

# 여러 Wing들로 구성된 3차원 구조물의 효율적인 해석모델

## Efficient Analysis Models for a Three-Dimensional Multistory Structure with Wings

문성권\* · 이동근\*\*

Moon, Seong Kwon · Lee, Dong Guen

### Abstract

Three-dimensional analyses of multistory structures with wings using finite element models require tedious input data preparation, longer computation time, and larger computer memory. So this study lays emphasis on the development of efficient analysis models for a three-dimensional multistory structure with wings, including in-plane deformation of floor slabs. Since a three-dimensional multistory structure with wings is regarded as a combination of wing structures and their junction in this study, the proposed analysis models are easily applicable to multistory structures with plans in the shape of letters Y, U, H, etc. Dynamic analyses results obtained using proposed models are in excellent agreement to those acquired using three-dimensional finite element models in terms of natural vibration periods, mode shapes and displacement time history.

### 要 旨

3차원 유한요소 모델을 사용하여 여러 wing들로 구성된 3차원 다층 구조물의 해석을 수행할 경우에는 입력자료 작성시 번거로움과 긴 해석시간 및 큰 용량의 컴퓨터가 필요하게 된다. 본 연구에서는 이런 문제점을 효율적으로 극복할 수 있는 여러 wing들로 구성된 3차원 구조물에 대한 해석모델들을 제안하였으며 이들 해석모델에는 3차원 다층 구조물에서 계산의 간편성 때문에 통상 무시되어 온 바닥 슬라브의 면내변형이 고려되어져 있다. 본 연구에서 제안하는 해석모델에서는 여러 wing들로 구성된 3차원 구조물을 하나의 구조물로 취급하는 종래의 방법 대신에 각 wing 구조물들과 이들 wing 구조물을 서로 연결시켜주는 연결부로 이상화하기 때문에 다양한 형태(Y, U, H 등)의 구조물에도 쉽게 적용할 수 있다. 제안된 해석모델의 정확성은 두가지 구조방식의 예제 구조물에 대하여 3차원 유한 요소 모델과 제안된 해석모델로부터 구한 해석결과(구조물의 고유 진동주기, 모드형상, 임의 절점에서의 변위에 대한 시간이력)의 비교로부터 검증되었으며 그 결과 제안된 해석모델은 여러 wing들로 구성된 3차원 구조물에 대한 근사적인 모델로 적합함을 알 수 있었다.

\* 정회원 · 산업과학기술연구소 강건재 연구실 주임연구원

\*\* 정회원 · 한국과학기술원 토목공학과 부교수

## 1. 序 論

일반적으로 바닥슬라브의 면내 변형이 고려된 다층 구조물의 정확한 거동을 알기 위해서는 3차원 유한 요소 방법을 사용하는 것이 바람직하다. 그러나 이 해석방법은 해석에 사용된 요소들의 형상 함수의 차수와 체눈(mesh)의 정도에 따라 해석결과의 정확도가 결정되는 근사적인 방법으로서 보다 정확한 구조물의 거동을 알기 위해서는 더 많은 자유도가 필요하며 그에 따라 데이터 작성시 번거로움과 해석에 소요되는 시간 및 컴퓨터 용량의 증가가 뒤따르게 된다.

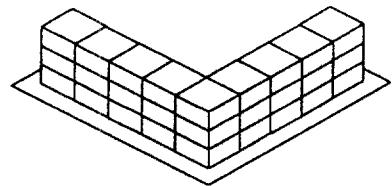
3차원 유한요소 방법의 이러한 단점을 보완하기 위해서 해석 결과의 정확도는 다소 떨어지더라도 보다 효율적으로 구조물의 해석을 수행할 목적으로 구조물의 거동에 대해 가정을 하게 되는데 3차원 다층 구조물의 경우에 강막 가정(rigid diaphragm assumption)이 그 좋은 예이다. 이 가정을 이용하면 층당 3개의 자유도(2개의 수평방향 변위, 수직축에 대한 면내회전)만으로 구조물의 거동을 나타낼 수 있으며 특히 동적해석의 경우에 많은 자유도수의 감소 효과로 해석에 소요되는 계산 시간을 크게 줄일 수 있다는 잇점이 있다. 이와 같은 이유로 다층 구조물의 정적 및 동적 해석을 효율적으로 수행하는 해석 프로그램<sup>(1)</sup>은 현재 이 가정을 사용하고 있으며 별다른 주의없이 다양한 형태의 다층 구조물들에 적용되고 있다.

그러나 과거의 지진 경험들<sup>(2,3)</sup>과 동적실험<sup>(4)</sup>을 통해서 알려진 바와 같이 바닥슬라브의 종횡비가 큰 구조물이나 횡방향 프레임들간의 강성의 차이가 심하게 나타나는 구조물 그리고 여러개의 wing들로 구성된 구조물의 경우에 강막가정 하에서 고려되지 못한 바닥슬라브의 면내변형으로 말미암아 강막가정으로부터 구한 구조물의 거동과는 전혀 다른 거동이 나타남을 알 수 있다. 일자형 평면을 가지는 구조물의 동적거동에 미치는 바닥슬라브의 면내변형 효과는 이전의 많은 연구를 통해 널리 알려져 있으나 여러개의 wing들로 구성된 구조물에 대한 연구<sup>(5)</sup>는 미진한 편으로 이들 구조물의 동적거동 특성을 보다 쉽게 파악할 수 있는 효율적인 해석모델들이 현재 개발중이다. 여러 wing들로 구성된 구조물에 대한 해석은 바닥슬라브의 면내 변형이 고려된 해석 프

