으로만 바닥판을 모형화 한 모델은 바닥판의 휨강성을 고려한 모델보다 더 작은 지진하중을 받는 것으로 계산된다. 따라서 보다 정확한 해석결과를 위해서는 바닥판의 휨강성을 고려해서 모형화하는 것이 필요하다.

4. 바닥판의 휨강성을 고려한 효율적인 지진해석

벽식 구조물을 모형화할 때 바닥판의 휨강성을 고려하지 않으면 전체 구조물의 강성을 상당히 과소평가하게 되는 결과를 가져온다는 것을 앞의 예제를 통하여 살펴

보았다. 바닥판의 휨강성을 제대로 고려하기 위해서는 바닥판을 판요소로 세분하여 모형화하는 것이 필요하다. 하지만 이렇게 바닥판을 세분하여 모형화하면 상당한 양의 해석 시간과 컴퓨터 메모리가 소요되게 된다. 따라서 대부분의 실무중사자들은 강막가정으로만 바닥판을 모형화하고 있다. 본 연구에서는 부분 구조법과 행렬응축기법을 적용하여 바닥판의 영향을 고려하고도 해석시간과 컴퓨터 메모리를 절약할 수 있는 효율적인 해석 기법을 제안하였다.

#### 4.1 강막가정과 행렬응축기법

바닥판을 판요소로 세분화하여 모형화하면 절점의 개수가 많아지므로 자유도수가 증가하여 많은 해석시간과 컴퓨터 메모리를 필요하게 된다. 이 때 강막가정을 적용하면 구조물 한 층의 면내 자유도를 3개로 줄일 수가 있다. 계속해서 남아있는 면외 자유도는 행렬응축을 통해서 소거할 수 있다. 따라서 바닥판을 판요소로 세분하여 모형화한 벽식구조물은 최종적으로 층 당 3개씩의 자유도를 가지는 막대모델로써 모형화된다. 이러한 행렬응축과정을 그림 13에 나타내었다.

756개의 자유도를 가진 2층 벽식 구조물에 강막가정을 적용함으로써 자유도를 378개로 줄일 수 있고 남은 면외 자유도는 행렬응축을 통해 소거되므로 층당 3개의 자유도를 가지는 막대모델로 변환된다. 이렇게 축소된 강성 및 질량행렬을 이용하면 정적 해석, 고유치 해석 및 시간이력해석에 소요되는 시간을 많이 단축할 수 있다. 이러한 모형화 방법은 구조물의 자유도 전체에 대하여 해석하는 경우보다 질량 및 강성행렬의 크기가 매우 줄어들게 되어 개인용 전산기로써도 실제의 복잡한 구조물을 해석할 수 있다. 그러나 이러한 행렬응

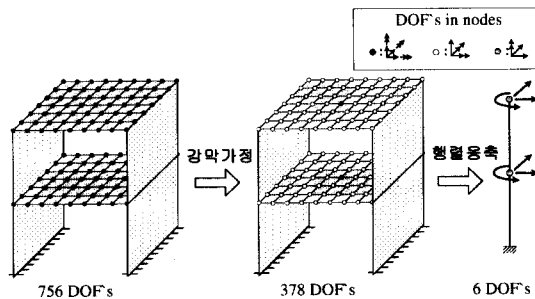


그림 13 강막가정과 행렬응축에 의한 자유도 변환

축기법을 이용할 경우에 구조물이 대형화되면 행렬응축과정에서 많은 시간이 소요되는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 부분구조법<sup>7)</sup>을 이용하였다.

#### 4.2 부분구조법을 적용한 효율적인 해석

현재 국내에서 건설되고 있는 고층 아파트의 평면은 한 층에서 한 세대를 단위로 하여 대칭이고, 매층마다 동일한 평면이 반복되는 특징을 가지고 있으므로 부분구조법을 적용하기가 용이하다. 그림 14에 단순화한 아파트의 평면을 나타내었다. 이 예제 구조물을 통하여 본 연구에서 아파트 건물에 적용하는 부분구조법에 대해서 보다 자세한 설명을 하기로 한다.

