

필로티가 있는 전단벽의 효율적인 해석

Efficient Analysis of Shear Wall with Piloti

김 현 수*

이 동 근†

Kim, Hyun-Su

Lee, Dong-Guen

(논문접수일 : 2003년 6월 2일 ; 심사종료일 : 2003년 11월 28일)

요 지

현재 국내에서는 벽과 바닥판으로만 이루어진 벽식구조형식이 아파트 건물에 많이 적용되고 있다. 이와 더불어 최근에는 건축 계획적인 필요에 따라서 필로티가 있는 건물이 급격히 늘어나고 있다. 이런 건물은 전이보를 기준으로 상부층과 하부층의 구조적 특성의 급격한 변화가 발생하게 된다. 필로티가 있는 벽식건물을 정확하게 해석하기 위해서는 많은 수의 유한요소를 사용하여 구조물을 모형화하는 것이 필요하다. 그러나 구조물 전체를 수많은 요소로 세분하여 해석하는 것은 막대한 해석시간과 기억용량을 필요로 한다. 따라서 본 연구에서는 필로티가 있는 구조물에 효과적으로 적용할 수 있는 해석기법을 제시하고자 한다. 제안된 해석기법은 전이보를 슈퍼요소로 모형화하고, 각 부재 사이의 변형적합조건을 만족시키기 위하여 가상의 보를 사용하였다. 필로티가 있는 여러 가지 유형의 예제 모델을 사용하여 제안된 해석기법의 정확성을 검증하였다.

핵심용어 : 필로티, 전이보, 슈퍼요소, 행렬응축기법, 가상보

Abstract

The box system that consists only of reinforced concrete walls and slabs are adopted in many high-rise apartment buildings recently constructed in Korea. Recently, many of the box system buildings with pilotis has been constructed to meet the architectural design requirements. This structure has abrupt change in the structural properties between the upper and lower parts divided by transfer girders. For an accurate analysis of a structure with pilotis, it is necessary to have the buildings modeled into a finer mesh. But it would cost tremendous amount of computational time and memory. In this study, an efficient method is proposed for an efficient analysis of buildings those have pilotis with drastically reduced time and memory. In the proposed analysis method, transfer girders are modeled using super elements developed by the matrix condensation technique and fictitious beams are introduced to enforce the compatibility conditions at the boundary of each element. The analyses of example structures demonstrated that the proposed method used for the analysis of a structure with pilotis will provide analysis results with accuracy for the design of box system buildings.

Keywords : *pilotis, transfer girder, super element, matrix condensation, fictitious beam*

1. 서 론

최근에 인구의 고밀화 및 경제적 이유로 인하여 아파트 건물이 점차 그 규모가 커지고 고층화되어 가는 추세에 있다. 고층아파트 건물의 일반적인 구조형태로는 전단벽과 바닥판으로만 구성되는 벽식 구조가 주로 사용된다. 아파트의 고층화와 더불어 근래에는 건축 계획적인 필요에 따

라서 그림 1과 같이 필로티가 있는 구조물이 증가하고 있다. 필로티는 구조물의 1층에 주로 위치하며 평면상으로 대칭적으로 배치되는 것과 비대칭적으로 배치되는 것으로 크게 구분할 수 있다. 이런 필로티가 있는 구조물은 전이보(transfer girder)를 기준으로 상부층과 하부층의 구조적 특성이 급격히 변하게 된다. 따라서 필로티가 있는 구조물을 모형화할 때 전이보와 기둥을 일반적인 보요소로 모형

* 책임저자, 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 교수
TEL: 031-290-7554; FAX: 031-290-7570
E-mail: dglee@skku.ac.kr

† 정회원, 성균관대학교 건축공학과 BK21 박사 후 연구원

· 이 논문에 대한 토론을 2004년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2004년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

