

벽식구조물의 효율적인 연직진동해석

Efficient Floor Vibration Analysis in A Shear Wall Building Structure

김 현 수* 이 동 근**
Kim, Hyun-Su Lee, Dong-Guen

국문요약

현재 국내에서는 벽과 바닥판만으로 이루어진 벽식 구조형식의 아파트 건물이 많이 건설되고 있다. 아파트와 같은 주거구조물에서는 다양한 진동원에 의하여 진동이 발생하고 이러한 진동은 벽과 바닥판을 통하여 이웃한 세대 및 위, 아래층 세대로 전달되게 된다. 벽식구조물의 진동해석을 정확하게 수행하기 위해서는 벽과 바닥판을 많은 수의 유한요소로 세분한 모델을 사용하는 것이 필요하다. 그러나 아파트와 같은 벽식구조물 전체를 수많은 유한요소로 세분하여 모형화하면 막대한 해석시간과 컴퓨터 메모리가 필요하게 된다. 따라서 본 연구에서는 상당히 줄어든 해석시간과 컴퓨터 메모리를 사용하여 정확한 해석결과를 얻기 위하여 행렬응축기법으로 벽과 바닥판에 수직인 자유도만 가지는 효율적인 진동해석 모델을 제안한다. 벽식구조물에서 벽과 바닥에 수직인 자유도만을 남기고 나머지 자유도를 행렬응축기법을 통하여 한꺼번에 소거를 한다면 행렬응축과정에서 상당히 많은 양의 시간이 소요된다. 따라서 본 연구에서는 벽이나 바닥판에 수직인 자유도만을 가진 수퍼요소를 생성한 후 이를 조합하여 한 층을 나타내는 부분구조를 만들고 최종적으로 부분구조를 조합하여 전체 구조물을 구성하는 모형화 기법을 제안하였다. 제안된 해석기법의 정확성과 효율성을 검증하기 위하여 3층 및 5층의 벽식구조물을 예제구조물로 사용하여 동적해석을 수행하였다. 예제해석 결과 제안된 해석방법의 결과는 절점당 6개의 자유도를 모두 사용한 해석모델의 결과와 비슷한 정확성을 보이면서도 소요되는 해석시간과 컴퓨터 메모리를 대폭 줄일 수 있었다.

주요어 : 벽식구조물, 바닥진동, 행렬응축기법, 수퍼요소, 부분구조법

ABSTRACT

Recently, many high-rise apartment buildings using the box system, composed of only reinforced concrete walls and slabs, have been constructed. In residential buildings such as apartments, vibrations occur from various sources and these vibrations transfer to neighboring residential units through walls and slabs. It is necessary to use a refined finite element model for an accurate vibration analysis of shear wall building structures. But it would take significant amount of computational time and memory if the entire building structure were subdivided into a finer mesh. Therefore, an efficient analytical method, which has only translational DOFs perpendicular to walls or slabs by the matrix condensation technique, is proposed in this study to obtain accurate results in significantly reduced computational time. If all of the DOFs except those perpendicular to walls or slabs in the shear wall structure eliminated using the matrix condensation technique at a time, the computational time for the matrix condensation would be significant. Thus, the modeling technique using super elements and substructuring technique is proposed to reduce the computational time for the matrix condensation. Dynamic analysis of 3-story and 5-story shear wall example structures were performed to verify the efficiency and accuracy of the proposed method. It was confirmed that the proposed method can provide the results with outstanding accuracy requiring significantly reduced computational time and memory.

Key words : shear wall structure, floor vibration, matrix condensation, super element, substructuring technique

1. 서 론

현재 많이 건설되고 있는 고층아파트 건물은 전단벽과 바닥판만으로 구성되는 벽식 구조형태를 주로 도입하고 있다. 아파트와 같은 주거용 건물은 거주자의 움직임이나 사물에 의한 충격하중 등 다양한 진동원에 의하여 진동이 발생하고 이러한 진동은 벽과 바닥판을 통하여 이웃한 세대 및 위, 아래층 세대로 전달되게 된다. 최근에는 고강도 재료의 사용으로 구조부재의 단면이나 두께가 작아져서 처짐과 진동이 과도하게 발생하는 경우가 많아서 건축물의 사용성을 확보하기 위하여 구조부재의 처짐 및 진동을 허용치 이하로 설계해야 한다. 또한 거주자들의 환경에 대한 인식의 변화로 진동 및 소음이 중요한 환경문제

로 대두되고 있으며 진동은 건축물의 사용성과 안전성에 많은 영향을 미치게 된다. 따라서 건축물의 사용성과 안전성을 평가하기 위하여 처짐과 진동에 대한 정확한 해석이 요구되고 있다. 지진하중을 받는 구조물의 진동해석을 위해서는 구조물의 수평진동모드가 중요한 성분이 되므로 골조나 벽체만 모형화하고 바닥판은 강막가정을 사용하여 해석하는 것이 일반적이다. 그러나 구조물 내부의 기계진동하중이나 거주자에 의한 하중에 대한 진동해석에서는 진동원이 주로 보나 바닥판 위에 위치하게 되며 연직방향의 진동성분이 중요하게 된다. 따라서 지진해석모델은 바닥진동해석에서는 적합하지 않으며 벽식구조물의 진동해석을 정확하게 수행하기 위해서는 벽과 바닥판을 다수의 유한요소로 세분한 유한요소 모델을 사용하는 것이 필요하다. 그러나 아파트와 같은 벽식구조물 전체를 수많은 유한요소로 세분하여 모형화하면 자유도 수가 급격히 증가하게 되어 막대한 해석시간과 컴퓨터 메모리가 필요하게 된다. 따라서 엔지니어링 실무에서는 해석에 사용되는

* 정희원 · 성균관대학교 건축공학과 연구원, 공학박사

** 정희원 · 성균관대학교 건축공학과 교수, 공학박사, (대표저자 : dglee@skku.ac.kr)
본 논문에 대한 토의를 2005년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2004. 8. 6 / 심사종료일 : 2004. 9. 15)

시간과 비용이 합리적인 특별한 해석기법이 요구된다. 이러한 경우에 해석에 사용되는 자유도 수를 줄이기 위하여 Guyan의 정적 및 동적행렬응축기법⁽¹⁾이 주로 사용된다. 이 해석기법은 효율적인 해석을 위하여 해석결과에 큰 영향을 주지 않는 부자유도를 행렬응축기법으로 소거하므로 적절한 주자유도 수와 위치를 결정하는 것이 중요하다.

이러한 주자유도의 선택방법은 기존의 연구자들에 의하여 몇 가지 제안되어 있다.⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾ Ramsden과 Stoker⁽²⁾는 질량의 집중이 큰 자유도를 주자유도로 선택하였다. Levy⁽³⁾는 큰 변위나 큰 질량을 가지는 자유도를 주자유도로 선택하는 것을 제안하였다. 그러나 이러한 방법은 해석시 사용될 주자유도에 대한 지식이 미리 있어야만 효율적으로 사용될 수 있으므로 실무에서 쉽게 적용하기에는 부적절하다. Downs⁽⁴⁾는 회전자유도 보다는 이동자유도를 주자유도로 선택하는 것을 제안하였다. Shah와 Raymund⁽⁵⁾는 강성행렬과 질량행렬의 주대각요소의 비로 계산한 진동수가 엔지니어가 결정하는 한계진동수보다 크면 그 자유도를 부자유도로 결정하여 Guyan의 행렬응축기법으로 소거하였다. 현재 SAP⁽⁶⁾과 같은 상용프로그램에서는 동적해석시에 회전자유도를 모두 소거하고 절점당 3개의 이동자유도를 주자유도로 선택하고 있다. 이것은 회전자유도는 강성이 클 뿐만 아니라 흔히 사용되는 집중 질량(lumped mass)의 경우에는 회전자유도에 대한 질량 산정이 어렵고 회전자유도에서 변형이 발생하는 모드는 주로 고차모드에 속하기 때문에 동적거동에 있어서 그 영향이 매우 적게 작용한다고 판단되기 때문이다. 그러나 회전자유도만을 소거하는 방법은 부자유도의 수가 항상 한정되어 있다는 단점이 있다. 이러한 여러 가지 기존의 연구가 진행되었지만 아직까지 체계적인 이론은 정립되지 못한 상태이다.