우선 아파트 한 세대의 바닥을 슈퍼요소(super element)로 생각하여 이 슈퍼요소의 강성행렬과 질량행렬을 구한다. 이렇게 만든 슈퍼요소를 사용하여 건물 한 층의 바닥판을 구성 한 후 이것을 부분구조로 하여 전체 구조물을 형성한다. 그림 15에 아파트 건물에 부분구조법을 적용한 개념을 나타내었다. 그림을 보면 알 수 있듯이 아파트 한 층의 바닥판을 여러개의 판요소로 세분하여 모형화하였고 한 세대의 바닥판을 하나의 슈퍼요소로써 모형화하였다. 슈퍼요소에서 남아있는 절점은 전단벽과 연결되는 절점이다. 여러개의 판요소로 이루어진 슈퍼요소를 생각하여 볼 때 여러개의 요소를 모두 조합한 평형방정식을 구성하고 이를 다시 전단벽과 연결되는 자유도와 슈퍼요소 내부의 자유도와 관련된 방정식으로 정리하면 다음식이 된다.

$$\begin{bmatrix} S_{ii} & S_{ib} \\ S_{bi} & S_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_i \\ D_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_i \\ A_b \end{bmatrix} \quad (1)$$

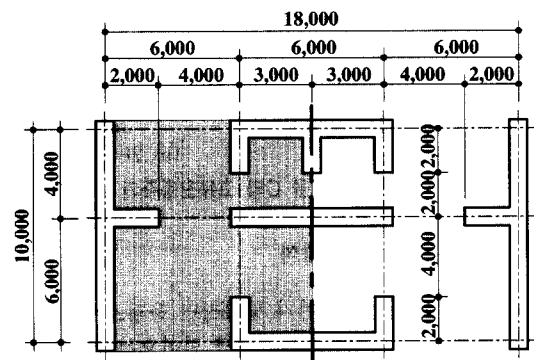


그림 14 단순화한 아파트 평면도

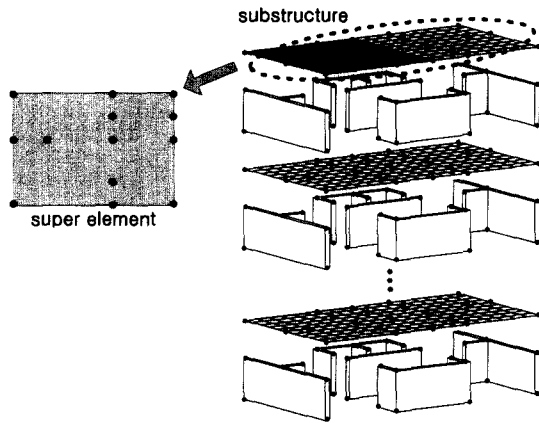


그림 15 부분구조법의 적용

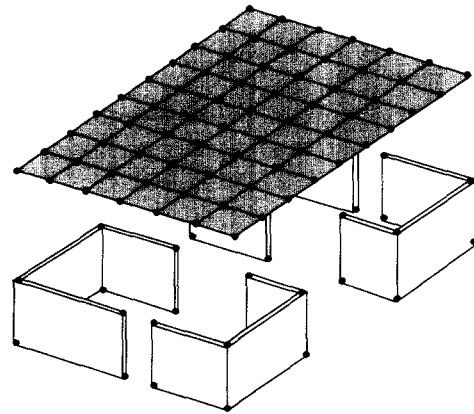


그림 16 바닥판과 전단벽의 모형화

여기서 첨자  $i$ 는 슈퍼요소의 내부,  $b$ 는 경계를 의미한다. 식(1)에서 정적응축기법에 의해 내부 변위를 소거하고 경계상의 변위로만 표시하면 다음과 같다.

$$[S'_{bb}](D_b) = \{A'_b\} \quad (2)$$

여기서,  $[S'_{bb}] = [S_{bb}] - [S_{bi}][S_{ii}]^{-1}[S_{ib}]$   
 $\{A'_b\} = \{A_b\} - [S_{bi}][S_{ii}]^{-1}\{A_i\}$

식(2)는 전단벽과 연결되는 절점에만 자유도를 갖는 하나의 슈퍼요소를 의미한다. 예제구조물에서는 식(1)과 (2)를 통해서 하나의 슈퍼요소만 구하면 나머지 세대에서는 반복해서 사용할 수 있으므로 그 만큼 해석시간과 컴퓨터 메모리를 절약할 수 있다.