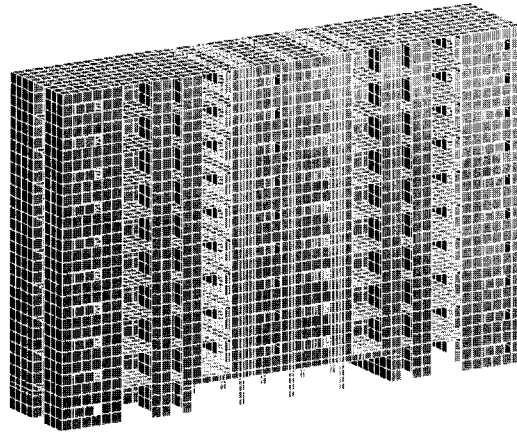


그림 1 필로티가 있는 벽식구조물

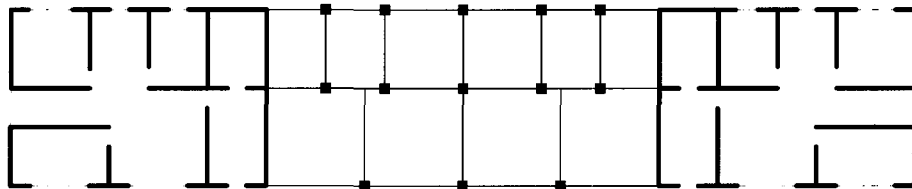


그림 2 필로티가 있는 층의 평면도

특성이 급격히 변하게 된다. 따라서 필로티가 있는 구조물을 모형화할 때 전이보와 기둥을 일반적인 보요소로 모형화하면 기둥 상단의 응력집중현상과 전이보의 응력상태 등 구조적 거동을 제대로 파악하기가 어렵다.

필로티가 있는 건물을 정확하게 해석하기 위해서는 구조물을 많은 수의 유한요소로 세분하여 모형화하는 것이 필요하다. 그러나 구조물 전체를 수많은 요소로 세분하여 해석하는 것은 막대한 해석시간과 컴퓨터 메모리를 필요로 하기 때문에 실무에 적용하기 곤란하다. 그리고 현재 실무에서 흔히 사용하는 모형화 방법들은 근사적인 방법이기 때문에 정확성에 한계를 가진다. 따라서 본 연구에서는 필로티가 있는 구조물에 효과적으로 적용할 수 있는 새로운 해석기법을 제시하고자 한다. 이를 위하여 상층부와 하층부간의 구조적 특성의 급격한 변화를 고려할 수 있도록 전이보의 새로운 모형화 방법을 제시하였다. 제안된 해석방법에서는 행렬응축기법을 이용하여 개발된 슈퍼요소를 사용하였고 전이보와 상부벽 그리고 전이보와 기둥 사이의 변형적합조건을 만족시키기 위하여 가상의 보^{1)~4)}를 도입하였다. 필로티가 있는 예제구조물에 대한 해석을 통하여 제안된 방법의 효율성과 정확성을 검증하였다.

2. 필로티가 있는 구조물의 거동

필로티가 있는 구조물과 같이 상부벽식-하부골조 시스템을 골조부분을 설계할 때에는 상부벽의 변형에 의한 영향

을 무시하고 상부벽체의 중량과 구조물에 가해지는 하중을 하부골조에 등분포하중으로 가하는 방법도 있다. 그러나 이러한 방법은 하중을 보의 단부쪽으로 재분배하는 상부벽의 아치작용(arching action)⁵⁾을 제대로 고려하지 못하므로 실제의 구조적 거동을 정확히 파악하기에는 적합하지 못하다. 이러한 문제들 때문에 상부벽식-하부골조 구조시스템의 설계를 할 경우에는 보다 정확한 해석을 위하여 상부벽과 하부골조를 동시에 모형화하여 해석하는 것이 필요하다. 이때 전이보를 모형화하기 위하여 평면응력요소 또는 보요소를 주로 사용하고 있다.