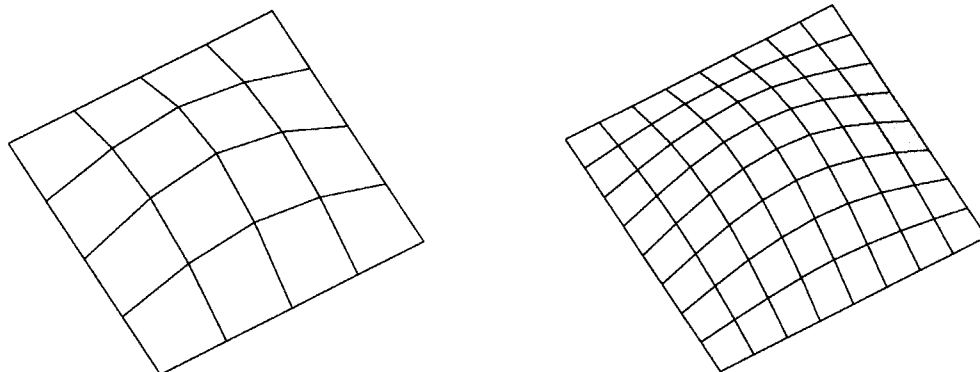
본 연구에서는 행렬응축기법을 통하여 벽과 바닥판에 수직인 자유도만으로 벽식구조물의 진동해석을 정확히 수행할 수 있는 효율적인 진동해석 모델을 제안하였다. 또한 가진층과 엔지니어가 관심을 가지는 수진층을 제외한 층의 부자유도 수를 늘려서 보다 효율적인 해석기법을 제안하였다. 벽식구조물에서 벽이나 바닥에 수직인 자유도

만을 남기고 나머지 자유도를 행렬응축기법을 통하여 소거한 후 동적해석을 수행하게 되면 자유도의 수가 대폭 줄어들어 고유치해석 및 시간이력해석에 소요되는 시간은 줄일 수 있지만 행렬응축과정에서 상당히 많은 양의 컴퓨터 메모리와 해석시간이 소요된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 벽이나 바닥판에 수직인 자유도만을 가진 수퍼요소를 생성한 후 이를 조합하여 한 층을 나타내는 부분구조를 만들고 최종적으로 부분구조를 조합하여 전체 구조물을 구성하는 모형화 기법을 제안하였다. 이렇게 여러 단계에 걸쳐서 행렬을 응축하고 한번에 응축되는 자유도의 수를 줄임으로써 행렬응축과정에 소요되는 계산시간과 컴퓨터 메모리를 줄일 수 있었다. 제안된 해석기법의 정확성과 효율성을 검증하기 위하여 5층의 벽식구조물을 예제구조물로 선택하여 동적해석을 수행하였다. 예제해석 결과 제안된 해석기법은 행렬응축을 하지 않고 절점당 6개의 자유도를 모두 사용한 해석모델의 결과와 거의 비슷한 결과를 나타내었고 소요되는 해석시간과 컴퓨터 메모리를 대폭 줄일 수 있었다.

2. 진동해석을 위한 요소분할

유한요소법을 이용하여 구조물을 해석하게 되면 일반적으로 사용되는 요소의 수가 증가할수록 해석의 정확도는 증가한다. 특히 벽식구조물의 바닥진동해석에서 중요한 역할을 하는 진동모드는 대부분 고차진동모드이기 때문에 구조물의 진동을 정확하게 예측하기 위해서는 보다 많은 요소로의 분할이 필요하다. 이전의 연구⁽⁹⁾에서 바닥판의 분할에 따른 골조구조물 연직진동해석결과와 정확성을 알아보기 위하여 다양한 해석모델을 사용하여 해석결과를 비교한 후 바닥판 구조물의 진동해석시 요소분할은 최소한 4×4 이상의 요소로 나누어야 한다고 하였다. 그러나 바닥판에 진동수가 높은 하중이 가해질 경우에는 그 진동수를 가지는 모드의 거동을 적절하게 표현해야하므로 더 많은 요소로 바닥판을 분할하여 모형화할 필요가 있다.

단순지지 판의 1차모드형상과 고유진동수를 그림 1에 나타내었다. 그림 1(a)은 바닥판을 4×4로 분할하여 모형



(a) 4×4로 분할 (진동수:24.04Hz)

(b) 8×8로 분할 (진동수:24.87Hz)

그림 1 단순지지 판의 1차모드형상 및 고유진동수

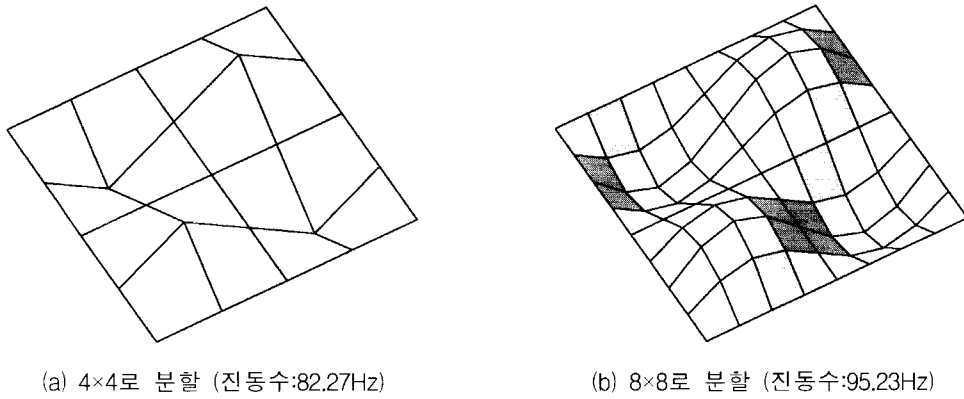


그림 2 단순지지 판의 4차모드형상 및 고유진동수

화한 경우이고 그림 1(b)는 8×8로 분할한 경우이다. 4×4로 분할하여도 바닥판의 1차모드형상을 적절히 표현할 수 있고 고유진동수도 바닥판을 8×8로 분할한 모델과 거의 비슷한 것을 알 수 있다. 그림 2는 단순지지 판의 4차모드형상과 고유진동수를 보여준다. 이 경우에 4×4로 분할한 모델은 절점의 수가 모자라서 모드형상을 제대로 표현하지 못하는 것을 알 수 있다. 이 때 고유진동수 또한 8×8로 분할한 모델과는 많은 차이가 있다. 고차모드로 갈수록 이 차이는 더 커질 것이며 8×8로 분할한 모델도 고차모드형상을 제대로 표현할 수 없을 것이다. 따라서 고차모드의 거동을 적절히 표현해서 보다 정확한 해석결과를 얻기 위해서는 보다 많은 요소를 사용해서 바닥판을 모형화해야 한다. 그러나 많은 요소를 사용할수록 해석시 사용되는 자유도수가 증가하여 실무에서는 적용할 수 없을 정도로 많은 해석시간을 소요하게 된다. 따라서 구조물의 바닥진동을 효율적으로 해석하기 위한 선행연구가 많이 수행되었고 본 연구에서도 벽식 구조물의 효율적인 바닥진동해석 모델을 제시하고자 한다.

3. 구조물의 진동해석 모델

Guyan의 행렬응축기법⁽¹⁾을 사용하여 해석에 사용되는 자유도 수를 줄임으로써 구조물의 효율적인 진동해석을 하기 위한 연구가 기존에 여러 연구자에 의하여 수행되어 왔다. 이 때 주자유도의 위치와 수의 적절한 선택이 중요하다. 따라서 본 장에서는 적절한 주자유도를 선택함으로써 바닥판 및 벽식구조물의 진동해석시 효율적으로 사용할 수 있는 진동해석 모델을 제안한다.