### 4.3 가상보의 사용

단위 세대를 모델링할 때 불규칙적인 전단벽의 배치 때문에 바닥판에는 임의의 위치에 여러 절점이 발생하게 된다. 따라서 그림 16과 같이 바닥판을 판요소로 세분하여 모형화하는 것이 필요하다. 그러나 해석모델에 사용

되는 절점의 수를 줄이기 위해서 전단벽은 하나의 판요소로 모형화하는 것이 효과적이다. 이렇게 모형화하면 바닥판에 존재하는 절점들이 전단벽과 공유되지 않으므로 바닥판과 전단벽이 공유하고 있는 절점을 제외한 나머지 부분에서는 요소들이 변형적합조건을 만족시키지 못하게 된다. 즉 그림 17(a)에서 점선 안에 있는 부분은 바닥판과 전단벽이 일체로 거동하지 못하게 된다.

따라서 이러한 모델은 전단벽까지 세분하여 전단벽과 바닥판 요소들의 모든 절점을 공유하도록 만든 모델에 비하여 횡방향 강성이 작아지게 된다. 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 횡강성이 큰 가상의 보를 사용하였다. 즉 그림 17(b)와 같이 전단벽과 연결되는 부분의 바닥판을 횡강성이 큰 보로 연결하여 준다. 그리고 나서 전단벽과 공유되지 않는 내부의 절점을 행렬응축 기법을 사용하여 소거시키면 보요소의 형상함수와 전단벽요소의 형상함수가 3차곡선으로 일치하기 때문에 전단벽요소와 바닥판 사이의 변형적합조건을 어느 정도만족시킬 수 있다. 그 후 가상의 보에 의해서 추가되는 강성은 그림 17(d)와 같이 내부 절점이 없는 보의 강성만큼 빼주었다. 가상의 보의 효율성을 검증하기 위하여 모델 BS20의 최상층 바닥판의 변