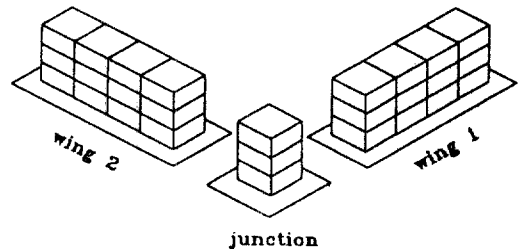
로그램 COMBAT<sup>(6)</sup>에 의해 수행되어질 수 있으나 이 경우 각 wing을 서로 연결시켜주는 연결부 바닥슬라브의 면내변형이 제대로 모형화되지 않고 S. K. Jain과 U.K. Mandal<sup>(5)</sup>에 의해 제시된 해석모델은 일정한 간격을 가진 동일 프레임들과 바닥슬라브들로 이루어진 구조물에만 적용이 가능하다는 문제점을 가지고 있다. 그래서 본 연구에서는 이전 해석 모델들의 단점을 보완하여 보다 효율적으로 바닥슬라브의 면내변형을 고려할 수 있는 해석모델을 제안하고자 한다. 제안한 해석모델의 정확성을 검증하기 위해 두 가지 구조방식의 예제 구조물을 사용하여 3차원 유한요소 모델로부터 구한 해석결과중 구조물의 주기와 모드형상 및 임의 절점에서의 변위에 대한 시간이력 등을 비교하였다.

## 2. 해석 모델

여러 wing들로 구성된 구조물에 대한 효율적인 해석 모델을 개발하기 위해서 본 연구에서는 그림 1과 같이 두개의 wing으로 구성된 3차원 구조물을 각 wing 구조물들과 이들 wing 구조물들을 서로 연결시켜주는 연결부의 조합으로 이상화 하였다. 또한 각 wing 구조물은 바닥슬라브의 면내변형을



(a) 두개의 wing으로 구성된 3차원 구조물



(b) 각 wing들과 이들의 연결부

그림 1. 여러 wing들로 구성된 3차원 구조물의 이상화.

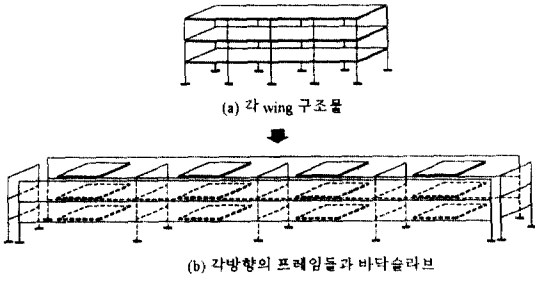


그림 2. 각 wing구조물의 이상화.

효과적으로 고려하기 위하여 그림 2와 같이 일련의 바닥슬라브들과 각 방향(횡방향, 종방향)의 횡하중 저항요소(프레임)들의 조합으로 간주하였다. 결국 본 연구에서는 여러 wing들로 구성된 3차원 구조물을 바닥슬라브들과 각 방향의 이차원 프레임들 및 각각의 wing을 서로 연결시켜주는 연결부의 조합으로 이상화하였다. 이러한 모형화 개념은 다양한 형태의 wing들로 구성된 구조물(U, T, Y 등)에도 쉽게 적용될 수 있다는 큰 잇점이 있다. 해석모델에 사용된 가정들과 이상화된 3차원 구조물을 구성하는 각 요소들에 대한 모형화를 살펴보면 다음과 같다.

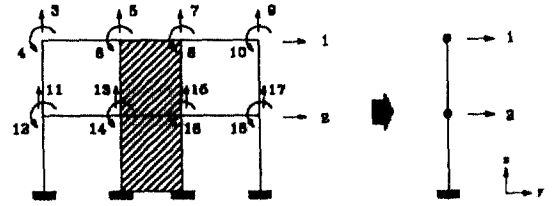
### 2.1 해석모델에 사용된 가정들

바닥슬라브의 면내변형을 고려할 수 있는 해석모델을 작성하기 위해서 다음과 같은 사항들을 가정하였다.

- 1) 구조물은 선형, 탄성거동을 한다.
- 2) 횡력은 각 층에서 작용한다.
- 3) 구조물의 질량은 각 층에 집중된다.
- 4) 바닥슬라브의 면내 변형과 면외 변형은 서로 독립적이다.
- 5) 각 wing 구조물에서 바닥슬라브의 횡방향 면내변형만이 고려된다.
- 6) 각 프레임에서 보의 축방향 변형과 기둥의 비틀림 효과는 무시한다.
- 7) 구조물은 강제인 지반에 고정되어 있다. 즉 구조물과 지반과의 상호작용은 고려하지 않는다.

### 2.2 각 wing 구조물의 모형화

각 wing 구조물은 그림 2.b에서 보는 바와 같이 바닥슬라브와 횡방향 및 종방향 이차원 프레임들로 구성되며 각층에서의 바닥슬라브의 면내변형을 고



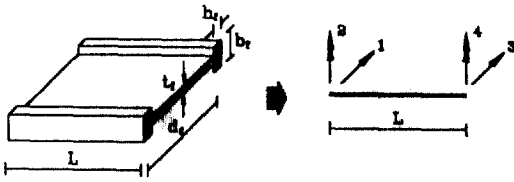
(a) 전형적인 이차원 프레임 (b) 막대 모델

그림 3. 이차원 프레임의 모형화.

려하기 위해서는 각각의 횡방향 프레임의 위치에서 총당 2개의 자유도(횡방향 변위와 면내회전)가 필요하게 된다. 여기서 횡방향 변위와 관련된 강성은 해당 횡방향 이차원 프레임과 바닥슬라브의 면내강성과 관련이 있고 바닥슬라브의 면내 변형 때문에 발생하는 횡방향 프레임의 비틀림 현상은 바닥슬라브의 면내회전으로 나타난다. 횡방향 프레임의 위치에서 총당 두개의 자유도를 가지는 각wing 구조물의 해석모델을 작성하기 위해서 본 연구에서는 프레임과 바닥슬라브를 아래와 같이 모형화하였다.