3.1 바닥판의 진동해석 모델

본 연구에서는 바닥판의 모형화를 위하여 평면응력요소와 판의 휨요소를 결합하여 절점당 6개의 자유도를 가지는 쉘요소를 사용하였다. 평면응력요소는 면내방향의 회전자유도가 있는 Lee요소⁽¹¹⁾를 사용하였고 판의 휨요소는 MZC 사각형요소⁽¹²⁾를 사용하였다. 건축구조물에 배치되는 바닥판은 일반적으로 면내방향의 강성이 면외방향의

휨강성에 비하여 매우 크기 때문에 면내 방향의 변형은 거의 무시할 정도로 작게 된다. 따라서 면내 방향의 자유도는 응축을 하더라도 바닥판의 진동해석에 큰 영향을 주지 않으리라고 판단된다. 바닥판의 진동해석을 위한 효율적인 해석모델을 알아보기 위하여 그림 3의 5가지 모델을 사용하였다. 바닥판의 한 변의 길이는 4m, 두께는 15cm이고 탄성계수는 210tonf/cm², 프아송비는 0.167이며 경계조건은 4변 회전단이다. 모델 PL-A는 바닥판을 8×8의 요소분할로 모형화한 모델로서 절점당 6개의 자유도를 사용하는 일반적인 해석모델이다. 모델 PL-B는 모델 PL-A에서 바닥판에 수직인 이동자유도만을 남기고 나머지는 행렬응축기법으로 소거한 모델로서 자유도 수가 49개로 대폭 줄었다. 이 모델에서 질량은 남아있는 이동자유도에 대하여 집중질량으로 고려하였고 회전자유도에 대한 질량은 고려하지 않았다. 모델 PL-C는 모델 PL-B와 같은 방법으로 판에 수직인 이동자유도만을 남겼지만 일관질량을 사용하여서 행렬응축 후 없어지는 회전자유도에 대한 질량도 고려하였다. 모델 PL-D는 바닥판을 16×16로 요소분할하고 행렬응축기법으로 판에 수직인 이동자유도만을 남긴 모델로서 절점의 수는 모델 PL-A보다 대폭 많아졌지만 해석시 사용되는 자유도의 수는 오히려 69개가 줄어든 것을 알 수 있다. 모델 PL-E는 8×8로 요소분할한 바닥판에서 주요 저차모드를 표현할 수 있도록 5개의 자유도만을 남긴 모델이다. 표 1의 해석모델에 따른 진동모드의 고유진동수를 보면 알 수 있듯이 일반적으로 많이 사용하는 모델 PL-A는 저차모드에서는 오차가 비교적 작지만 고차모드로 갈수록 오차가 커진다. 모델 PL-B는 회전질량에 대한 고려를 전혀 하지 않았기 때문에 자유도 수가 줄어들어서 해석시간은 줄겠지만 오차가 PL-A보다 더 큰 것을 알 수 있다. 모델 PL-C는 자유도 수는 모델 PL-B와 같지만 일관질량을 사용하여 회전질량을 고려한 후에 응축을 하였기 때문에 PL-A와 비슷한 결과를 나타낸다. 즉, 해석시 사용하는 절점의 수가 같으면 절점의 모든 자유도를 살려서 해석한 결과와 판의 수직방향의 이동자유도만을 살려서 해석한 결과가 거의 비슷하므로 모델 PL-C를 사용하면 효율적인 판의 해석을

표 1 해석모델에 따른 진동모드의 고유진동수 (단위: Hz)

모드	이론해	모델 PL-A		모델 PL-B		모델 PL-C		모델 PL-D		모델 PL-E	
	진동수	진동수	오차(%)	진동수	오차(%)	진동수	오차(%)	진동수	오차(%)	진동수	오차(%)
1	25.24	25.07	-0.67	25.06	-0.71	25.07	-0.67	25.20	-0.16	25.45	0.83
2	63.18	62.43	-1.19	62.34	-1.33	62.43	-1.19	62.94	-0.38	69.31	9.70
4	101.12	98.30	-2.79	97.92	-3.16	98.33	-2.76	100.27	-0.84	103.9	2.75
5	126.35	124.87	-1.17	124.27	-1.65	124.94	-1.08	125.86	-0.39	137.84	9.09

할 수 있다. 모델 PL-D의 경우에는 사용된 자유도 수는 모델 PL-A에 비하여 작지만 사용한 요소와 절점수가 많기 때문에 이론해와 가장 가까운 결과를 나타냈다. 이를 통하여 바닥판의 회전자유도나 면내 이동자유도보다 판에 수직인 이동자유도가 바닥판의 운동에너지를 더 잘 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 절점당 판에 수직인 이동자유도 하나만을 남기면 전체 자유도수가 줄어들어서 더 많은 절점을 사용할 수 있고 더 많은 절점을 사용하면 정확해에 더 가까운 결과를 얻을 수 있다.

모델 PL-E는 바닥판의 주요저차모드를 나타내기 위하여 그림 4에서 보는 바와 같이 저차모드의 동적거동을 가장 잘 표현할 수 있는 5곳의 연직자유도를 선택하였다. 표 1의 모델 PL-E의 해석결과를 보면 10% 미만의 오차

를 가지고 주요 저차모드를 표현할 수 있다는 것을 알 수 있다. 벽식구조물은 여러 개의 방과 거실, 욕실 등으로 구성되고 이러한 실들은 그 용도에 따라서 각 실을 구성하는 벽체와 바닥판의 크기가 다양하다. 벽식구조물의 진동모드가 고차로 갈수록 벽체와 바닥판을 구성하는 판도 점점 많이 구부러지는 고차모드의 형상을 나타낸다. 이 때 거실과 같이 면적이 큰 바닥판은 여러 번 구부러지는 고차모드의 형상을 나타내지만 화장실과 같이 면적이 작은 실을 구성하는 판들은 아직 몇 번 구부러지지 않는 저차모드형상을 나타내게 된다. 따라서 모델 PL-E와 같이 바닥판에 5개의 자유도만 남긴 해석모델로도 면적이 작거나 운동에너지가 작은 판의 거동은 적절히 표현할 수 있다.