그림 17 가상의 보를 사용한 모형화 방법

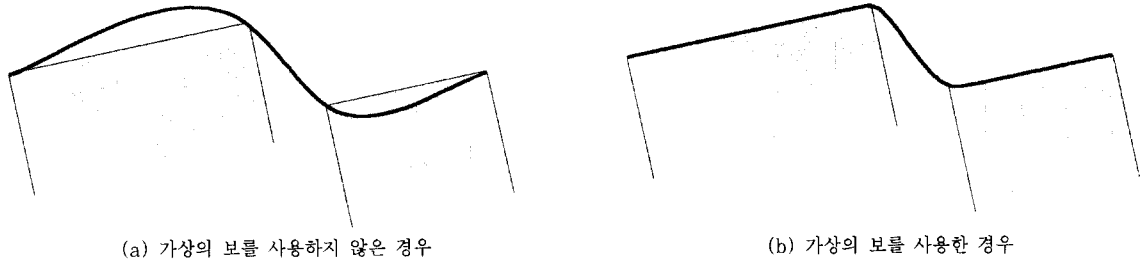


그림 18 바닥판과 전단벽이 접하는 부분의 바닥판의 변형형상

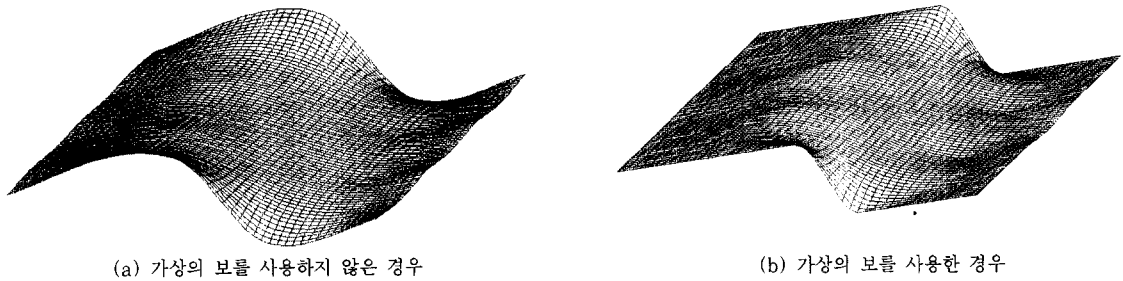


그림 19 최상층 바닥판의 변형형상

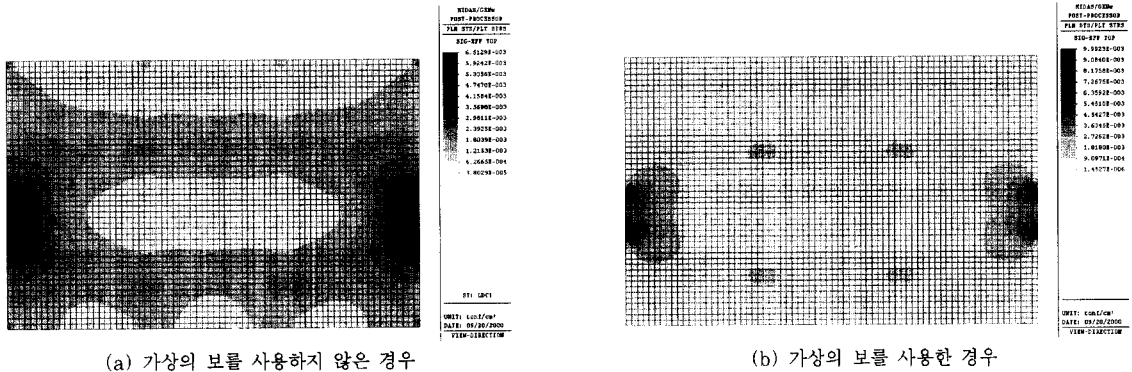


그림 20 최상층 바닥판의 휨응력 분포

형 형상을 가상의 보를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 대하여 그림 18과 19에서 비교하여 보았다.

그림에서 보는 바와 같이 가상의 보를 사용하지 않았을 경우 바닥판의 변형형상은 전단벽과 공유하는 절점에서만 일치한다. 그러나 가상의 보를 사용하였을 경우에는 변형적합조건을 상당히 잘 만족시키는 것을 볼 수 있다. 변형형상의 차이는 그림 20에서 보는 바와 같이 바닥판에서의 휨응력의 차이로 이어지게 된다.

가상의 보를 사용하지 않는 경우 휨응력의 최대값은  $0.00651\text{tonf/cm}^2$ 이고 최소값은  $0.00003\text{tonf/cm}^2$ 이었다. 이에 비해 가상의 보를 사용한 경우는 각각

$0.00992\text{tonf/cm}^2$ 와  $0.000014\text{tonf/cm}^2$ 였다. 따라서 가상의 보를 사용하면 바닥판의 응력을 전단벽의 끝부분으로 집중시킨다는 것을 알 수 있었다.

### 5. 제안된 해석기법을 적용한 예제구조물의 해석

제안된 해석기법의 효율성과 정확성을 검증하기 위하여 예제구조물 B와 C를 선택하였다. 예제구조물의 층수는 20층으로 하였고 표 2와 같은 3가지 방법으로 해석을 수행하였다. 예제구조물의 평면을 그림 21, 22, 23에 나타내었다.