#### 2.2.1 프레임의 모형화

앞서 언급한 해석모델의 여섯번째 가정에 따라 그림 3.a와 같은 전형적인 이차원 프레임은 총당 1개의 자유도(횡방향 변위)와 절점당 2개의 자유도(수직 변위, 회전)를 가지며 횡방향 강성을 증가시키기 위해 사용되는 각층의 전단벽요소는 연결되는 보 및 기둥과의 변위 적합조건을 만족시켜주는 절점당 1개의 회전 자유도가 추가된 4-절점 10-자유도 평면요소로 모형화<sup>7)</sup>하였다. 고려된 자유도중 바닥슬라브의 면내 변형과 직접적으로 관련된 횡방향 변위만을 가지는 이차원 프레임에 관한 해석모델을 작성하기 위해 그림 3.b와 같이 총당 1개의 횡방향 변위를 가지는 막대모델(stick model)을 도입한다. 일반적으로 막대 모델은 크게 두가지 방법으로 작성되어지는데 그 첫번째 방법은 rigid girder assumption에 근거를 둔 shear building model을 이용하는 것으로서 해석 절차상의 간편성 때문에 저층 구조물의 근사적인 해석에 널리 사용되고 있다. 그러나 보의 휨변형과 기둥의 축방향 변형이 고려되지 않기 때문에 이 모델을 이용하면 구조물의 실제 주기값보다 짧은 주기값이 나타나는 경향이 있으며 특히



(a) 바닥슬라브 (b) stiff beam 모델

그림 4. 바닥슬라브의 모형화.

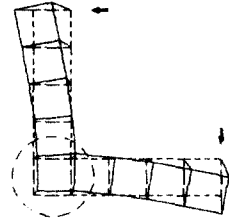


그림 5. 연결부 바닥슬라브의 변형.

기둥의 축방향 변형이 크게 작용하는 고층 구조물에 대한 동적해석으로는 부적합한 것으로 알려져 있다. ⑥ 두번째 방법은 정적 응축 기법(static condensation technique)을 이용하는 것으로 횡방향 변위에 미치는 보의 휨변형과 기둥의 축방향 변형 효과가 고려되기 때문에 첫번째 방법보다 훨씬 정확한 구조물의 동적 거동을 구할 수 있다. ⑥ 이와 같은 이유로 본 연구에서는 정적 응축 기법을 이용하여 작성된 막대 모델을 이차원 프레임에 대한 해석모델로 선정하였다.

### 2.2.2 바닥슬라브의 모형화

일반적으로 바닥슬라브의 면내변형은 인근 프레임을 연결시켜주는 바닥슬라브를 하나의 평면응력 요소로 모형화함으로써 알 수 있다. 그러나 이 방법은 바닥슬라브의 면내 변형이 클것으로 예상되는 경우에 바닥슬라브의 정확한 면내 거동을 알기 위해서 바닥슬라브를 여러개의 평면응력 요소로 모형화해야 하는 문제점을 가진다. 효율적인 바닥슬라브의 모형화를 위해서 본 연구에서는 그림 4에서 보는 바와 같이 각 층에서 인근 프레임을 연결하는 바닥슬라브(edge beam을 포함함)를 전단변형이 고려된 stiff beam 요소로 모형화하였다. 여기서 전단 변형은 바닥슬라브의 종횡비가 작은 경우에 전단에 의한 바닥슬라브의 면내변형을 고려하기 위해 추가 되었다. 사용된 stiff beam 요소는 그림 4.b에서 보는 바와 같이 절점당 2개의 자유도(횡방향 변위, 면내 회전)를 가진다. Stiff beam 요소에 사용된 전단 면적( $A_s$ )은 다음의 식에 의해 결정되어진다.

$$A_s = \frac{A}{F} \quad (1)$$

식 (1)에서 A는 바닥슬라브의 단면적을 나타내며 인자  $F^{(10)}$ 는 단면의 높이에 따라 일정하지 않은 전단

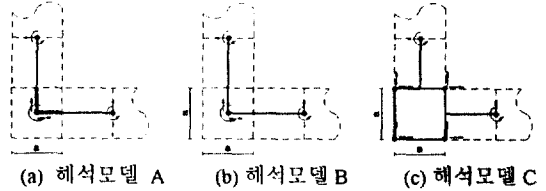


그림 6. 연결부 바닥슬라브의 모형화.

응력의 분포를 고려하기 위해서 사용되었다.

### 2.3 연결부에 대한 모형화

각 층에서 wing 구조물들은 연결부의 바닥슬라브에 의해서 서로 연결되기 때문에 연결부에 대한 모형화는 바로 연결부 바닥슬라브의 모형화를 의미한다. 이러한 연결부의 바닥슬라브는 통상 바닥슬라브의 면내변형을 무시하여 강체로서 모형화 되어진다. ⑥ 그러나 이러한 모형화 방법은 모형화를 간편하게 할 수는 있지만 연결부 바닥슬라브의 전단 변형을 고려하지 못한다. 즉, 그림 5에서 보는 바와 같이 양쪽 끝단 프레임에 횡력이 작용하면 각 wing의 바닥슬라브에는 면내변형이 발생하고 이로 인하여 연결부 바닥슬라브는 전단변형을 받게 된다. 연결부 바닥슬라브의 면내변형이 구조물의 거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 세가지 해석모델(모델 A, 모델 B, 모델 C)을 제안하였다. 여기서 해석모델 A는 연결부 바닥슬라브의 면내변형이 고려되지 않은 경우이며 해석모델 B와 C는 연결부 바닥슬라브의 면내변형이 고려된 경우를 나타낸다.