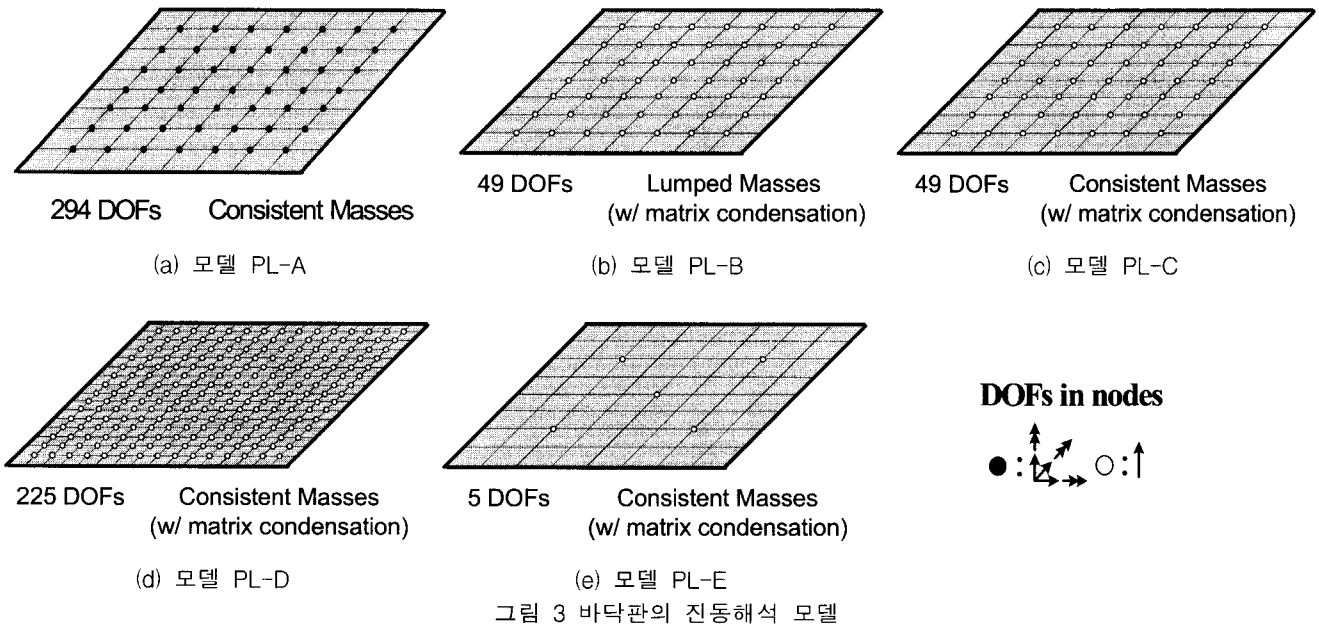


그림 3 바닥판의 진동해석 모델

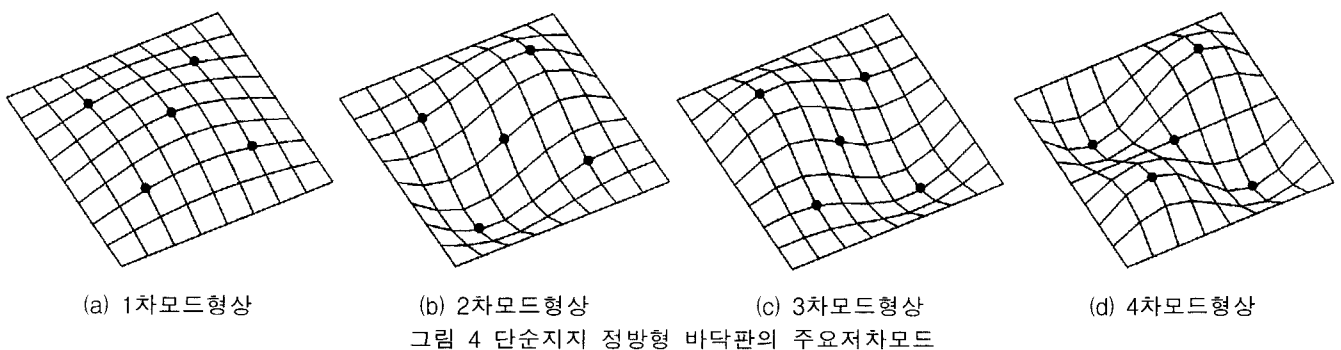


그림 4 단순지지 정방형 바닥판의 주요저차모드

3.2 벽식구조물의 진동해석 모델

앞 절에서 설명한 바닥판과 마찬가지로 벽식구조물의 경우에도 대부분의 운동에너지는 판에 수직방향의 이동자유도에 의하여 표현되고 회전자유도의 운동에너지는 작기 때문에 세분하여 절점의 자유도 6개를 모두 살린 모델과 판에 수직인 자유도를 살린 모델과 비슷한 해석결과를 얻으리라고 생각된다. 이를 검토해보기 위하여 그림 5에 나타난 4가지 해석모델을 사용하였다. 바닥판의 한 변의 길이는 4m이고 층고는 3m이며 나머지 물성치는 앞 절의 바닥판 모델과 같다. 모델 BX-A는 절점당 6개의 자유도를 모두 가지고 있는 일반적인 해석모델이고 모델 BX-B는 바닥판과 벽에 수직인 이동자유도만 남기고 나머지 자유도를 모두 소거한 모델이다. 모델 BX-B는 그림 6에 나타난 1, 2, 8차 및 13차 모드의 모드형상과 고유진동수가 모델 BX-A와 거의 차이가 없는 것을 알 수 있다. 벽식구조물은 일반적으로 벽체의 판크기가 바닥판의 크기보다 작으므로 벽체의 운동에너지가 바닥판보다 작다. 따라서 모델 BX-C는 벽체의 자유도를 그림 5(c)에서 보는 바와 같이 벽체에 수직인 5개의 이동자유도만 남기고 모두 소

거한 모델이다. 모델 BX-D는 바닥판에 수직인 이동자유도만을 남기고 나머지 자유도를 모두 소거한 모델이다. 그림 6에 나타난 1, 2 및 4차 모드의 고유진동수와 모드형상을 보면 모델 BX-A의 결과와 나머지 모델의 결과가 큰 오차 없이 거의 비슷하다. 그러나 13차 모드를 보면 모델 BX-D는 벽체의 자유도가 전혀 없어서 고유진동수가 다른 모델에 비하여 10%이상의 오차를 나타내었다. 이러한 현상은 벽체의 운동에너지가 큰 모드일수록 더욱 심해질 것이다. 그러나 모델 BX-C는 모델 BX-D에 비하여 벽체당 5개의 자유도만을 추가하였지만 벽체의 주요 저차모드를 표현할 수 있으므로 모델 BX-A의 고유진동수와 비교하여 1.3%의 오차만을 나타낸다. 벽식구조물의 진동해석을 할 때 바닥판이 주로 진동한다고 하여 벽체의 자유도를 모두 소거하면 구조물의 고유진동수에 오차가 발생하고 특히 다층의 벽식구조물일 경우에 진동이 다른 층으로 전달되는데 많은 오차를 포함하게 된다. 또한 벽체에 자유도가 전혀 없는 모델에 비하여 5개의 자유도만 추가하여 벽체의 주요 저차모드를 표현할 수 있는 모델은 벽식구조물의 거동을 상당히 효과적으로 표현할 수 있다.

