

# 3차원 골조구조물의 효율적인 연직진동해석

## Efficient Analysis Models for Vertical Vibration of Space Framed Structures

안 상 경\*  
Ahn, Sang-Kyoung

홍 성 일\*\*  
Hong, Sung-Il

이 동 근\*\*\*  
Lee, Dong-Guen

---

### Abstract

The effect of vertical vibration of a beam is significantly influenced by higher modes of vibration. Therefore, a beam can be modeled using several elements must be used to represent a vibrating beam. As a result, analysis of a space framed structure for vertical vibration requires increase number of elements leading to more complicated model with many degree of freedom which requires large amount of computing resources for dynamic analysis.

An efficient analysis method for vertical vibration of space framed structures are proposed in this paper which is presented in three method. The first method is to determine minimum nodes that shall be used to obtain dynamic response with the vertical vibration. Secondly, matrix condensation methods are introduced to reduce the computation efforts used to perform dynamic analysis and the selection of primary degree-of-freedom is proposed. The third method is of using the mass participation factor for the selection of primary degree-of-freedom.

---

### 1. 서론

일반적인 3차원 입체골조에 대한 해석의 경우 2차원 골조의 해석과는 달리 큰보와 작은 보가 접합되어 있으므로 2차원적 해석만으로는 만족할만한 결과를 얻을 수 없다. 이런 경우 3차원 해석모델은 2차원에 비하여 많은 자유도와 오랜 계산시간을 요하므로 보다 경제적인 해석기법 및 모델링기법이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 열차하중에 의해 발생하는 역사구조물의 연직진동해석시, 절점을 적게 사용하면서 연직진동을 효과적을 고려할 수 있는 요소분할법을 이용한 효율적인 3차원 모델링기법과 경제적인 해석기법 개발을 위하여 자유도수를 줄일 수 있는 행렬응축기법인 Guyan의 정적 및 동적응축기법을 도입하였으며, 이에 적합한 주자유도(primary degree-of-freedom)선택을 위하여, 질량참여율(mass participation ratio) 및 모드형상과 고유진동수를 이용하였다.

### 2. 구조물의 진동해석모델과 진동해석

구조물에서 각 자유도방향의 관성력을 표현하기 위해서는 질량과 가속도가 필요하다. 일반적으로 질량의 경우 lumped mass와 consistent mass를 사용하는데, consistent mass의 경우에

---

\* 성균관대학교 건축공학과, 박사과정

\*\* 성균관대학교 건축공학과, 석사과정

\*\*\* 성균관대학교 건축공학과, 교수

는 구조물의 각 자유도의 방향에 대한 질량의 크기를 계산하는데 있어서 형상함수를 사용하여 적분함으로써 구해지기 때문에 비교적 정확하지만 계산이 복잡하고 lumped mass에 비하여 메모리를 차지하는 단점이 있다. 반면, lumped mass의 경우는 각 자유도 방향에 대한 질량을 모두 절점에 위치시키므로, 계산이 간편하고 메모리를 적게 차지하는 장점이 있어 일반적으로 많이 사용하지만 회전방향 자유도에 대한 질량의 크기를 정하는데 있어 다소 오차가 발생하는 단점이 있다. 따라서 보다 정확한 해석을 위해서 본연구에서는 consistent mass를 사용하였다.

## 2.1 구조요소분할에 따른 진동수

보요소분할에 따른 구조물의 연직진동에 대한 정확도를 알아 보기 위하여 그림 2.3과 같이 4개의 모델을 비교하여 보았다. 그림 2.1-(d)는 보요소를 8개로 나누어서 비교적 정확한 값이라고 보고 이것을 기준으로 하여 다른 모델과 비교하였다.