표 2 예제구조물의 특징

	Case-1	Case-2	Case-3
강막가정	○	○	○
바닥판 휨강성	×	○	○
부분구조법	×	×	○
가상의보	×	×	○

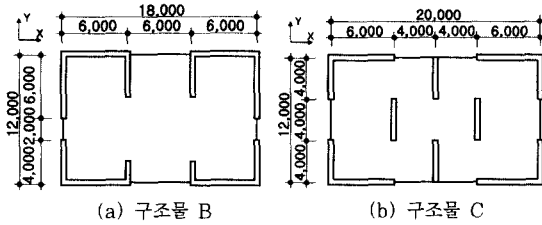


그림 21 해석 방법 Case-1

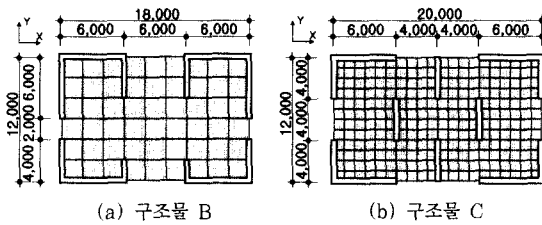


그림 22 해석 방법 Case-2

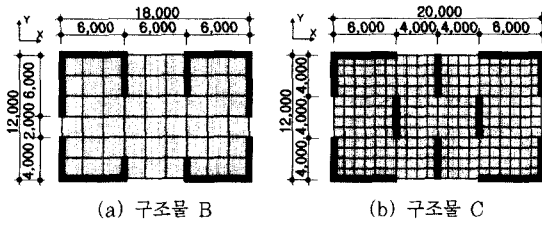


그림 23 해석 방법 Case-3

표에서 보는 것과 같이 Case-1은 바닥판의 휨강성은 무시하고 강막가정만 적용하므로, 20층 예제구조물 B와 C에 적용할 경우에는 모델 BR20과 CR20을 나타낸다. Case-2는 바닥판의 휨강성을 고려한 모델로서 판요소를 사용하여 바닥판을 세분한 모델이므로 모델 BS20과 CS20을 나타낸다. 이 해석방법이 가장 정확한 결과를 나타낼 것으로 예상되는 방법이다. Case-3는 행렬응축기법과 부분구조법 그리고 가상의 보를 사용한 본 연구에서 제안한 해석 방법이다. 이 3가지 다른 해석 방법에 의해서 계산된 정적형변위를 그림 24에

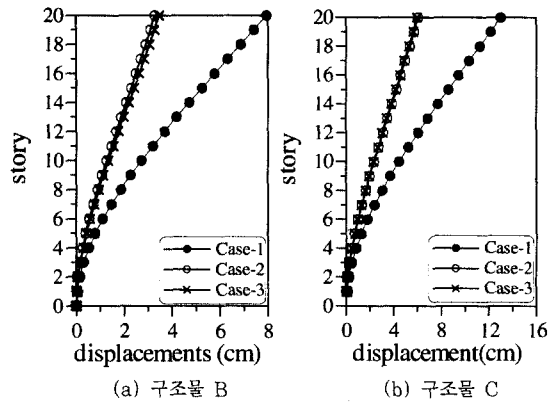


그림 24 해석 방법에 따른 정적형변위 비교

표 3 예제 구조물의 자유도 수와 해석시간

		Case-1	Case-2	Case-3
구조물 B	자유도	60	8520	60
	해석시간	36초	827초	98초
구조물 C	자유도	60	32760	60
	자유도	42초	3031초	168초

나타내었다. 그림 24를 보면 Case-3의 결과치가 가장 정확한 결과치라고 생각되는 Case-2에 매우 근접한 것을 알 수 있다. 그러나 Case-1은 형변위를 상당히 과대평가한다. 각각의 해석 방법에 소요되는 해석 시간과 자유도 수를 표 3에 나타내었다. Case-2 더 정확한 해석결과를 얻기 위해서 Case-1보다 약 20배 이상 더 많은 해석 시간을 소요하게 된다. 그러나 본 연구에서 제안된 해석방법인 Case-3은 해석시간은 대폭 줄이면서 Case-2에 거의 근접한 해석결과를 얻을 수 있다. Case-3의 자유도 수가 Case-1의 자유도 수가 같지만 해석시간이 조금 더 걸리는 이유는 표 2에서 보는 것처럼 Case-1에 비하여 몇 가지 작업을 더 수행하기 때문이다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 바닥판의 휨강성이 고층건물의 지진 거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 프레임 구조물과 벽식 구조물에 대하여 바닥판의 휨강성의 고려여부에 따른 건물의 거동을 분석하여 보았다. 그리고 부분구조법, 행렬응축기법, 가상의 보를 이용하여 바닥판의