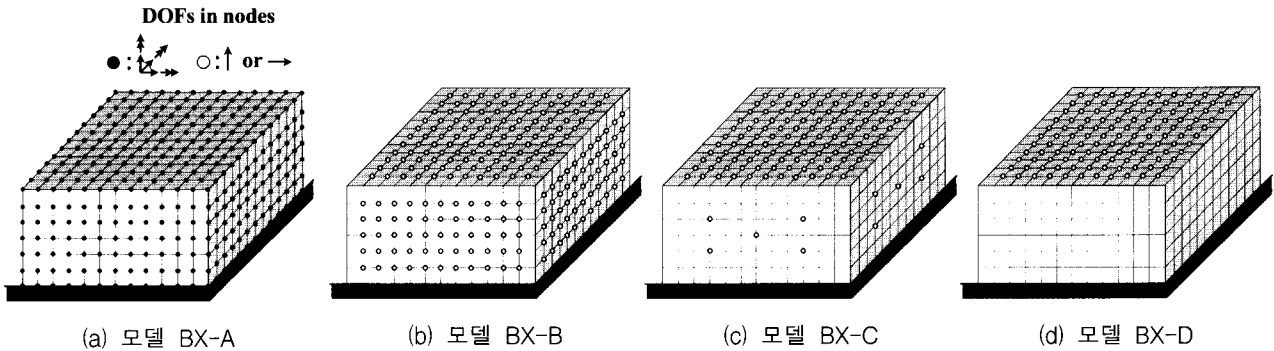


그림 5 벽식구조물의 진동해석 모델

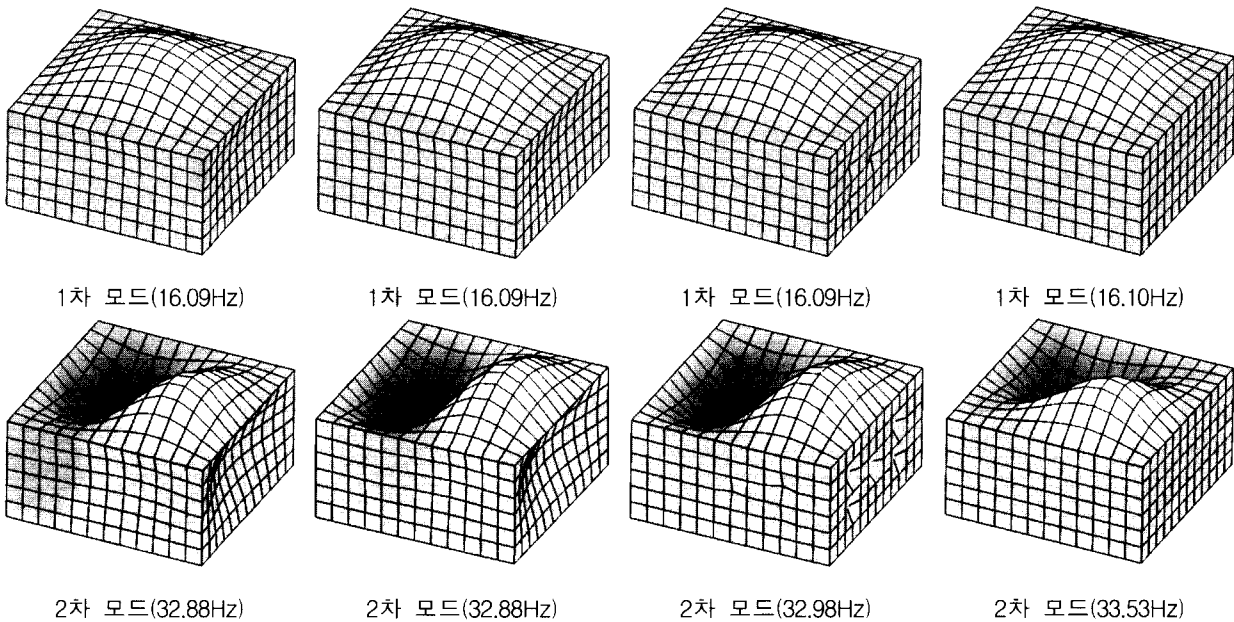


그림 6 해석모델의 고유진동수 및 진동모드형상의 비교

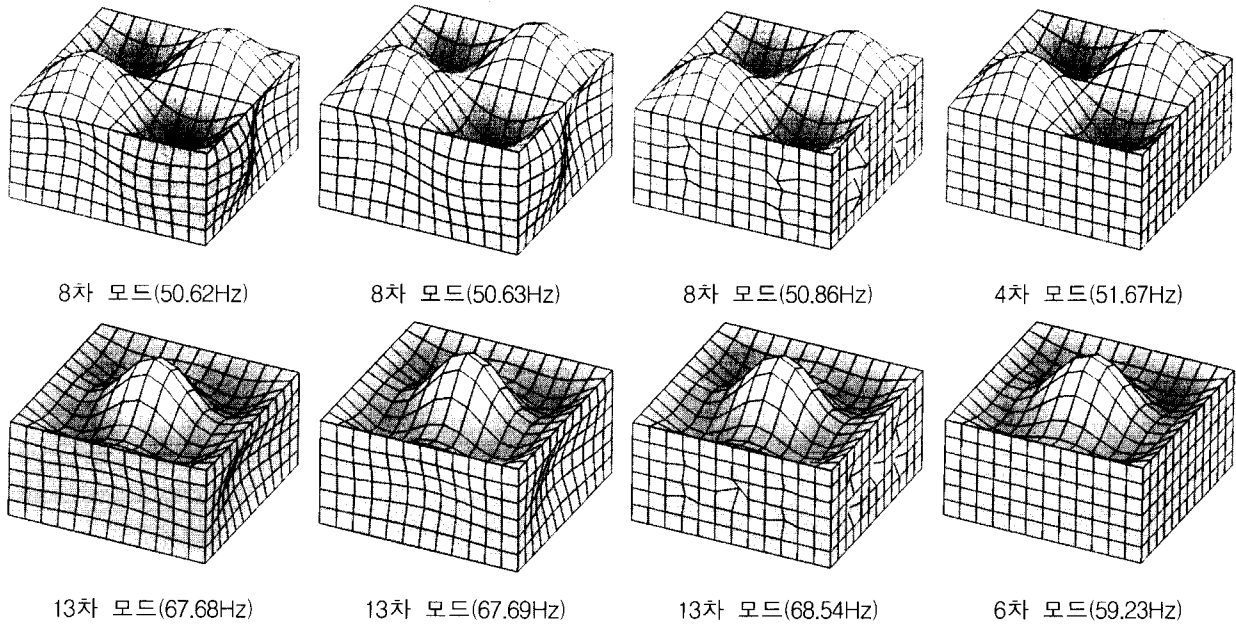


그림 6 해석모델의 고유진동수 및 진동모드형상의 비교(계속)

4. 슈퍼요소를 이용한 벽식구조물의 모형화

벽식구조물의 효율적인 진동해석을 위해서 바닥판과 벽에 수직방향 이동자유도만을 남기고 나머지 자유도를 Guyan의 행렬응축기법을 사용하여 응축하면 해석에 사용되는 자유도 수를 대폭 줄임으로써 고유치해석 및 시간이력해석 과정에서 소요되는 시간을 상당히 줄일 수 있다. 그러나 전체 자유도에 대하여 행렬응축을 하게 되면 행렬응축과정에서 많은 시간이 소요되는 단점이 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 행렬응축과정에서 소요되는 시간을 줄이기 위하여 부분구조법⁽¹³⁾과 슈퍼요소⁽¹⁴⁾를 도입하였다. 본 논문에서 벽식구조물을 모형화하는데 사용한 슈퍼요소와 부분구조법을 설명하기 위하여 그림 7의 예제구조물을 사용하였다. 예제 구조물은 창문형 개구부와 출입문형 개구부를 가진 3층 벽식구조물로서 층당 2370개의 자유도를 가지고 있다. 설명의 편의를 위하여 그림 8(a)와 같이 한 개의 층을 사용하여 설명하기로 한다. 우선 슈퍼요소의 생성을 위하여 그림 8(a)와 같이 벽식구조물의 벽과 바닥판을 분리한다. 분리된 벽과 바닥판 모델의 테두리에 존재하는 절점은 제외하고 나머지 내부절점에 대하여 판에 수직방향의 이동자유도를 남기고 나머지 자유도를 행렬응축기법으로 소거함으로써 그림 8(b)와 같이 슈퍼요소를 생성할 수 있다. 생성된 슈퍼요소를 그림 8(c)와 같이 테두리의 모든 절점을 공유함으로써 한 층의 벽식구조물로 조합될 수 있다. 이러한 과정을 거쳐서 한 층의 자유도 수는 953개로 줄어든다. 그림 8(c)의 조합된 한 층의 모델에서 벽과 벽이 만나는 부분에 존재하는 절점을 행렬응축기법으로 소거하면 그림 8(d)에서 보는 바와 같이 815개의 자유도를 가지는 부분

구조를 생성할 수 있다. 생성된 한 층의 부분구조는 구조형태가 동일한 층 수 만큼 반복해서 사용할 수 있으므로 매 층 동일한 구조가 반복되는 아파트와 같은 주거용 구조물에 매우 효율적으로 적용할 수 있다. 생성된 부분구조의 벽체 상부와 하부에 있는 절점을 모두 공유하여 부분구조를 조합함으로써 전체구조물을 생성할 수 있고 최종적으로 상부층벽과 하부층 벽이 만나는 부분에 존재하는 절점의 자유도를 행렬응축기법으로 소거함으로써 그림 8(f)와 같이 바닥판과 벽에 수직인 이동자유도만을 가진 벽식구조물의 해석모델을 얻을 수 있다. 생성된 해석모델의 층 당 자유도 수는 287개로서 그림 7의 세분모델에 비하여 12%의 자유도 수를 갖는다. 이렇게 슈퍼요소와 부분구조를 사용하여 벽식구조물을 모형화하면 한번에 응축되는 자유도 수가 작기 때문에 행렬응축시간을 단축시킬 수 있고 한 번 만든 슈퍼요소나 부분구조는 구조형태가 동일한 곳에 반복적으로 사용할 수 있어서 모델링에 소요되는 노력도 상당히 절감할 수 있다.