2.1 필로티가 있는 구조물의 대표적인 유형

필로티가 있는 구조물의 대표적인 유형을 그림 3과 같이 세 가지로 나누어 생각할 수 있으며 회색으로 표시한 부분은 전이보를 나타낸다. 필로티 유형 A는 1층 전체의 벽체를 제거하고 필로티로 대체한 경우이며 유형 B는 1층 벽체의 일부분을 필로티로 대체한 것이고 유형 C는 1층 벽체 전체를 필로티로 대체하고 전이보의 상부에 부분적으로 벽체가 존재하는 경우이다.

2.2 필로티가 있는 구조물의 변형형상 및 응력분포

필로티가 있는 구조물을 해석할 경우에는 필로티 부분을 상세하게 모형화하지 않지 않으면 기둥 상단의 응력집중현

상과 전이보의 응력상태 등을 제대로 파악하기가 어렵다. 그림 4는 필로티가 있는 구조물에 수직 하중이 가해졌을 경우에 대하여 상세해석을 통하여 계산된 변형형상과 Von-Mises 응력의 분포를 나타낸 것이다. 그림 4(a)의 필로티 유형 A에서는 전이보가 보의 역할보다는 상부벽체

와 연계하여 인장재의 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 그리고 기둥과 전이보의 모서리 연결부에 응력집중 현상을 피하기 위해 헌치(haunch) 형식의 보강이 필요함을 나타내고 있다. 필로티 유형 B와 C의 경우에도 실무에서 사용되고 있는 방법으로는 구조물의 정확한 거동을 파악할 수