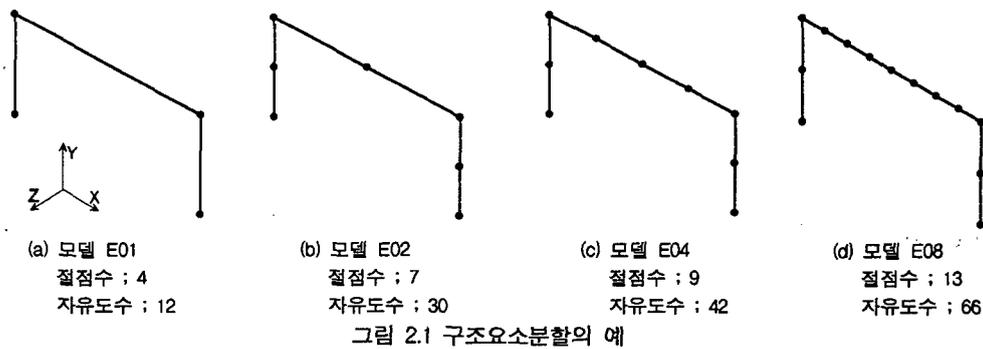
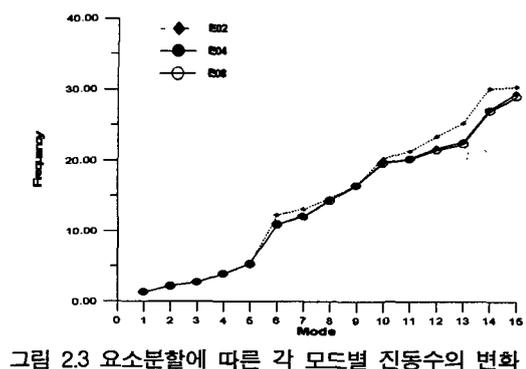
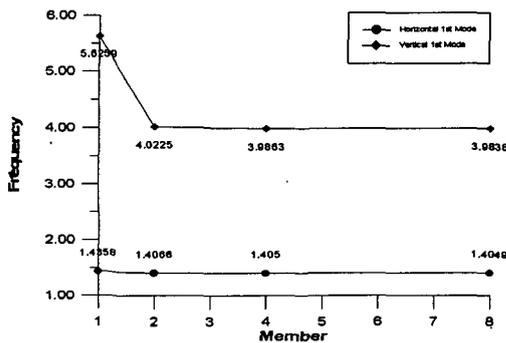


그림 2.2는 요소분할에 따른 수평 1차모드와 연직 1차모드의 진동수의 변화를 나타낸 것이다. 수평 1차모드는 구조요소의 분할정도에 관계없이 거의 일정한 값에 수렴하고 있으며, 연직 1차모드는 2개 이상의 요소로 분할하게 되면 일정한 값에 수렴함을 알 수 있다. 일반적으로 구조물의 진동해석에 쓰이는 모드추적법을 사용할 경우 몇 개의 저차 모드를 가지고 수행한다. 지진과 같이 수평진동의 경우에는 그림 2.2와 같이 수평 1차모드의 값이 보요소의 분할과 관계없이 거의 일정한 값에 수렴하기 때문에 보요소를 분할하지 않아도 비교적 정확한 값에 가까운 결과를 얻을 수 있지만, 연직진동의 경우에는 고차모드가 많은 영향을 미치므로 보요소분할을 적정치 이상으로 하지 않을 경우 그림 2.2와 같이 연직 1차모드의 진동수가 매우 다르게 되기 때문에 좋지 못한 결과를 가져오게 된다. 따라서 구조물의 연직방향 진동을 알기 위해서는 최



소한 2개 이상의 요소로 분할하여야 함을 알 수 있다. 그림 2.3은 구조요소 분할에 따른, 각 모드별 진동수를 비교한 것이다. 여기서 보요소를 2개로 분할한 모델 E02의 경우는 4개, 8개로 분

할한 모델 E04 및 E08과 저차모드에서는 거의 일치하지만, 고차모드로 갈수록 다소 차이가 나고 있다. 이것은 열차운행에 의해 구조물에 가해지는 하중의 진동수가 구조물의 저차모드의 고유진동수와 일치할 경우에는 위의 3가지 모델 중 어느 것을 사용하든지 비슷한 결과를 가져다 주지만, 하중의 진동수가 22.5Hz 정도로 모델 E08의 13차모드의 진동수와 같아지게 되면, 모델 E02의 경우에는 모델 E04, E08과 많은 차이가 나게 됨을 의미한다. 위의 예제구조물에서와 같이 보요소를 4개 이상으로 분할하게 되면 고차모드에 대한 것도 비교적 정확한 값을 얻을 수 있게 된다. 결과를 확인하기 위하여 다음과 같이 예제 구조물을 이용하여 해석해 보았다. 4Hz의 진동하중과 22.5Hz인 진동하중을 가속도 크기의 변화로 구조물에 가했다.