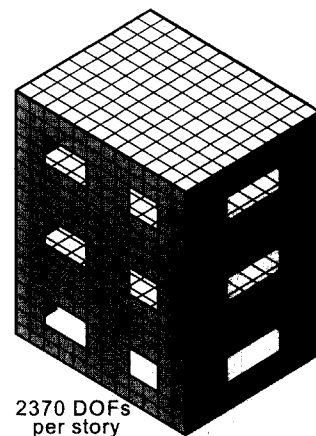


그림 7 벽식구조물의 유한요소 세분모델

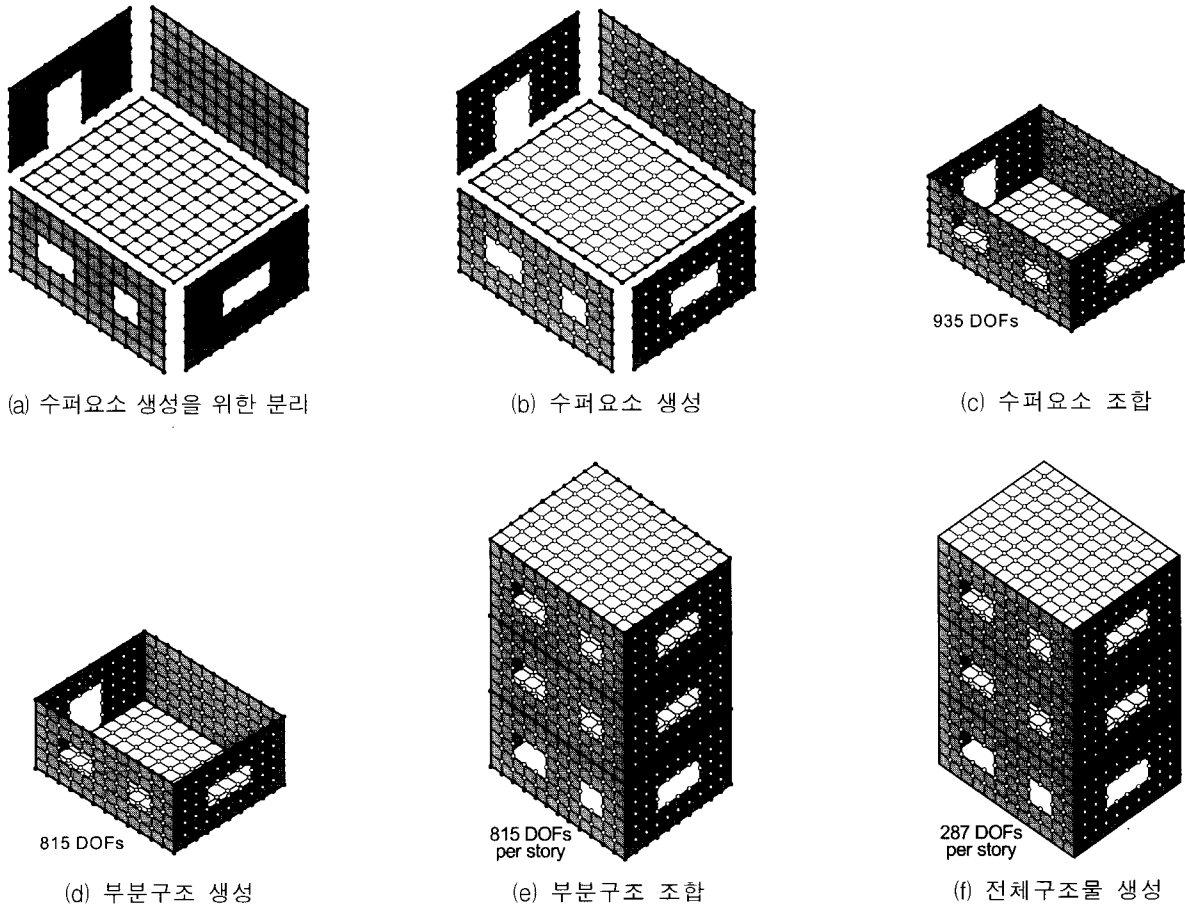


그림 8 슈퍼요소와 부분구조를 이용한 벽식구조물의 모형화 과정

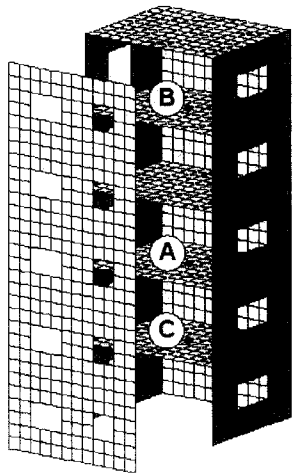


그림 9 예제구조물

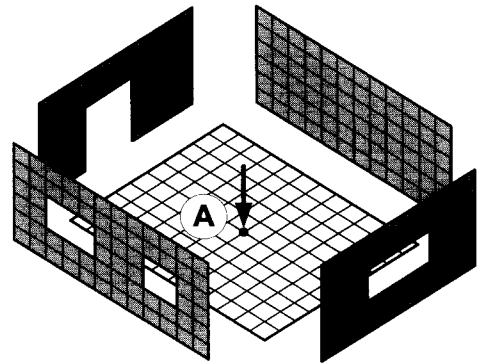


그림 10 충격하중 재하위치

5. 예제해석

본 연구에서는 그림 9와 같이 출입문형 개구부와 창문형 개구부를 가지는 5층 벽식구조물에 대하여 고유치해석과 충격하중을 사용한 시간이력해석을 수행하였다. 충격하중 재하위치는 그림 10에서 보는 바와 같이 3층 바닥판의 중앙이고 가진위치인 A점과 5층의 B점 및 2층의 C점에서 수진하여 변위시간이력해석 결과를 비교하여 보았다. 해석에 사용된 충격하중은 로드셀을 이용하여 벽돌을

떨어뜨렸을 때 발생하는 진동하중을 계측한 것이다. 계측한 하중 그림 11(a)를 보면 벽돌이 처음 로드셀에 충돌하였을 때 발생하는 큰 충격하중 뒤에 네 번의 작은 충격하중이 따라오는데 이것은 벽돌의 한쪽 모서리 부분이 먼저 로드셀에 닿고 다른 쪽 부분이 연속적으로 닿으면서 발생하는 하중들이다. 이 하중을 FFT한 것을 그림 11(b)에 나타내었다. 20Hz 이내에 진동수 성분이 주로 존재하며 100Hz까지의 진동수 성분을 가지고 있는 하중이다.

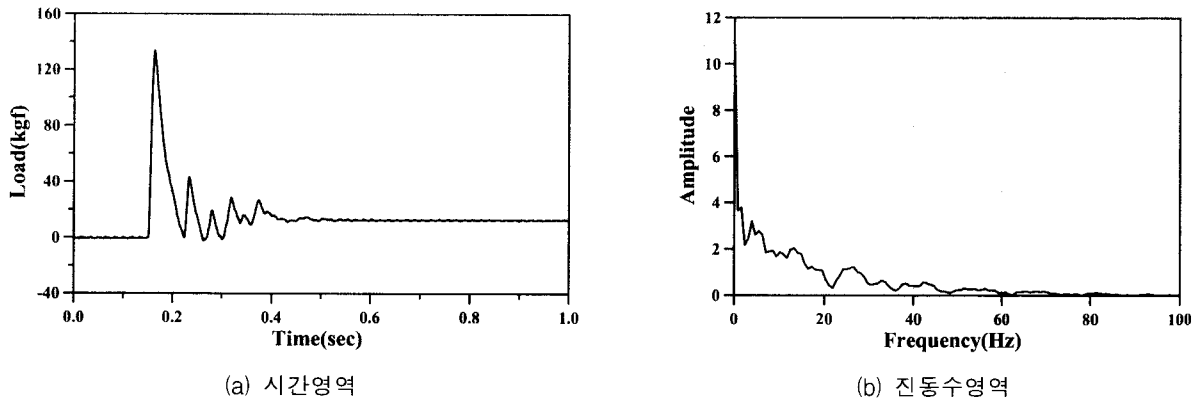


그림 11 점 A에서의 가진하중

본 예제에서 사용한 모델은 표 2에서 보는 바와 같다. 절점에 존재하는 모든 자유도를 사용한 모델을 W5-A라고 하였고 바닥판이나 벽에 수직인 이동자유도만 사용한 모델을 W5-B라고 하였다. 모델 W5-C는 가진층이나 수진층의 바닥판은 판에 수직인 이동자유도를 모두 사용하고 나머지 층의 바닥판은 5개의 이동자유도만을 사용하며 모든 층의 벽체에서도 5개의 이동자유도만 사용한 모델이다. 모델 W5-D는 가진층과 수진층의 바닥판은 판에 수직인 이동자유도를 모두 사용하고 나머지 층의 바닥판과 벽체에 존재하는 모든 자유도를 소거한 모델이다. 모든 모델에서 질량은 일관질량을 사용하였으며 자유도의 소거는 Guyan의 행렬응축기법을 사용하였다.

모든 자유도를 사용한 모델 W5-A를 가장 정확한 모델이라고 가정하고 나머지 모델의 해석결과를 모델 W5-A와 비교하였다. 모델 W5-B의 변위시간이력결과는 세 곳의 수진위치에서 모두 W5-A의 결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 그림 13을 보면 W5-C도 W5-A의 결과와 거의 일치하므로 수진층의 이외의 바닥판과 벽의 자유도를 5개만 남겨도 매우 정확한 해석결과를 얻을 수 있었다. 모델 W5-D의 해석결과를 보면 가진층에 있는 수진위치 A와 가진층 바로 아래층에 위치한 수진위치 C에서

는 약간의 오차를 포함하지만 모델 W5-A의 결과와 상당히 비슷한 것을 볼 수 있다. 그러나 5층에 위치한 수진위치 C의 결과는 모델 W5-A의 결과에 비하여 상당히 부정확한 결과를 나타내는 것을 알 수 있다. 이것은 가진층인 3층 바닥판에서 발생한 진동이 수진층인 5층으로 전달되는 것을 제대로 표현하기 위해서는 중간에 위치한 바닥판과 벽에도 자유도가 존재해야함을 의미한다. 모델 W5-C의 결과를 보면 3층과 5층의 중간에 있는 바닥판과 벽에 5개의 자유도만 남기더라도 3층의 진동이 5층으로 전달되는 것을 상당히 정확하게 표현할 수 있음을 알 수 있다. 그림 15에서 보는 바와 같이 모델 W5-E는 가진층의 수직 이동자유도만 고려하여도 가진위치에서의 응답을 비교적 정확하게 나타낼 수 있다. 진동해석에서는 일반적으로 하중이 가해지는 위치에서의 구조물의 응답이 가장 중요한 경우가 많다. 따라서 가진위치의 응답만을 얻고자 한다면 모델 W5-F를 사용하여도 그림 18과 같이 비교적 정확한 해석결과를 효율적으로 얻을 수 있다. 그림 14을 보면 W5-D의 수진위치 B점에서의 변위시간이력이 모델 W5-A의 해석결과와 가장 많이 차이가나는 것을 알 수 있다. 차이가나는 원인을 분석해보기 위하여 두 모델의 수진위치 B점에서의 변위시간이력을 FFT하였고 그 결과

표 2 모델별 자유도 구성

모델	바닥판의 자유도					벽체의 자유도
	2층	3층	4층	5층	지붕층	
W5-A	A	A	A	A	A	A
W5-B	B	B	B	B	B	B
W5-C	B	B	C	B	C	C
W5-D	B	B	D	B	D	D
W5-E	D	B	D	D	D	D
W5-F	-	B	-	-	-	D*