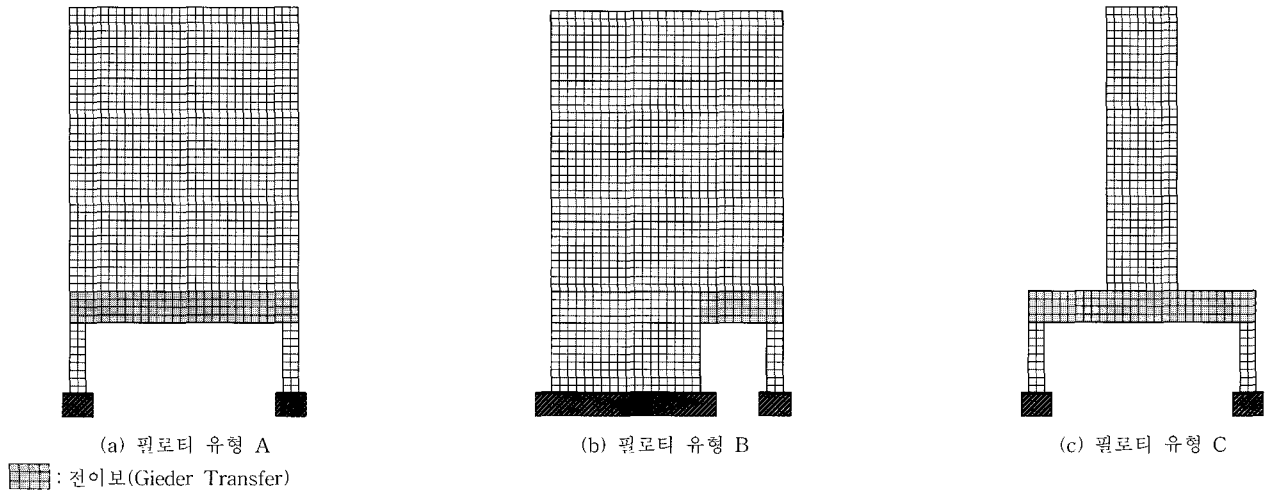


그림 3 필로티가 있는 구조물의 대표적 유형

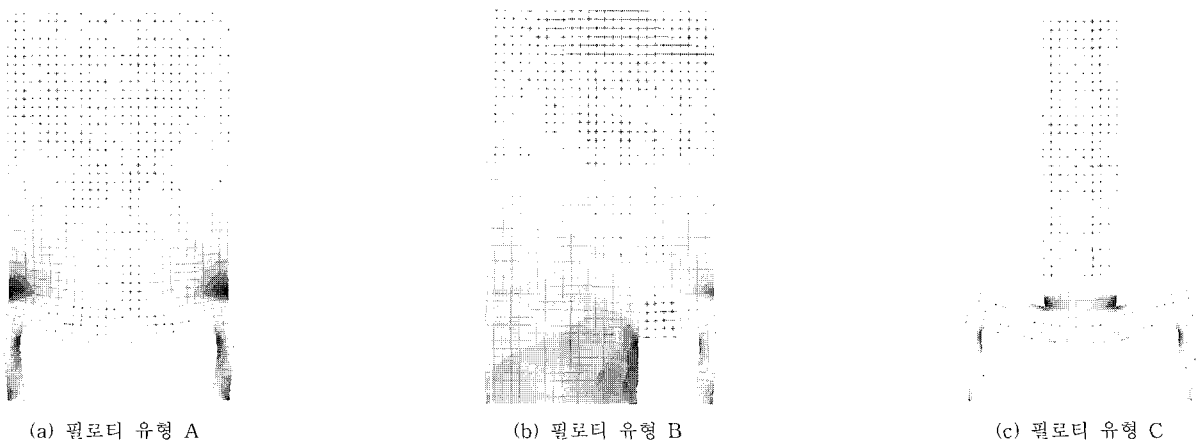


그림 4 연직하중에 대한 구조물의 유형별 변형형상 및 Von-Mises 응력 분포도

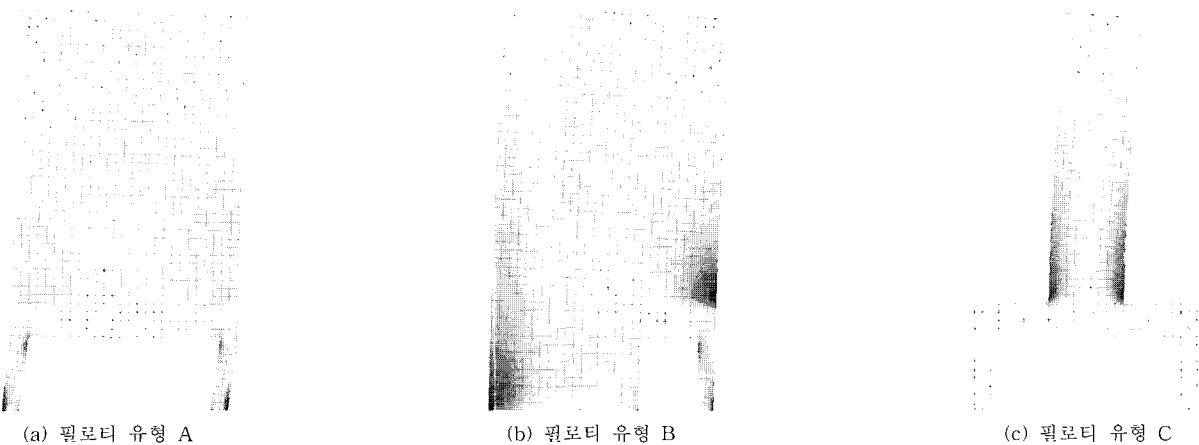


그림 5 수평하중에 대한 구조물의 유형별 변형형상 및 Von-Mises 응력 분포도

없다.

그림 5는 필로티가 있는 구조물에 수평하중이 가해졌을 경우에 대하여 상세해석을 통하여 계산된 Von-Mises 응력분포와 변형형상을 나타낸 것이다.

필로티가 있는 구조물에서 전이보를 단순히 보요소로 모형화해서는 그림에서 볼 수 있는 전이보나 상부벽체 그리고 기둥 상단등에 발생하는 응력집중현상을 파악할 수 없고, 구조적 불연속에 따른 응력의 흐름과 구조적 거동을 제대로 파악할 수가 없다. 그러므로, 이런 문제점들을 개선하면서도 해석상의 효율성을 유지하는 해석기법이 요구된다.