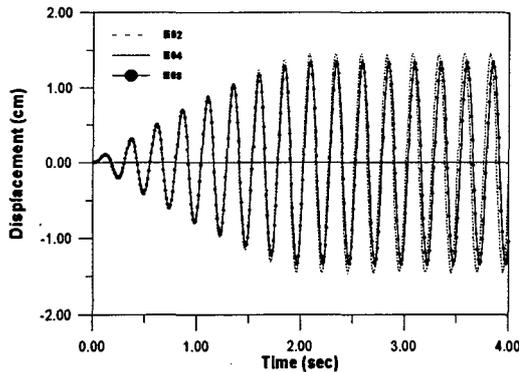


그림 2.4 진동수 4Hz 하중에 대한 보 중앙점에서의 연직변위

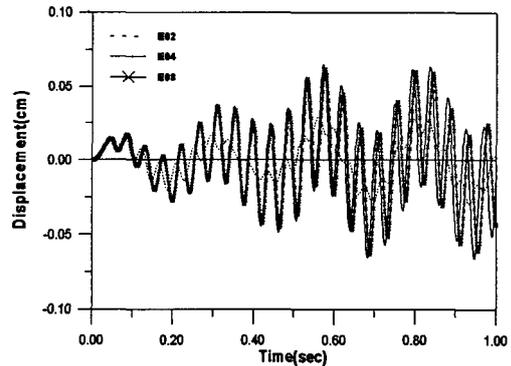


그림 2.5 진동수 22.5Hz 하중에 대한 보 중앙점에서의 연직변위

그림 2.4는 보 중앙에서의 시간에 따른 연직변위를 나타내는 시간이력곡선이다. 앞의 3가지 모델의 경우 앞서 살펴보았던 것과 같이 거의 비슷한 결과를 얻을 수 있었는데, 다소의 차이를 보이는 것은 고차진동모드중 질량참여계수가 큰 모드에서의 진동수 오차로 비롯된 차이지만, 가해지는 하중의 진동수와 다르기 때문에 지배적인 영향을 미치지 않았기 때문이다. 그림 2.5은 약 22.5Hz 정도의 진동수를 가진 입력하중이 구조물에 작용하였을 때 연직변위를 나타내는 시간-변위 이력곡선이다. 이 하중상태는 구조물의 연직3차모드에 해당하는 고유진동수와 비슷한 값이다. 이와 같은 경우, 모델 E02의 경우는 다른 두 모델에 비하여 큰 차이를 나타내었는데 이것은 연직방향에 큰영향을 미치는 연직모드의 고유진동수의 차이로 인하여 생긴 것이다.

## 2.2 질량참여계수

구조물에 열차운행에 의한 연직진동  $x_g(t)$ 만의 영향을 고려할 때, 구조물의 진동에 관한 운동방정식은 아래와 같다.

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = 0 \quad (2-1)$$

여기서  $\ddot{X}^t$ 는 연직진동의 영향을 포함한 구조물의 절대가속도로 아래 같다.

$$\ddot{X}^t(t) = \ddot{X}(t) + I\ddot{x}_g(t) \quad (2-2)$$

식(2-1)에서 연직진동의 가속도에 관련된 항을 우변으로 이항하면, 아래와 같다.

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = -MI\ddot{x}_g(t) \quad (2-3)$$

다자유도계에 대한 식(2-3)의 해를 효율적으로 구하기 위하여, 모드중첩법을 사용하면,

$$X(t) = \Phi q(t) \quad (2-4)$$

이고, 여기에서  $\Phi$ 는 자유진동해석으로 구한 자유진동모드벡터로 구성된 상수행렬이며,  $q(t)$ 는 일반모드좌표계로서 미지의 함수이다. 식(2-4)를 식(2-3)에 대입하고, 양변에  $\Phi^T$ 를 선승하

면, 자유진동모드의 질량행렬과 강성행렬에 대한 직교성(orthogonality) 때문에 아래와 같이 각 모드좌표계에 대하여 비연계된(uncoupled)방정식을 얻을 수 있다.

$$\mu_i \ddot{q}_i(t) + 2\xi_i \mu_i \omega_i \dot{q}_i(t) + \mu_i \omega_i^2 q_i(t) = -\mathcal{L}_i \ddot{x}_g(t) \quad (2-5)$$

여기서  $\mu_i = \phi_i^T M \phi_i$ ,  $2\xi_i \mu_i \omega_i = \phi_i^T C \phi_i$ ,  $\mu_i \omega_i^2 = \phi_i^T K \phi_i$ ,  $\mathcal{L}_i = \phi_i^T M \mathbf{I}$

또한  $\phi_i$ 는  $i$ 번째 자유진동모드이며,  $\mu_i$ ,  $2\xi_i \mu_i \omega_i$ 와  $\mu_i \omega_i^2$ 은  $i$ 번째 모드에 대한 일반질량, 일반감쇠, 일반강성계수라 하며,  $\mathcal{L}_i$ 를 모드입력계수 혹은 모드참여계수(modal participation factor)라 부른다. 위의 첫번째식은  $i$ 번째 일반모드좌표  $q_i(t)$ 만에 대한 운동방정식이므로, 수치해석법을 이용하여 쉽게 해를 구할 수 있다. 해석에 포함시켜야 할 모드수를 정하는 적절한 기준이 필요하다. 이를 위하여 일반적으로 유효모드질량(effective modal mass) 또는 질량참여계수(mass participation factor)를 사용한다. 제  $i$ 번째 모드에 대한 질량참여계수는 아래와 같이 정의된다.