- A : 절점당 6개의 자유도를 모두 사용
- B : 판에 수직방향 이동자유도만 남기고 나머지 자유도는 모두 응축
- C : 판에 수직방향 이동자유도 중 5개만 남기고 나머지 자유도는 모두 응축
- D : 판에 존재하는 모든 자유도를 응축
- D* : 가진층과 아래층의 벽체만 모형화하고 벽체에 존재하는 모든 자유도를 응축

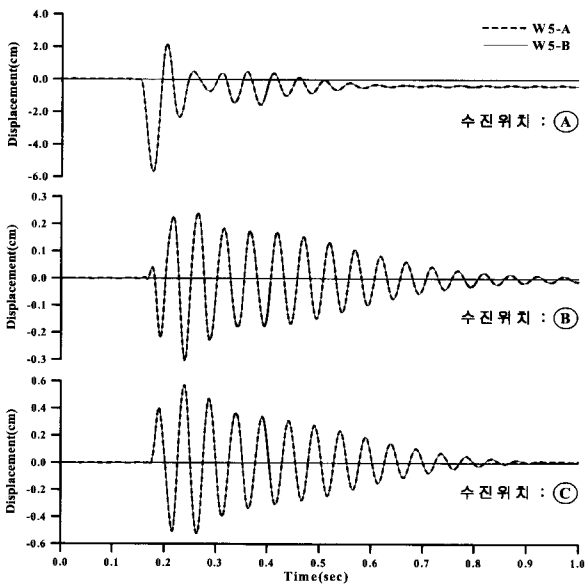


그림 12 모델 W5-A와 W5-B의 변위시간이력

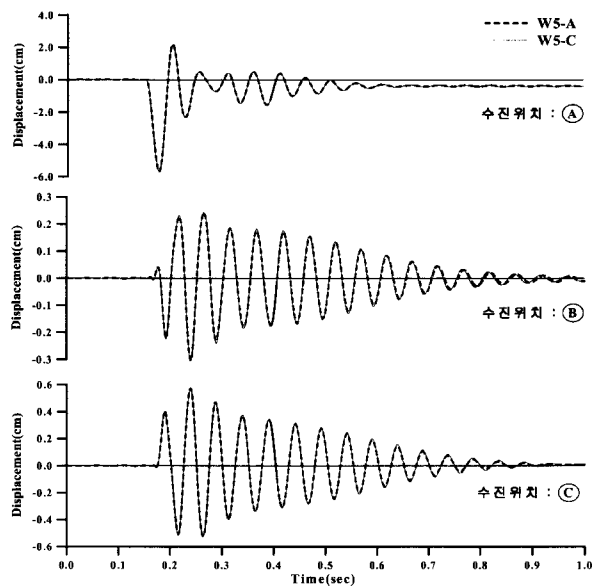


그림 13 모델 W5-A와 W5-C의 변위시간이력

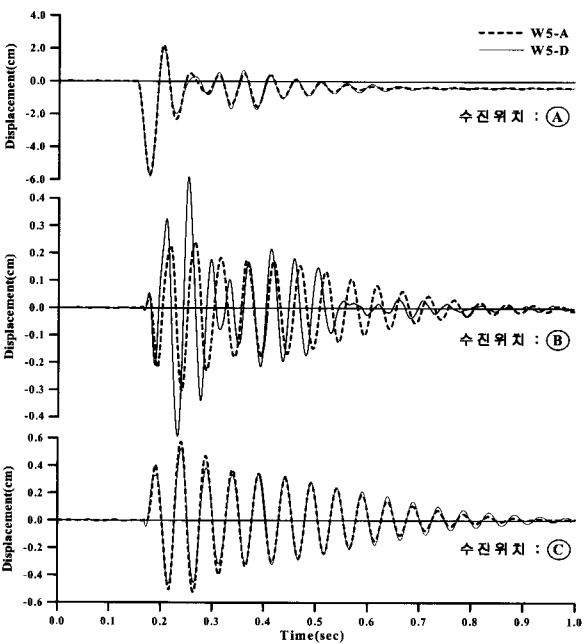


그림 14 모델 W5-A와 W5-D의 변위시간이력

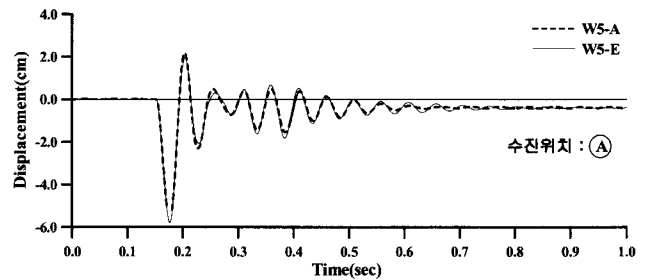


그림 15 모델 W5-A와 W5-E의 변위시간이력

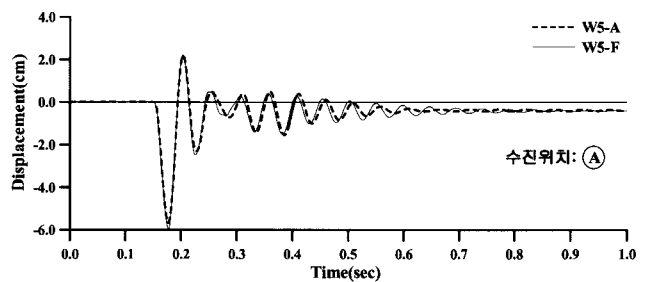


그림 16 모델 W5-A와 W5-F의 변위시간이력

를 그림 17에 나타내었다. W5-D의 FFT결과를 보면 20Hz부근의 진동수 성분이 모델 W5-A보다 작은 반면에 24Hz부근의 진동수 성분은 매우 큰 것을 볼 수 있다. 이것은 벽체와 수진층이 아닌 바닥판의 자유도를 모두 소거하였기 때문에 20Hz와 24Hz부근의 W5-D의 모드형상 W5-A의 모드형상과 다르기 때문이라고 판단된다. 이것을 확인해보기 위하여 20Hz와 24Hz부근의 모델별 모드형상을 표3과 4에서 비교하였다. 표 3을 보면 20Hz 부근의 3층 바닥판의 모드형상은 네 가지 모델 모두 비슷하지만 5층 바닥판의 모드형상을 보면 모델 W5-D가 다른 모델에 비하여 작은 진폭을 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서 그림 17에서 보는 바와 같이 20Hz 부근의 진동수 성분이 모델 W5-A에 비하여 작다.

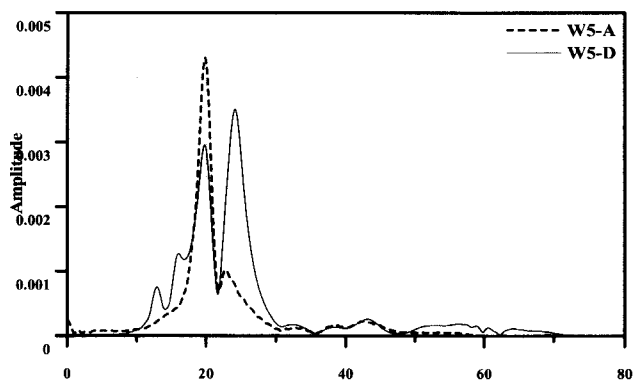


그림 17 B점에서 모델 W5-A와 W5-D의 변위시간이력 FFT

표 3 20Hz 부근의 모델별 바닥판의 모드형상

모델	W5-A	W5-B	W5-C	W5-D
5층 바닥판 모드형상				
3층 바닥판 모드형상				
진동수	19.74Hz	19.74Hz	19.85Hz	19.99Hz

표 4 24Hz 부근의 모델별 바닥판의 모드형상

모델	W5-A	W5-B	W5-C	W5-D
5층 바닥판 모드형상				
3층 바닥판 모드형상				
진동수	25.85Hz	25.88Hz	26.01Hz	24.27Hz

표 4의 24Hz부근의 모델별 바닥판의 모드형상을 보면 모델 W5-A, B 및 C는 진동수와 모드형상이 거의 비슷하지만 모델 W5-D는 다른 모델과 많이 다르다. 모델 W5-D의 3층 바닥판의 모드형상의 변위가 다른 모델에 비하여 상당히 크기 때문에 24Hz 부근의 하중이 가해지면 다른 모델보다 매우 큰 진동이 발생되리라고 예상된다. 또한 5층 바닥판의 모드형상도 상당히 큰 변위를 나타내므로 24Hz근처의 하중이 3층 바닥판에 가해졌을 때 5층바닥판의 진동은 모델 W5-D가 다른 모델에 비하여 월등히 크리라고 판단된다. 따라서 그림 19의 그래프에서도 24Hz 부근의 진동수 성분이 모델 W5-A에 비하여 탁월하게 나타났다.