3. 필로티가 있는 구조물의 모형화

필로티가 있는 구조물을 정확하게 해석하기 위해서는 전단벽과 전이보를 여러 개의 유한요소로 세분해야 한다. 그러나 전단벽과 전이보를 여러 개의 요소로 세분하여 모형화할 때에 이들과 연결되는 바닥판과 보의 모델도 역시 세분화하여야 하므로 모형화에 불편이 따르게 되며 막대한 해석시간과 기억용량이 소요된다. 본 연구에서는 해석시간과 기억용량을 절약하고 해석의 정확성도 확보할 수 있는 슈퍼요소를 이용한 새로운 모형화 기법을 제안하였다.

3.1 필로티의 모형화

필로티가 있는 구조물의 정확한 해석을 수행하고자 한다면 그림 6(a)와 같이 기둥을 많은 수의 유한요소로 모형화하는 것이 필로티에서 발생하는 응력의 변화를 보다 상세하게 파악할 수 있으므로 바람직하다고 할 수 있겠다. 그러나 기둥을 여러 개의 유한요소로 세분하여 전체구조물을 모형화하고 해석을 수행하면 해석모델의 작성이 번거로울

뿐만 아니라 자유도수의 증가로 인하여 해석시간이 크게 증가하게 된다. 그리고 실무에서는 기둥에서 발생하는 응력이 아니라 부재력을 이용하여 기둥을 설계할 하기 때문에 유한요소를 사용하여 기둥을 모형화한 경우에는 응력을 증가의 부재력으로 치환하여 설계를 수행하여야하는 불편함이 있게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 그림 6(b)와 같이 필로티를 보요소로 모형화하여 해석하고 그 결과를 그림 6(a)의 모델을 사용하여 해석한 결과와 비교하여 정확성을 검증하기로 한다. 두 가지의 경우에 대하여 해석을 수행하고 횡변위와 기둥의 상하단에서 발생하는 응력을 비교하였다. 그림 6(c)에서 보는 바와 같이 필로티를 보요소로 모형화한 경우에 필로티를 평면응력요소로 모형화한 경우에 비하여 구조물의 횡변위를 약간 크게 평가하는 것을 볼 수 있다. 그리고 우측 기둥의 상부와 하부에서 발생하는 수직방향 응력을 표 1에 나타내었는데 기둥의 응력은 모델간에 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 모델 1에서는 기둥을 평면응력요소로 모형화하였기 때문에 기둥 상하부의 좌측과 우측에서의 수직방향 응력을 직접 구할 수 있다. 그러나 모델 2에 대해서는 기둥을 보요소로 모형화하였기 때문에 그림 7에 나타낸 것처럼 압축력에 의한 축응력과 휨모멘트에 의한 휨응력을 더하여 수직방향