그림 6은 연결부 형태가 사각형을 이루는 L자형 wing 구조물의 연결부 및 인근 wing의 바닥슬라브에 대한 모형화를 나타낸다. 앞의 2.2.2절에서 언급된 바와 같이 인접한 횡방향 프레임을 연결시키는 바닥슬라브는 세가지 모델에 대해서 절점당 2개의 자유도를 가지는 stiff beam 요소로 동일하게 모형

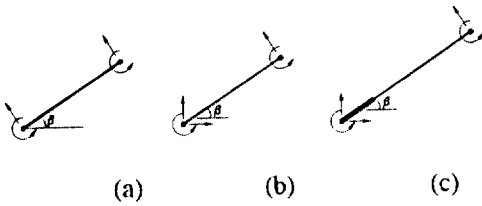


그림 8. 평면응력요소와 보요소와의 연결.

화된다. 연결부의 바닥슬라브의 모형을 살펴보면 해석모델 A의 경우에는 강체를 사용하였고 해석모델 B의 경우에는 wing의 바닥슬라브와 유사하게 stiff beam 요소를 사용하였으며 해석모델 C의 경우에는 한개의 평면응력 요소를 사용하여 모형화 하였다. 이때 해석모델 A, B의 경우에는 연결부 바닥슬라브의 중심에 한개의 절점이 설정되며 해석모델 C의 경우에는 연결부 바닥슬라브의 모서리에 절점이 설정된다.

이와 같은 연결부 바닥슬라브에 대한 모형을 작성하기 위해서는 5개의 자유도를 가지는 stiff beam 요소(그림 6.b 참조)와 한쪽 끝단에 강체를 가지는 stiff beam 요소(그림 6.a 참조) 및 평면응력 요소에 직접 연결이 가능한 stiff beam 요소(그림 6.c 참조)가 필요하게 된다. 이들 요소들에 대한 강성행렬은 아래와 같은 방법으로 구해진다.

### 2.3.1 5개의 자유도를 가지는 stiff beam 요소

앞의 2.2.2절에서 언급된 stiff beam 요소의 강성행렬을  $[k_r]$ 라고 하면 그림 7.b의 5개의 자유도를 가지는 stiff beam 요소는 그림 7.a에서 볼 수 있는 4개의 자유도를 가지는 stiff beam 요소로부터 구해지며 그 과정은 아래와 같다.

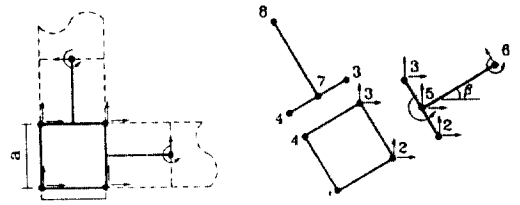
$$[k_b^*] = [T_b]^T [k_r] [T_b] \quad (2)$$

여기서  $[T_b]$ 는  $[4 \times 4]$  강성행렬을  $[5 \times 5]$  강성행렬로 변환하기 위하여 사용된 변환행렬로서 다음과 같다.

$$[T_b] = \begin{bmatrix} [T_b]_1 & [0] \\ [0] & [I] \end{bmatrix} \quad (3.a)$$

$$[T_b]_1 = \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta \\ -\sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (3.b)$$

식 (3.a)에서  $[I]$ 는  $[3 \times 3]$ 의 크기를 가지는 단위행렬을 의미하며 식 (3.b)의  $\beta$ 는 수평축과 보



(a) 연결부 바닥슬라브의 (b) 평면응력요소와 모형화 (해석모델 C) 인근 보요소들

그림 7. 해석모델에 사용된 여러 보요소들.

소가 이루는 각을 의미한다.

### 2.3.2 한쪽 끝단에 강체를 가지는 stiff beam 요소

그림 7.c와 같이 한쪽 끝에 강체를 가지는  $[5 \times 5]$  stiff beam 요소의 강성행렬  $[k_r]$ 는 그림 7.b의 stiff beam 요소로부터 구해지며 그 과정은 다음식과 같다.

$$[k_r] = [T_r]^T [k_b^*] [T_r] \quad (4)$$

여기서  $[T_r]$ 는  $[5 \times 5]$  보요소를 강체를 가진  $[5 \times 5]$  보요소로 변환하기 위하여 사용된 변환행렬로서 다음과 같다.

$$[T_r] = \begin{bmatrix} [T_r]_1 & [0] \\ [0] & [I] \end{bmatrix} \quad (5.a)$$

$$[T_r]_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -a \sin\beta & a \cos\beta & 1 \end{bmatrix} \quad (5.b)$$

식 (5.a)에서  $[I]$ 는  $[2 \times 2]$  크기를 가지는 단위행렬을 의미하며 식 (5.b)에서  $a$ 는 연결부 바닥슬라브의 폭을 의미한다.

### 2.3.3 평면응력요소에 직접 연결이 가능한 stiff beam 요소

그림 8.b에서 보는 바와 같이 각 wing의 바닥슬라브를 나타내는 stiff beam 요소를 평면응력 요소에 직접 연결시키는데에는 다음의 문제점이 발생한다. 즉 그림 8.b에서 stiff beam 요소의 절점번호 5는 평면응력 요소의 어떠한 절점과도 공유하지 않으며 또한 stiff beam 요소는 평면응력 요소에는 존재하지 않는 회전 자유도를 가진다. 이러한 문제점은 식 (6.a)에서의 변환행렬  $[T_b^*]$ 를 이용하여 절점번호 5와