휨강성을 효율적으로 고려할 수 있는 해석기법을 제안하였다. 본 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 프레임 구조물의 경우에는 층수에 관계없이 바닥판의 휨강성을 고려했을 때와 고려하지 않았을 때의 거동에 큰 차이가 없으므로 바닥판을 모형화할 때 바닥판의 휨강성을 고려하지 않고 강막가정으로 모형화하는 것이 효율적이다.
- 2) 벽식 구조물의 경우에는 바닥판의 휨강성이 구조물의 횡방향 강성에 미치는 영향이 비교적 크다는 것을 확인할 수 있었고 특히 전단벽의 배치가 불규칙적이고, 건물이 고층일수록 이러한 경향은 더욱 크게 발생한다. 따라서 벽식 구조물의 경우에는 바닥판의 휨강성을 고려하지 않으면 구조물 전체의 횡방향 강성이 지나치게 과소평가되므로 바닥판의 휨강성을 고려하는 것이 필요하다.
- 3) 해석 시간의 단축을 위해서 부분구조법과 행렬응축기법을 사용한 해석기법을 제안하였다. 제안된 해석기법은 해석의 정확성이나 해석시간의 경제성을 고려해볼 때 상당히 효율적이라는 것을 확인할 수 있었다.

### 감사의 글

본 논문은 2000년도 두뇌한국21사업 핵심분야 사업비와 서울대학교 지진공학연구센터(KEERC)를 통한 한국과학재단 우수연구센터에 의하여 지원되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. Ju S. H., "Comparison of building analyses assuming rigid or flexible floors-Closure," *Journal of Structural Engineering ASCE*, Vol. 126, 2000, pp.273~274
2. Ju S. H., "Lin M. C. Building analyses comparisons assuming rigid or flexible floors". *Journal of Structural Engineering ASCE*, Vol. 125, 1999, pp.25~31
3. Ozturun, N. K., Citipitioglu, E., and Akkas, N., "Three-dimensional finite element analysis of shear wall buildings", *Computers and Structures*, Vol. 68, 1998, pp.41~55
4. Wilson E. L. and Habibullah A. *ETABS-Three Dimensional Analysis of Building Systems Users Manual*, Computers & Structures Inc., Berkeley, California, 1995
5. Lee, D. G., and Kim., H., S., "The effect of the floor slabs on the seismic response of multi-story building structures," *Proceeding of APSEC2000*, 2000
6. Lee, D. G., and Kim., H., S., "An efficient model for seismic analysis of high-rise building structures with the effects of floor slabs," *Proceeding of SEEBUS2000*, 2000
7. Petersson, H., Popov, EP., "Substructuring and equation system solutions in finite element analysis", *Computers and Structures*, Vol. 7, 1977, pp.197~206
8. Timoshenko, S. P., Weaver, W., Jr., Young, D. H., *Vibration Problem in Engineering*, John Wiley & Sons, Fifth Edition, 1990
9. Weaver, W., Jr., Johnson, Paul R., *Structural Dynamics by Finite Elements*, Prentice Hall, 1987
10. Anil K. Chopra, *Dynamics of Structures Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice Hall, 1995
11. Weaver, W., Jr., Gere, James M., *Matrix Analysis of Framed Structures*, Van Nostrand Reinhold, Third Edition, 1990
12. Clough, R. W. and Penzien, J., *Dynamics of Structures*, McGraw-Hill, Second Edition, 1993