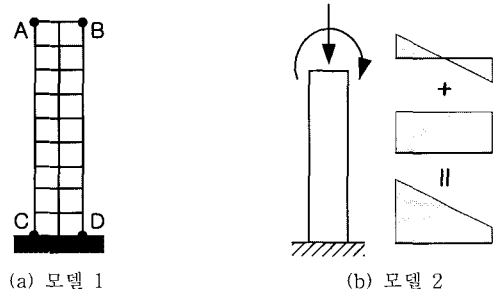


그림 7 기둥에서 발생하는 응력

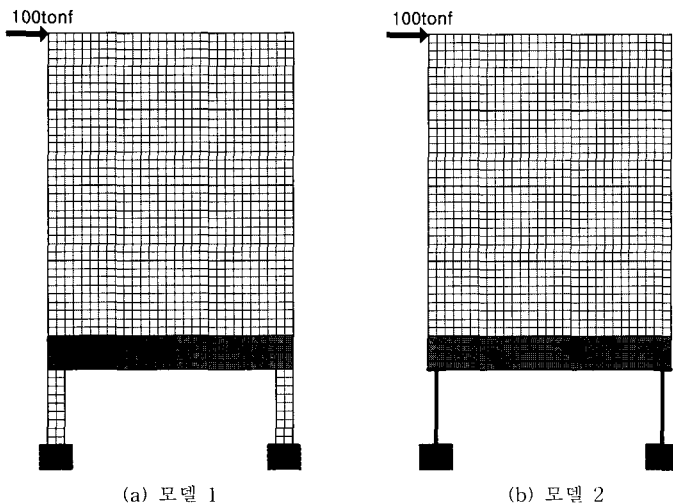


그림 6 기둥의 모형화 방법에 따른 정적 횡변위 비교

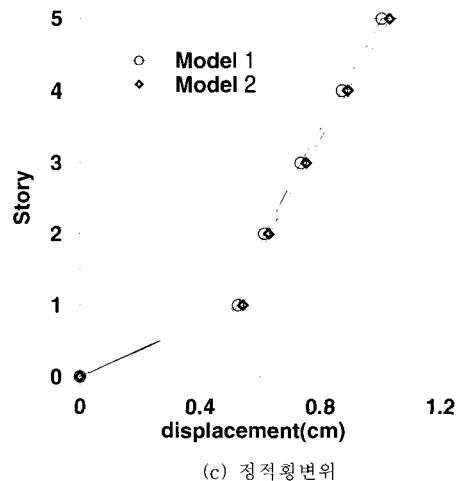


표 1 기둥의 응력 비교 (단위 : kg/cm^2)

위치	모델 1	모델 2
A	-0.234	-0.232
B	0.089	0.094
C	0.145	0.149
D	-0.239	-0.244

응력을 구할 수 있다. 해석결과에서 보는 바와 같이 기둥을 평면응력요소로 모형화하는 경우와 보요소로 모형화하는 경우에 있어서 약간의 차이가 있지만, 설계 결과에는 거의 영향을 미치지 않을 정도로 차이가 크지 않으므로 앞에서 설명한 몇 가지의 장점으로 인하여 필로티를 보요소로 모형화하는 것이 보다 합리적이라고 판단된다.

3.2 전이보의 모형화

필로티가 있는 구조물에 하중이 가해지는 경우에 전이보에서 불규칙한 응력의 변화가 많이 발생하기 때문에 전이보를 많은 수의 요소를 사용하여 세분한 후에 슈퍼요소로 만들어서 모형화하는 것이 필요하다. 전이보를 모형화하기 위하여 슈퍼요소를 사용한 방법을 각각의 필로티 유형별로 그림 8, 9, 10에 나타내었다. 그림 8은 슈퍼요소를 이용하여 필로티 유형 A를 모형화하는 과정을 나타낸다. 필로티가 있는 구조물을 그림 8(b)에서 보는 바와 같이 상부 벽체는 하나의 요소로 모형화하고 전이보는 다수의 요소로 세분하여 모형화한다. 기둥은 앞 절에서 설명한 바와 같이 보요소를 사용하여 모형화한다. 이때 세분한 전이보는 기둥 및 상부 벽체와 연결되는 되는데 필요한 절점만 남기고 나머지 절점은 행렬응축기법을 사용하여 소거함으로써 그림 8(c)와 같은 슈퍼요소를 만들 수 있다. 이렇게 생성된 슈퍼요소는 그림 8(d)와 같이 모서리 절점만 공유하여 조합함으로써 전체구조물을 모형화할 수 있다. 응력의 불규칙적인 변화가 가장 심하게 나타나는 필로티 부분을 유한요소로 세분한 슈퍼요소를 사용하여 모형화하면 전체 구조