6에 관한 stiff beam 요소의 강성행렬  $[k_b^*]$ 을 절점번호 2, 3, 6과 관련된 stiff beam 요소의 강성행렬로 변화시키면 해결된다.<sup>(11)</sup>

$$[k_b] = [T_b^*]^T [k_b^*] [T_b^*] \quad (6.a)$$

여기서

$$[T_b^*] = \begin{bmatrix} [T_b^*]_1 & [0] \\ [0] & [I] \end{bmatrix} \quad (6.b)$$

$$[T_b^*]_1 = \frac{1}{a} \begin{bmatrix} 0.5a & 0 & 0.5a & 0 \\ 0 & 0.5a & 0 & 0.5a \\ \cos\beta & \sin\beta & -\cos\beta & -\sin\beta \end{bmatrix} \quad (6.c)$$

식 (6.b)에서  $[I]$ 는  $[2 \times 2]$ 크기를 가지는 단위행렬을 의미하고 식 (6.c)에서  $a$ 는 stiff beam과 연결된 바닥슬라브의 폭을 나타낸다. 식 (6.a)의 변형된 stiff beam 요소의 강성행렬은  $[6 \times 6]$ 의 크기를 가지며 관련된 자유도는 다음과 같다.

$$\{\hat{d}_b\} = \{u_2 \ v_2 \ u_3 \ v_3 \ u_6 \ v_6\} \quad (7)$$

## 2.4 해석모델의 비교

그림 9는 L자형, 1층 구조물을 모형화한 것으로서 그림 9.a는 기존의 해석모델(COMBAT)에 의한 모형화를 그림 9.b-d는 본 연구에서 제안한 해석모델들에 의한 모형화를 나타내고 있다. 기존 해석모델에서는 주·종 절점(master, slave node) 개념을 이용하여 그림 9.a와 같이 3개의 주절점을 이용하여 바닥슬라브의 면내변형을 나타낸다. 각각의 주절점은 3개의 자유도를 가지며 이 자유도들은 층변환(floor transformation) 과정을 거쳐 종절점들에서의 6개 자유도중 관련된 3개의 자유도로부터 구해진다. 한편, 본 연구에서 제안한 해석모델을 살펴보면 절점들이 각 wing의 횡방향 프레임 위치와 연결부에 설정되고 특히 해석모델 C의 경우에는 연결부 모서리에 설정된다. 각 wing의 횡방향 프레임 위치에서의 절점은 2개의 자유도를 가지며 연결부의 절점에서는 해석모델 A, B의 경우에는 3개의 자유도를, 해석모델 C의 경우에는 절점당 2개의 자유도를 가진다. 그림 9에서 알 수 있듯이 제안한 해석모델의 자유도수가 기존의 해석모델보다 많으나 바닥슬라

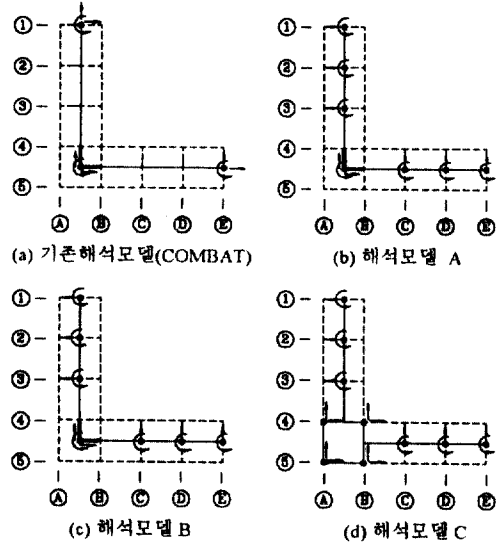


그림 9. 해석모델의 비교.

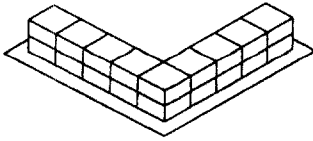
브의 면내변형이 크게 발생하는 경우에는 기존 해석모델의 경우 추가적인 주절점들이 필요하며 그 결과 제안된 해석모델에서 사용된 자유도수가 기존 해석모델보다 오히려 작아질 수도 있다.

## 2.5 강성행렬의 구성

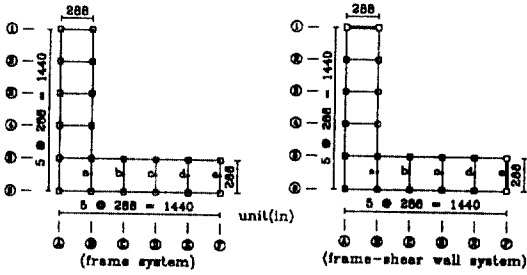
여러 wing들로 구성된 구조물은 앞서 언급된 바와 같이 크게 각 wing들과 이들 wing들을 서로 연결시켜주는 연결부로서 구성되며 각 wing들은 다시 각방향의 프레임들과 바닥슬라브들로 구성된다. 따라서 구조물의 강성행렬  $[K]$ 는 아래와 같이 네가지 행렬  $[K_w]$ ,  $[K_j]$ ,  $[K_{wj}]$ ,  $[K_{jw}]$ 로서 구성된다. 즉,

$$[K] = \begin{bmatrix} [K_w] & [K_{wj}] \\ [K_{jw}] & [K_j] \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기에서  $[K_w]$ 는 각 wing과 관련된 강성행렬을 의미하며 프레임 ③, ④, ⑤, ①, ②, ③의 강성행렬과 이들 프레임에 관련된 바닥슬라브의 강성행렬로부터 구해진다(그림 9.b-d 참조). 식 (8)에서  $[K_j]$ 는 연결부와 관련된 프레임들의 강성행렬을 의미하며 프레임 ①, ②, ④, ⑤의 강성행렬로부터 구해진다. 이때, 해석모델 A, B의 경우에는 이들 프레임의 강성이 연결부 중앙에 지정된 절점에 집중된다고 가정하였고 해석모델 C의 경우에는 연결부 모서리에 설정된 절점들에 동일하게 분포된다고 보았다. 또한 식 (8)



(a) 예제 구조물



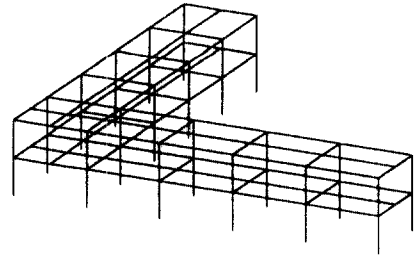
(b) 예제 구조물의 평면도

그림 10. 사용된 예제구조물과 평면도.