$$\text{mass participation factor} = \frac{\mathcal{L}_i^2}{\mu_i} \quad (2-6)$$

그리고, 각 모드에 대한 질량참여계수를 모두 더하면 구조계의 전체질량이 된다. 즉 질량참여계수란 각 모드에 대한 질량의 분포상태를 의미하는 것으로서 질량참여계수가 클수록 큰 힘이 작용하고 있음을 의미한다. 따라서 질량참여계수가 크면 구조물의 동적거동에 큰 영향을 미치기 때문에 구조해석시에는 해석에 포함된 유효모드질량의 합이 전체질량의 90%이상 되도록 모드수를 정하는 것이 요망된다. 표 2-1은 요소분할에 따른 앞의 3가지 모델의 질량참여계수를

표 2-1 구조요소 분할에 따른 질량참여율(단위 : %)

Mode	E02			E04			E08			비 고
	X방향	Y방향	Z방향	X방향	Y방향	Z방향	X방향	Y방향	Z방향	
1	0.00	0.00	96.46	0.00	0.00	85.29	0.00	0.00	85.29	Z 방향 진동모드
2	98.62	0.00	0.00	91.20	0.00	0.00	91.20	0.00	0.00	X 방향 진동모드
3	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Z 방향역대칭모드
4	0.00	63.36	0.00	0.00	47.47	0.00	0.00	47.47	0.00	Y 방향 진동모드
5	-	-	-	0.00	0.00	5.14	0.00	0.00	5.14	Z 방향 진동모드
6	1.31	0.00	0.00	2.96	0.00	0.00	2.93	0.00	0.00	X 방향 진동모드
7	-	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Z 방향역대칭모드
8	-	-	-	0.00	0.00	6.59	0.00	0.00	6.51	Z 방향 진동모드
9	0.00	10.27	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	0.18	0.00	Y 방향 진동모드
10	-	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Z 방향역대칭모드
11	-	-	-	5.22	0.00	0.00	5.24	0.00	0.00	X 방향 진동모드
12	-	-	-	0.00	0.00	1.28	0.00	0.00	1.33	Z 방향 진동모드
13	-	-	-	0.00	29.39	0.00	0.00	28.74	0.00	Y 방향 진동모드
14	-	-	-	0.00	0.00	1.17	0.00	0.00	1.20	Z 방향 진동모드
15	-	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Y 방향역대칭모드
16	-	-	-	0.00	4.91	0.00	0.00	4.66	0.00	Y 방향 진동모드
17	-	-	-	0.00	16.54	0.00	0.00	17.20	0.00	Y 방향 진동모드
계	99.93	73.63	96.46	99.38	98.44	99.49	99.37	98.25	99.49	

비교한 것이다. 모델 E04와 E08의 경우 20번째 모드까지의 질량참여계수의 합이 모두 98%이상이었

고, Y방향 질량참여계수 값이 있는 것은 4, 9, 13, 16, 17번째 모드로서 연직 진동을 의미하는 것이다. 여기서 4번째 모드의 경우 가장 큰 값을 나타내는데, 이것은 4번째모드가 연직 1차모드임을 의미한다. 그리고 각방향의 직동모드가 역대칭으로 될 때는 질량참여계수가 0이 된다. 이것은 역대칭이 되는 모드의 경우는 그 자

유도방향의 진동에 큰 영향을 미치지 않는 것을 나타낸다. 그런데, 모델 E02의 경우는 X와 Z방향의 진동모드의 질량참여계수의 합이 모두 90%를 넘지만, 연직방향에대해서는 73.63%에 불과하기 때문에 연직방향모드에 대한 관성력을 충분히 표현하지 못하게됨으로써 연직진동해석시 많은 오차가 발생하게 된다. 따라서, 중요모드의 소실이 없도록 하기 위해서는 적어도 4개이상의 절점분할이 필요함을 알 수 있다.

### 2.3 행렬응축기법과 주자유도 선택기법

본 연구에서는 Guyan의 정적 및 동적 응축기법을 도입하였으며, 예제구조물을 통해서 행렬 응축기법의 효과와 정확성에 대해 검토해 보았다. 이러한 행렬응축기법을 적용할 경우 발생되

는 문제점은 과도한 자유도를 소거할 경우에 발생하는 중요저차모드의 소실이며, 이러한 소실은 자유도의 선택과 밀접한 관계를 갖고 있다. 효율적인 해석을 위하여 해석결과에 큰 영향을 주지않는 부자유도를 소거하는 행렬응축기법의 우선과제는 주자유도의 갯수와 위치를 결정하는 것이다. 주자유도의 갯수와 위치의 선택은 해석에 필요한 중요 모드형상(mode shape)과 모드(mode)의 갯수에 관련되기 때문에 상당히 중요하다. 주자유도의 선택개념은 다음과 같다.