예제구조물의 해석에 사용된 모델별 해석시간과 자유도의 수를 표 5에서 비교하였다. 모델 W5-A는 절점당 6개의 자유도를 모두 사용하므로 해석시간이 다른 모델에

비하여 가장 많이 소요된다. 모델 W5-B는 수퍼요소와 부분구조를 만들기 위하여 행렬응축에 소요되는 시간 때문에 강성 및 질량행렬을 구하는 과정에서 W5-A보다 많은 시간을 소비한다. 그러나 사용되는 자유도 수가 W5-A에 비하여 적으므로 고유치해석 및 시간이력해석에서 소요되는 시간을 대폭 절약할 수 있다. 모델 W5-C는 W5-B보다 많은 수퍼요소를 생성해야 하므로 수퍼요소 생성에 소요되는 시간은 조금 더 소요된다. 그러나 자유도 수가 작기 때문에 부분구조와 전체구조물에서 소요되는 행렬응축 시간은 모델 W5-B보다 더 작게 소요된다. 모델 W5-C의 동적해석결과의 정확성은 W5-A와 거의 같았다. 반면에 모델 W5-C를 해석하기 위하여 소요된 시간은 모델 W5-A에 비하여 약 2.5%만 소요되었다. 모델 W5-D는 모델 W5-C에 비하여 자유도의 수 및 해석시간을 더 적게 사용되지만 구조물의 거동을 정확하게 표현하기에는

표 5 모델별 자유도수 및 해석시간의 비교

모델	자유도수	소요시간(초)					
		강성·질량 행렬구성			고유치해석	시간이력해석	전체
		수퍼요소	부분구조	전체구조물			
W5-A	10530	0	0	18.23	9090.06	695.78	9,804.07
W5-B	1435	25.66	5.36	638.53	140.21	69.69	879.45
W5-C	407	37.47	4.08	176.99	12.14	6.65	237.33
W5-D	297	36.34	3.83	98.72	9.89	3.54	152.32
W5-E	99	36.28	3.79	68.78	2.97	2.30	114.12
W5-F	99	24.28	3.67	1.22	2.83	2.22	34.22

자유도수가 너무 적어서 해석결과에 오차가 많다. 모델 W5-E와 F의 자유도 수가 작기 때문에 고유치해석과 시간이력해석에 소요되는 시간이 매우 작으므로 가진층에서의 진동을 얻고자 할 때 효율적으로 사용될 수 있고 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 벽식구조물의 효율적인 진동해석을 위하여 벽체와 바닥판에 수직방향의 이동자유도만 남기고 나머지는 행렬응축기법을 이용하여 소거한 해석모델을 제안하였다. 또한 벽식구조물 해석모델의 행렬응축과정에서 소요되는 시간을 줄이고 모델링 작업의 편의를 위하여 수퍼요소와 부분구조를 사용한 모형화기법을 제안하였다. 예제구조물의 해석을 통하여 제안된 해석기법의 정확성과 효율성에 대하여 검토하였다. 본 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 유한요소법으로 구조물의 진동해석을 수행할 경우에는 요소분할 크기를 작게 하여 많은 절점을 사용할수록 정확한 해석결과를 얻을 수 있다. 그러나 너무나 많은 절점을 사용하게 되면 실무에서는 적용할 수 없을 정도로 많은 해석시간이 소요되므로 절점사용에 제한이 있다. 본 연구에서 제안한 해석기법은 절점당 하나의 이동자유도만 남기므로 절점당 6개의 자유도를 모두 사용한 세분모델보다 더 많은 절점을 사용하고도 자유도 수는 더 작은 해석모델을 생성할 수 있으므로 효율적인 해석을 할 수 있다.
2. 바닥판에 진동하중이 가해진 위치에서 수진할 경우에는 가진층의 바닥판에 수직인 이동자유도만 남기고 다른 층이나 벽에 존재하는 자유도를 모두 응축하여도 상당히 정확한 해석결과를 얻을 수 있다. 이 때 다른 층의 바닥판이나 벽체의 강성은 응축되어 가진층 바닥판의 경계조건으로 고려된다.
3. 가진위치와 수진위치가 다른 경우에는 가진위치에서 발생한 진동이 벽체나 다른 층의 바닥판을 통하여 수진위치로 전달되기 때문에 가진층 바닥판 이외의 부분에서도 판에 수직인 이동자유도를 사용할 필요가 있다. 벽식구조물의 모든 층의 바닥판과 벽체에 수직인 이동자유도를 사용하면 세분모델의 해석결과와 거의 비슷한 결과를 얻을 수 있다. 가진층과 수진층 이외의 층은 엔지니어의 관심밖이므로 그러한 층의 바닥판과 벽체에 존재하는 자유도를 모두 응축하여 해석할 수 있는데 그러면 해석결과에 상당한 오차를 포함하게 된다. 이때 벽체와 바닥판의 주요 저차모드를 표현할 수 있도록 벽체 및 바닥판 당 5개의 자유도를 남긴다면 해석의 정확도를 크게 개선할 수 있다.
4. 많은 경우에 벽식구조물이 같은 형태의 평면이 매층 반복되어 사용된다. 따라서 본 연구에서 제안한 수퍼

요소와 부분구조법을 사용한 모형화방법을 효과적으로 적용할 수 있고 제안한 방법을 사용하면 행렬응축에 소요되는 시간과 모델링의 노력을 크게 절감할 수 있다. 또한 제안된 해석모델은 행렬응축과정을 통하여 자유도수가 크게 줄어들기 때문에 해석시간 및 컴퓨터 메모리를 상당히 절약할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2004년도 두뇌한국 21사업 핵심분야 사업비와 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단의 지원에 의하여 수행되었음을 밝히며 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

1. Guyan, R. J., "Reduction of Stiffness and Mass Matrices," *AIAA Journal*, Vol.3, No.2, 1965, 380pp.
2. Ramsden, J. N. and Stocker, J. R., "Mass Condensation a Semi- Automatic Method for Reducing the Size of Vibration Problems," *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, Vol.1, 1969, pp. 333-349.
3. Levy, R., *Guyan Reduction Solutions Recycled for Improved Accuracy*, NASTRAN Users Experiences, NASA, 1971, pp. 201-220.
4. Down, B., "Accurate Reduction of Stiffness and Mass Matrices for Vibration Analysis and a Rational for Selecting Master Degrees of Freedom," *J. Mech. Design*, ASME, 1980, 102pp.
5. Shah, V. N. and Raymund, M., "Analytical Selection of Masters for Reduced Eigenvalue Problems," *Int. J. Numer. Mech. Eng.*, Vol.18, 1982, pp. 89-98.
6. Miller, C. A., "Dynamic Reduction of Structural Models," *ASCE J. Struct. Div.*, Vol.106, No.10, 1980, pp. 2097-2108.
7. Paz, M., "Practical Reduction of Structural Eigenproblems," *ASCE J. Struct. Eng.*, Vol.109, No.11, 1983, pp. 2591-2599.
8. Wilson, E.L., Habibullah, A., *SAP2000-Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Users Manual*, Computers & Structures Inc., Berkeley, California 1998.
9. Lee, D. G., Ahn, S. K., Kim, J. K., "An Efficient Modeling Technique for Floor Vibration in Multi-story Buildings," *Structural Engineering and Mechanics*, Vol.10, No.6, 2000, pp. 603-619.
10. Weaver, W. Jr., Timoshenko, S. P., Young, D. H., *Vibration Problems in Engineering*, John

- Wiley & Sons, Inc. 1990, 423pp.
11. Lee DG., "An Efficient Element for Analysis of Frames with Shear Walls," *ICES88, Atlanta*, April 1987.
 12. Zienkiewicz OC and Cheung YK., "The finite element method for analysis of elastic isotropic and orthotropic slabs," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Vol.28*, 1964, pp. 471-488.
 13. Weaver, W. and Johnston., P. R., *Structural Dynamics by Finite Elements*, Prentice-Hall, 1987, pp. 444-463.
 14. Weaver, W. and Johnston., P. R., *Finite Elements for Structural Analysis*, Prentice-Hall, 1984, pp. 78-82, pp. 205-209.