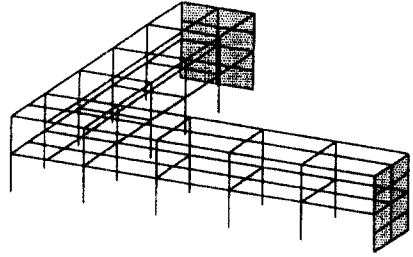
에서  $[K_w]$ 는 각 wing들을 서로 연결시켜주는 바닥슬라브의 강성을 의미하며 해석모델 B의 경우에는 stiff beam에 대한 강성이 사용되었으며 해석모델 C의 경우에는 4 절점 8 자유도를 가지는 평면응력 요소의 강성<sup>(12)</sup>이 사용되었다.

### 3. 수치 예제

제안한 해석모델들의 정확성과 효율성을 알아보기 위해서 그림 10.a와 같이 두개의 wing 구조물로 이루어진 2층 구조물을 예제 구조물로 사용하였으며 프레임들의 배치에 따른 바닥슬라브의 면내 거동을 알아보기 위해 두가지 구조방식(프레임 시스템, 프레임-전단벽 시스템)을 채택하였다. 그림 10.b에서 왼쪽 평면이 프레임 시스템을 오른쪽 평면이 프레임-전단벽 시스템을 나타낸다. 프레임-전단벽 시스템의 경우에는 프레임 시스템의 프레임 ①과 ②에 전단벽이 추가적으로 보강된 평면을 고려하였다. 예제 구조물에 사용된 단면은 보의 경우 12 in×18 in, 기둥의 경우 16 in×16 in 이며, 5 in 두께의 바닥슬라브와 6 in 두께의 전단벽이 사용되었다. 재료의 탄성계수는 3000 ksi이고 프와송비는 0.167로 가정하였다. 동적해석을 위해서 1940년도에 발생한 El-Centro 지진 기록중 남북 방향 성분을 사용하였으며 평면에 대해 45°경사진 방향으로 작용한다고



(a) 프레임 시스템



(b) 프레임-전단벽 시스템

그림 11. 해석에 사용된 3차원 유한요소 모델.

보았다. 사용된 구조물의 감쇠비는 5%로 일정하다고 가정하였다.

#### 3.1 3차원 유한요소 모델

제안한 해석모델들(모델 A, B, C)의 정확성을 검증하기 위해서 이들 해석모델들과 3차원 유한요소 모델로부터 구한 해석결과 중 구조물의 고유 진동 주기와 모드형상 및 임의의 절점에서의 변위에 대한 시간이력을 비교하였다. 3차원 유한요소 해석은 범용 구조해석 프로그램인 SAP-IV을 이용하여 수행하였다. 이용된 3차원 유한요소 모델에서 보와 기둥은 3차원 보요소로 전단벽과 바닥슬라브는 널리 사용되고 있는 평면응력 요소(4절점, 8자유도)로 모형화하였다. 여기서 바닥슬라브를 평면응력 요소로 모형화한 이유는 본 연구의 주된 관심이 바닥슬라브의 면내 거동을 알아보는 데 있기 때문이다. 보다 정확한 연결부 바닥슬라브의 면내 변형을 알아보기 위해서 두가지 구조방식에 대해 그림 11과 같이 연결부 바닥슬라브를 4개의 평면응력 요소로 세분화하여 해석을 수행하였다.

#### 3.2 해석결과 분석

표 1. 예제 구조물에 사용된 절점수와 요소수 및 자유도수의 비교

| 구조물  | 프레임 시스템 |      |      |      | 프레임-전단벽 시스템 |      |      |      |
|------|---------|------|------|------|-------------|------|------|------|
|      | 3-D     | 모델 A | 모델 B | 모델 C | 3-D         | 모델 A | 모델 B | 모델 C |
| 절점수  | 103     | 18   | 18   | 24   | 117         | 18   | 18   | 24   |
| 요소수  | 160     | 34   | 34   | 42   | 184         | 34   | 34   | 42   |
| 자유도수 | 508     | 38   | 38   | 48   | 522         | 38   | 38   | 48   |

3-D: 3차원 유한요소 모델, 모델 A,B,C: 제안된 해석모델

표 2. 제안된 해석모델들과 3차원 유한요소 모델에서 구한 구조물의 고유진동 주기값의 비교 (sec)

| 모드 | 프레임 시스템 |       |       |       | 프레임-전단벽 시스템 |       |       |       |
|----|---------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|
|    | 3-D     | 모델 A  | 모델 B  | 모델 C  | 3-D         | 모델 A  | 모델 B  | 모델 C  |
| 1  | 0.489   | 0.489 | 0.499 | 0.489 | 0.490       | 0.490 | 0.505 | 0.490 |
| 2  | 0.488   | 0.488 | 0.498 | 0.488 | 0.406       | 0.397 | 0.428 | 0.413 |
| 3  | 0.469   | 0.469 | 0.475 | 0.470 | 0.153       | 0.153 | 0.157 | 0.153 |
| 4  | 0.217   | 0.197 | 0.233 | 0.222 | 0.149       | 0.149 | 0.154 | 0.150 |