- ◆ 질량행렬에서 질량의 크기가 큰 자유도를 주자유도로 선택하며, 관심대상의 모드에서 큰 거동을 나타내는 자유도를 주자유도로 선택한다.
- ◆ 회전자유도의 강성이 병진자유도의 강성보다 일반적으로 크기 때문에 구조물의 관성력에 따른 가장 유연한 자유도를 남기기 위해서 회전자유도 보다는 병진자유도를 주자유도로 선택한다.
- ◆ 행렬응축기법을 도입할 경우, 최저차의 진동수값을 크게 만드는 자유도를 소거해야 한다.

### 3. 예제 해석 및 비교 분석

구조물의 단면 성질은 모든 단면이 일정한 것으로 하였으며 다음과 같다.  $A$  ;  $176cm^2$ ,  $I_x$  ;  $113637 cm^4$ ,  $I_y$  ;  $56818 cm^4$ ,  $I_z$  ;  $56818 cm^4$  이며, 일반 강재를 사용하였다. 층고는  $4m$ , 보 각각의 span은  $8m$ 로 하였다. 작용하중은 El Centro지진(1940, N-S)의 지반 가속도를 연직 방향으로 가하여 해석하였다.

#### 3.1 요소분할에 따른 구조물의 동적거동 비교

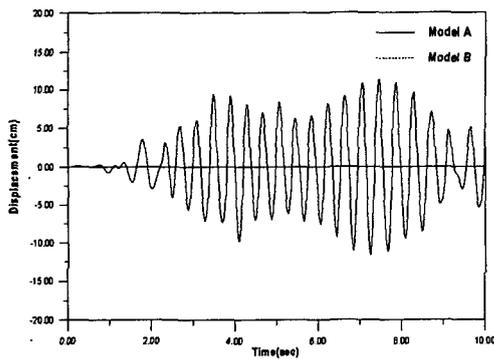
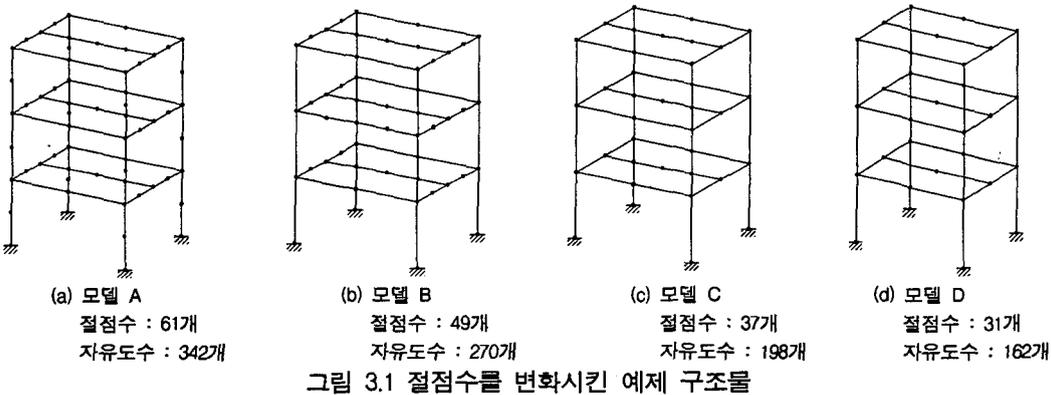