3-D: 3차원 유한요소 모델, 모델 A,B,C: 제안된 해석모델

표 3. 15개의 저차 진동 모드를 고려했을 때 소요된 수행시간의 비교 (sec)

| 해석모델        | 3-D    | 모델 A  | 모델 B  | 모델 C  |
|-------------|--------|-------|-------|-------|
| 프레임 시스템     | 420.90 | 23.56 | 23.60 | 31.63 |
| 프레임-전단벽 시스템 | 431.07 | 24.17 | 24.20 | 32.41 |

3-D: 3차원 유한요소 모델, 모델 A,B,C: 제안된 해석모델

제안된 해석모델들과 3차원 유한요소 모델에서 사용된 절점수, 요소수 및 총자유도수가 표 1에, 구조물의 고유 진동 주기값이 표 2에, 개인용 컴퓨터에서 15개의 저차 진동 모드를 고려했을 때 소요된 수행시간이 표 3에 각각 비교되어져 있다. 표 2의 고유 진동 주기와 관련된 모드형상에 관한 비교는 그림 12와 그림 13에 나타나 있으며 그림 12와 13에서의 모드형상은 구조물의 상부에서 본 바닥슬라

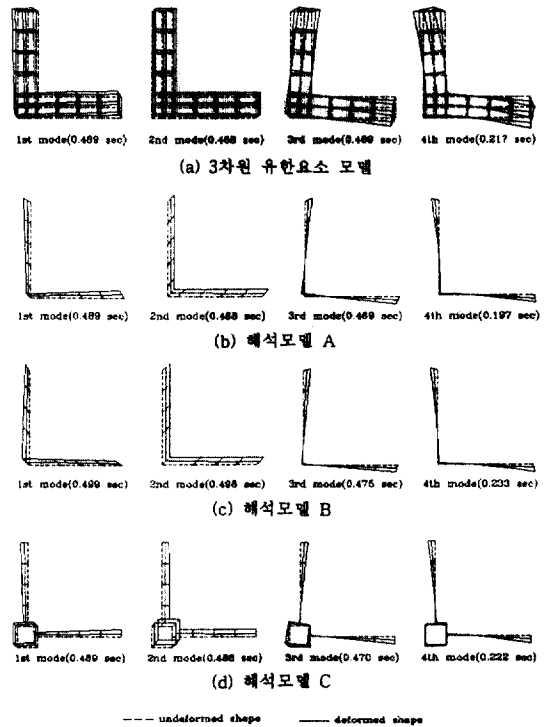


그림 12. 제안된 해석모델들과 3차원 유한요소 모델의 모드형상 비교(프레임 시스템).

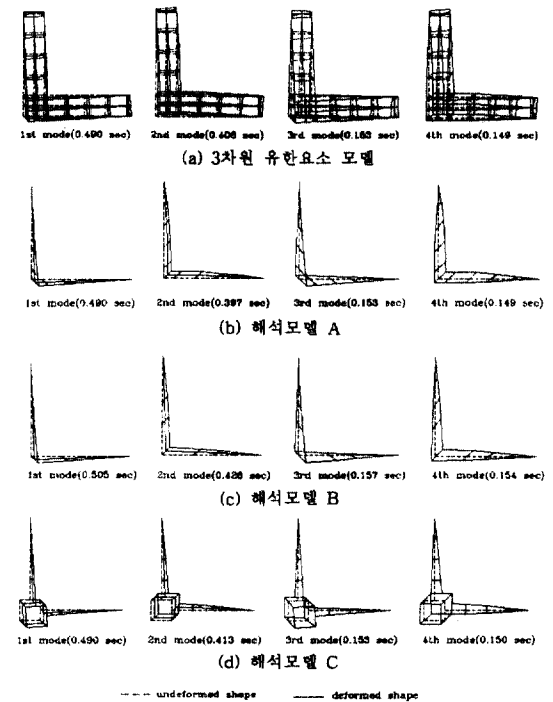
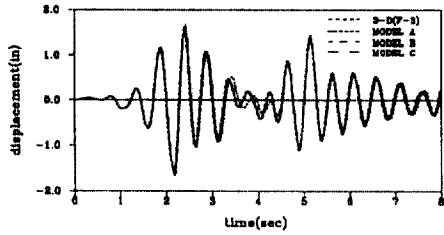
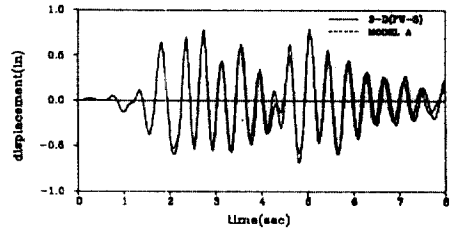


그림 13. 제안된 해석모델들과 3차원 유한요소 모델의 모드형상 비교(프레임-전단벽 시스템).

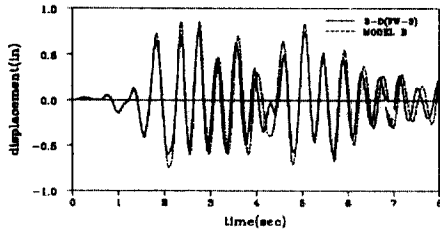




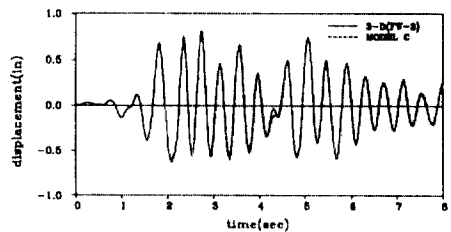
(a) 프레임 시스템



(b) 프레임-전단벽 시스템



(c) 프레임-전단벽 시스템



(d) 프레임-전단벽 시스템

그림 14. 변위에 대한 시간이력의 비교(3차원 유한요소모델과 제안된 해석모델).