그림 3.2 모델 A와 B의 2층 작은보 중앙점에서의 변위비교

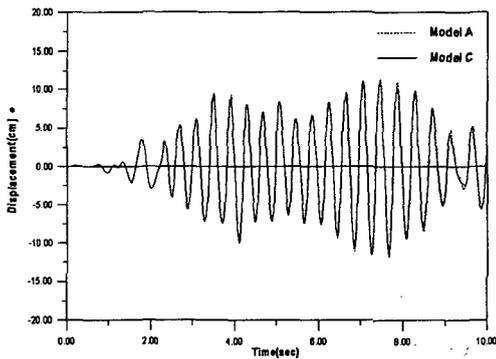


그림 3.3 모델 A와 C의 2층 작은보 중앙점에서의 변위비교

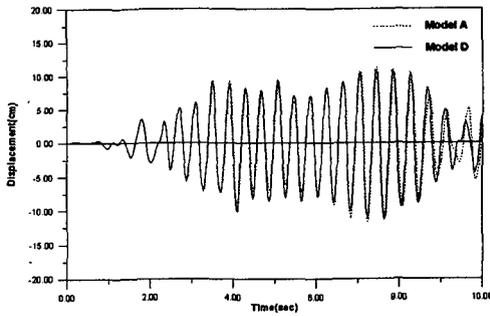
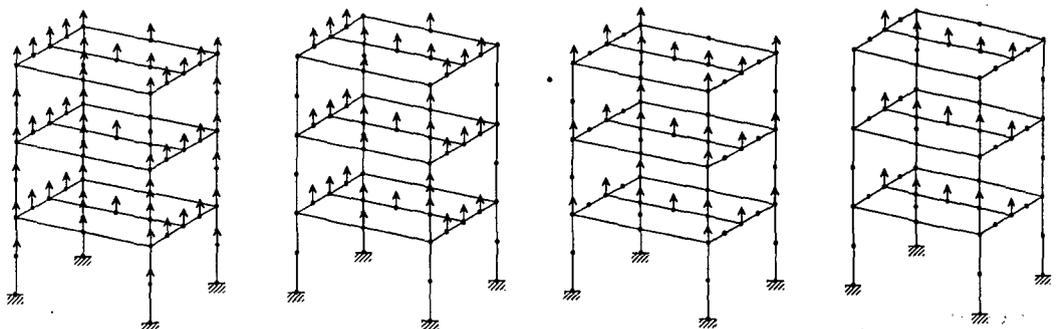


그림 3.4 모델 A와 D의 2층 작은보  
중앙점에서의 변위비교

연직방향의 진동이 발생하였을 때의 요소분할에 따른 구조물의 동적거동에 대해 살펴보기 위하여 4개의 모델을 해석하여 2층의 작은보 중앙에서의 시간에 따른 연직변위를 계산해 보았다. 모델 A의 경우 절점을 많이 잡아 비교적 정확한 값을 나타내도록 하였으며, 모델 B의 경우는 기둥중앙점의 영향을 알아보기 위하여 선정했으며, 모델 C는 큰보에서의 요소관계를 비교하여 보았다. 마지막으로 모델 D는 작은보의 요소수에 따른 정확도 비교하였다. 그림 3.2 ~ 3.4 는 해석 결과를 그래프로 나타내었다.

### 3.2 자유도 선택에 따른 구조물의 동적거동 비교

본절에서는 행렬축척기법을 도입하여 선택된 자유도에 따른 구조물의 동적거동을 비교하였다. 그림 3.5는 선택된 4개의 모델을 나타낸 것이며 해석결과를 3.1절에서 비교한 A모델과 비교하여 보았다.



(a) 모델 E  
자유도수 : 45개

(b) 모델 F  
자유도수 : 33개

(c) 모델 G  
자유도수 : 15개

(d) 모델 H  
자유도수 : 27개

그림 3.5 자유도선택에 따른 예제 구조물

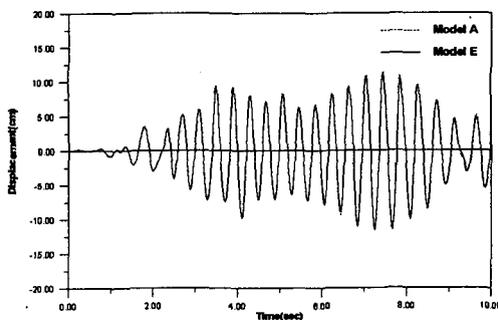


그림 3.6 모델 A와 E의 2층 작은보  
중앙점에서의 변위비교

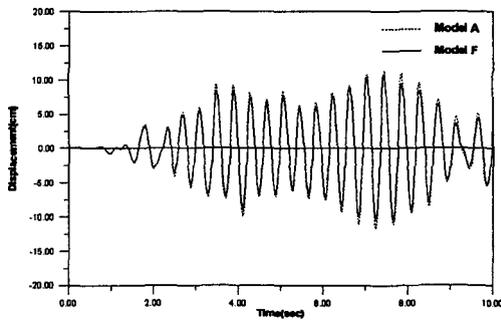


그림 3.7 모델 A와 F의 2층 작은보  
중앙점에서의 변위비교

모델 E는 연직방향의 자유도만을 선택하였으며, 모델 F의 경우 모델 E에서 기둥의 연직자유도 또한 제거한 경우이다. 모델 G는 모델 E에서 큰보의 중앙부 절점에 대한 연직자유도를 제외한

나머지 연직자유도를 제거하였으며 이것은 모델 F와 비교하여 기둥부의 연직자유도에 대한 영향을 알아보기 위해서 선택했다. 모델 H는 자유도수를 더 줄여 작은보의 연직자유도만을 고려한 경우이다. 그림 3.6에서 3.9는 그에 따른 해석결과를 그래프로 나타내었다.

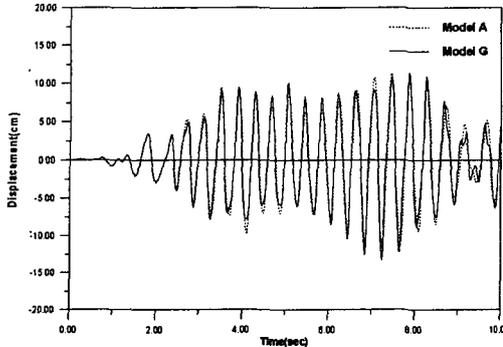


그림 3.8 모델 A와 G의 2층 작은보 중앙점에서의 변위비교

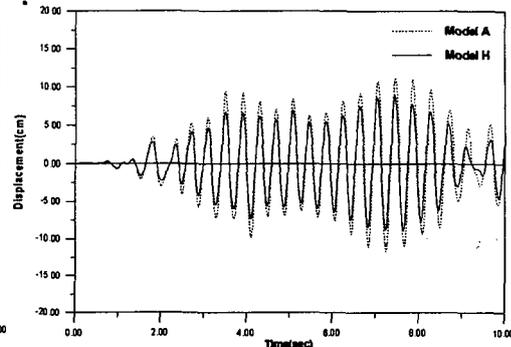


그림 3.9 모델 A와 H의 2층 작은보 중앙점에서의 변위비교

는 거의 일치하고 있다. 그림 3.8은 모델 G를 모델 A와 비교하여 그린 것이며 이것을 비교해 보면 모델 F 보다 더 적은 자유도를 선택했지만 결과는 큰차이가 나지 않는다. 이는 모델 G의 경우 기둥의 자유도를 살렸기 때문인 것으로 풀이된다. 3차원 골조해석에 있어서 기둥부 절점의 자유도는 구조물 전체의 거동에 영향을 끼침을 알 수 있다. 모델 H를 모델 A와 비교하여 보았다. 그림 3.9는 너무 과도하게 자유도를 줄여 오차가 매우 크게 발생했다. 그러나 3.1절의 모델 D와 비교하여 보면 비슷한 결과를 보이고 있다. 이것으로 알 수 있듯이 행렬응축기법을 사용하게 되면 적은 자유도를 가지고도 더 정확한 계산을 할 수 있으며 계산시간 또한 현저하게 줄어들게 된다.

### 3.3 예제 구조물의 비교 분석

해석결과 오차가 발생하는 이유는 2장에서도 살펴보았듯이 구조물의 질량참여율과 모드형상, 고유진동수 등을 조사하여 보면 쉽게 파악할 수 있다. 모델 A의 경우 연직10차 모드까지의 질량참여율을 합하면 약 96.41%에 해당하며 이 정도까지의 연직진동 모드에서 구조물의 연직진동특성이 결정된다. 모드형상과 함께 나타낸 질량참여율을 비교해 보면

표 3-1 각 모델별 연직모드에 대한 질량참여율(단위:%)

모드	모델 A	모델 B	모델 C	모델 D	모델 E	모델 F	모델 G	모델 H
1	2.263	2.264	2.265	2.288	2.264	2.264	2.271	2.277
2	2.470	2.470	2.471	2.482	2.470	2.471	2.475	2.477
3	2.535	2.535	2.536	2.544	2.535	2.535	2.539	2.541
4	3.886	3.888	3.890	3.890	3.916	3.924	-	-
5	4.415	4.417	4.419	4.425	4.440	4.470	-	-
6	4.620	4.622	4.625	4.632	4.642	4.665	-	-
7	5.081	5.084	5.118	5.245	5.094	5.095	4.972	4.983
8	5.345	5.348	5.394	5.414	5.355	5.360	5.302	5.388
9	5.485	5.487	5.538	5.554	5.492	5.495	5.489	5.537
10	10.096	10.135	10.135	10.159	10.124	-	7.471	-

일반적인 진동하중하에서는 연직3차 모드가 연직방향의 진동에 가장 많은 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 표 3-1은 각 모델별 연직모드에 대한 질량참여율을 표로 나타낸 것이다. 각각의 모델에 대하여 연직10차모드까지의 질량참여율을 합산해보면 모두 90%를 넘고 있다. 또한 위의 예제에 사용한 하중에 대한 진동수를 대략적