브의 변형을 나타내고 있다. 그림 14는 임의의 절점에서의 변위에 대한 시간이력을 나타내는데 그림 14.a는 프레임 시스템의 e점에서의 변위에 대한 시간이력을 나타내고 그림 14.b-d는 프레임-전단벽 시스템의 b점에서의 변위에 대한 시간이력을 나타낸다(그림 10.b 참조).

표 1과 표 3의 총 자유도수와 수행시간의 비교로부터 제안된 해석모델의 효율성을 확인할 수 있으며 이러한 효율성은 프레임수와 층수가 증가할수록 더 크게 나타난다. 표 2에서 알 수 있듯이 제안된 해석모델들(모델 A, B, C)은 전반적으로 3차원 유한요소 모델에서 구한 구조물의 고유진동 주기값과 잘 일치하지만 해석모델 B로부터 구한 구조물의 고유진동 주기값들이 다소 크게 나타나는데 이는 해석모델 B의 경우 연결부 바닥슬라브를 stiff beam 요소로 모형화했기 때문인 것으로 판단된다. 그림 12.a의 네번째 모드와 그림 13.a의 두번째 모드는 연결부 바닥슬라브의 면내변형을 나타내고 있는데 이들 모드에 대한 해석모델 A와 C로부터 구한 구조물 고유 진동 주기값의 비교로부터 연결부 바닥슬라브의 면내변형의 무시는 구조물의 고유진동 주기값을 다소 적게 평가하는 결과를 가져옴을 알 수 있다. 그림 14는 위의 현상들이 구조물의 거동(변위)에 미치는 영향을 나타내는데 횡방향 프레임

들간의 강성의 차이가 심하지 않은 프레임 시스템의 경우에는 변위에 대한 시간이력의 차가 심하지 않은데 반해 횡방향 프레임들간의 강성의 차가 심한 프레임-전단벽 시스템의 경우에는 연결부 바닥슬라브의 면내변형이 구조물의 거동에 다소 영향을 미침을 알 수 있으며 이런 현상의 정도의 차이는 고려되는 구조물의 횡방향 프레임들간의 강성의 차이에 따라 좌우된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 여러 wing들로 구성된 3차원 구조물에 대한 바닥슬라브의 면내변형을 효율적으로 고려할 수 있는 해석모델들이 제안되었으며 제안된 해석모델의 정확성은 두 가지 구조방식의 예제 구조물에 대하여 3차원 유한요소 모델과 제안된 해석모델로부터 구한 해석결과(구조물의 고유 진동주기, 모드형상, 변위에 대한 시간이력)의 비교로부터 검증되었다. 수행된 예제 구조물의 해석결과로부터 다음과 같은 결론을 이끌어낼 수 있었다.

1) 제안된 해석모델들은 여러 wing들로 구성된 3차원 구조물을 바닥슬라브들과 각방향의 프레임들 및 각 wing들을 서로 연결시켜 주는 연결부의 조합으로 이상화할 수 있기 때문에 다양한 형태의

wing 구조물들(U, T, V 등)에도 적용이 가능하다.

2) 제안된 해석모델들(해석모델 A, B, C)은 wing들로 구성된 3차원 구조물에 대한 근사적인 해석모델로 적합하며 특히 연결부 바닥슬라브의 전단변형이 중요한 구조물의 경우에는 해석모델 C가 가장 적합하다.

3) 횡방향 프레임들간의 강성의 차가 심한 프레임-전단벽 시스템을 가지는 wing 구조물의 경우에 연결부 바닥슬라브의 면내변형은 구조물의 거동에 큰 영향을 줄 수도 있다.

### 参考文献

1. E.L. Wilson, J.P. Hollings and H.H. Dovey., "Three-dimesional Analysis of Building System (extended version)-ETABS", *EERC 75-13*, University of California, Berkeley, April, 1975.
2. Turpen, C.D., "Strong-Motion Records from the Mammoth Lakes, California, Earthquakes of May, 1980", Preliminary Report, California Division of Mines and Geology, 1980.
3. Mehmet, Celebi, Giovanni Bongiovanni, Erdal Safak and Brady, A.G., "Seismic Response of a Large-Span Roof Diaphragm", *Earthquake Spectra*, Vol. 5, No. 2, pp. 337-350, 1989.
4. Fukuzo Suto and Shynichi Asayama, "Experimental Consideration on Earthquake Behaviors of

a Large Long Strip-Type of Actual Structure", *Proc. 9th WCEE*, pp. 503-508, Japan, 1988.

5. Jain, S.K and Mandal, U.K., "Dynamics of Buildings with V-shaped Plan", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 118, No. 6., pp. 1093-1112, 1992.
6. "COMBAT-Comprehensive Building Analysis Tool", Computech Engineering Services, Inc., Berkeley, California, 1983.
7. 문성권, 이동근, "A Study on an Efficient Analytical Model for a Multistory Building Structure with Real In-plane Stiffness of Floor Slabs", *대한건축학회 논문집*, 제 8권, 제 1호, 1992.
8. Weaver, W.Jr., Nelson, M.F., and Manning, T.A., "Dynamics of Tier Building", *ASCE J. Mech. Div.*, Vol 94, No. EM6, 1968.
9. Weaver, W.Jr and Johnston, P.R., "Structural Dynamics by Finite Elements", Prentice-Hall, Inc., 1987.
10. Cowper. G.R., "The Shear Coefficient in Timoshenko's Beam Theory", *Journal of Applied Mechanics*, July, 1966.
11. Cook, R.D., Malkus, D.S and Plesha, M.E., "Concepts and Applications of Finite Element Analysis", Third edition, John Wiley and Sons, Inc., 1989.
12. Prezemieniecki, J.S., "Theory of Matrix Structural Analysis", McGraw-Hill, 1968.

(接受 : 1993. 11. 9)