으로 계산해 보면 2~3 Hz사이가 된다. 이 경우 연직 1차에서 3차모드에 해당하는 고유진동수와 비슷한 진동수이다. 그러므로 이 예제 구조물의 경우 연직 1차에서 3차모드에 의해 구조물의 동적거동이 좌우된다. 모델 B와 C의 경우 결과의 차이가 작은 것은 큰보에 접합되어 있는 작은보의 질량이 큰보의 중앙 절점에 집중하므로 큰보 상의 다른 절점의 영향이 미소함을 알

수 있다. 또한 모델 G의 경우는 다른 모델에 비하여 조금의 차이는 있지만 전체적인 거동에서는 큰 차이가 없다. 그러나 모델 F의 경우 질량참여율에서는 조금의 차이를 보이지만 결과에서는 모델 G와 비슷한 결과를 보여주고 있는데 모델 F 보다 자유도수가 더 적은 모델 G가 오히려 좀더 정확한 거동을 나타내고 있다. 이런 이유는 기둥의 자유도를 살렸기 때문이다. 질량참여율이 비교적 많은 차이를 보이는 모델 D, F, G의 경우는 해석결과에서도 상당한 차이가 발생하고 있다. 또한 이러한 변위에 대한 차이점은 표 3-2에 나타낸 각 모델별 연직모드에 대한 고유진동수를 따져보면 위와 같은 결과를 얻을 수 있다.

표 3-2 각 모델별 연직모드에 대한 진동수(단위 : sec)

모드	모델 A	모델 B	모델 C	모델 D	모델 E	모델 F	모델 G	모델 H
1	11.68	11.42	11.39	11.04	11.08	16.89	10.59	21.52
2	8.19	8.44	8.42	9.56	8.20	11.70	7.68	13.87
3	22.40	23.07	22.09	22.76	22.35	34.93	22.41	52.05
4	4.13	4.27	4.32	4.28	4.39	3.28	-	-
5	12.23	12.57	12.34	11.04	13.05	8.55	-	-
6	14.96	15.18	15.17	15.49	13.99	14.67	-	-
7	0.40	0.42	0.53	0.87	0.39	0.65	3.26	1.75
8	1.59	1.63	1.70	2.65	1.57	1.70	14.11	2.58
9	4.21	4.24	4.31	3.53	4.12	5.46	5.83	8.23
10	16.62	16.27	16.39	16.32	16.74	-	31.70	-
합계	96.41	97.51	96.66	97.54	95.88	97.83	95.58	100.00

모델 A, B, C, E의 경우 연직 1차에서 3차모드까지의 고유진동수는 큰 차이가 없으며 모델 F와 G, 그 다음으로 모델 D, H 순으로 오차가 발생한다. 표 3-1과 3-2의 결과와 같이 자유도를 과도하게 줄이게 되면 고차모드에서 정확도가 떨어질 뿐만 아니라 소실될 수도 있다는 것이다.

#### 4. 결론

본 연구의 결론은 다음과 같이 정리 할 수 있다.

- 1) 보요소분할에 있어서 중요부재는 4개 이상의 요소로 나누어야 한다.
- 2) 중요도가 낮은 보부재에 대해서는 2개 이상의 요소로 나누면 좋은 결과를 얻을 수 있다.
- 3) 기둥부재의 경우는 1개의 요소만으로도 전체구조물의 연직거동을 잘 표현할 수 있다.
- 4) 작은 보가 연결되어 있는 큰 보의 경우는 4개의 요소로 나눌 필요없이 작은 보가 연결되어 있는 절점만으로도 좋은 결과를 나타낼 수 있다.
- 5) 주자유도 선택에 있어서 기둥의 연직방향에 대한 자유도는 반드시 고려하여야 하며, 중요도가 높은 보부재에 대해서는 연직방향의 자유도를 고려해 줘야 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단(KOSEF)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- 1) 김희철, 이동근, 민경원, "지하철 진동이 구조물에 미치는 영향분석모델", 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 1993.
- 2) 정길영, 손종걸, 이동근, 김우범, "철골구조물의 연직진동해석시 주자유도의 선택기법", 대한토목학회 학술발표회 논문집 (1), 1994, pp. 259-262
- 3) 정길영, 송종걸, 이동근, 김우범, "구조물의 효율적인 연직진동해석", 대한토목학회 논문집, 제 15권, 제 4호, 1995.7.
- 4) 윤정방, 이동근, 정진상, 김두기, "지하철 운행하중에 대한 인접 구조물의 진동해석", 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 제8권 제2집, 1995.10.7
- 5) William Weaver, Jr., Paul R. Johnston, 'Structural Dynamics by Finite Elements, Prentice-Hall, Inc., 1987.
- 6) William Weaver, Jr., James M. Gere, Matrix. Analysis of Framed Structure, Van Nostrand Reinhold, 1980.