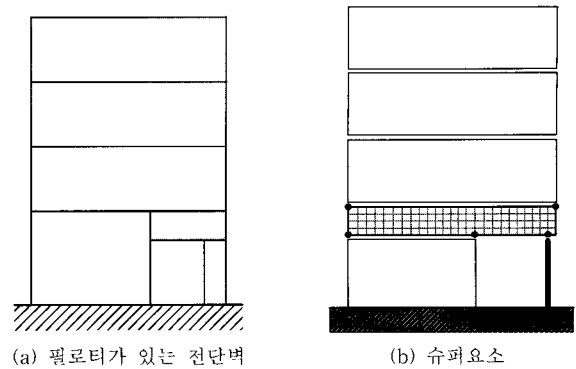


그림 9 필로티 유형 B의 모형화

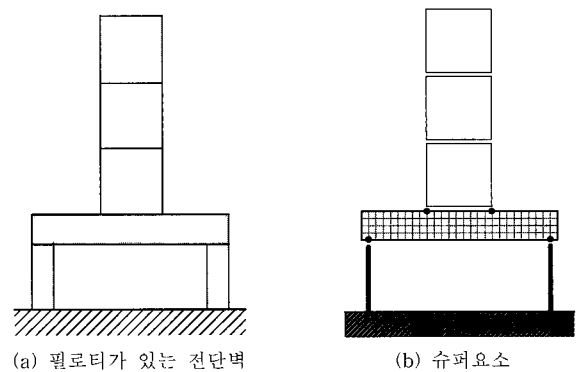


그림 10 필로티 유형 C의 모형화

물의 거동을 보다 정확하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

그림 9과 10은 각각 필로티 유형 B와 C에 대하여 같은 방법으로 모형화하는 것을 나타낸다. 필로티와 상부 벽체의 형태에 따라서 전이보를 모형화하는 슈퍼요소의 형태가 달라지는 것을 볼 수 있다. 즉 유형 B의 경우에는 1층 벽체의 일부분만이 필로티로 대체되어 있으므로 전이보와 1층 벽체의 연결에 필요한 절점이 남겨지게 된다. 유형 C의 경우에는 전이보의 상부에 벽체가 부분적으로 존재하므로 상부벽체가 슈퍼요소와 연결되는 부분의 절점이 남겨지게 된다.

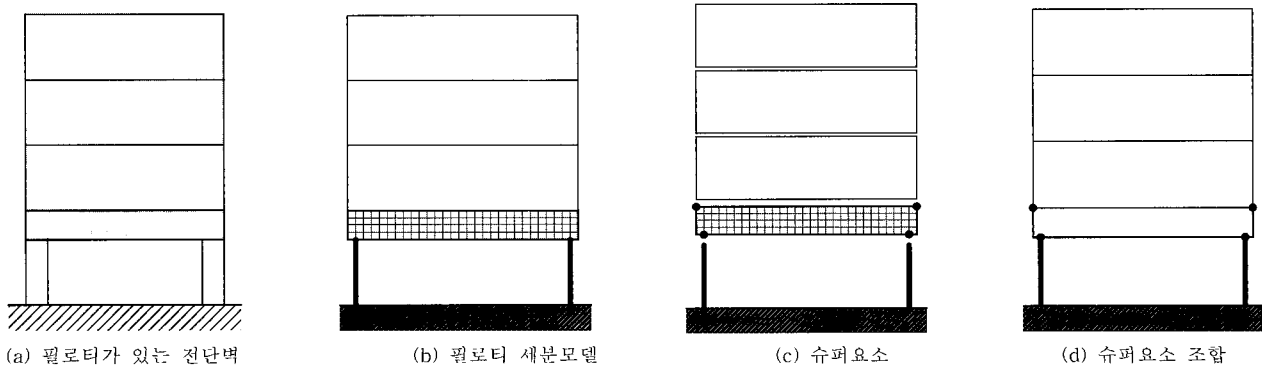


그림 8 슈퍼요소를 이용한 필로티 유형 A의 모형화

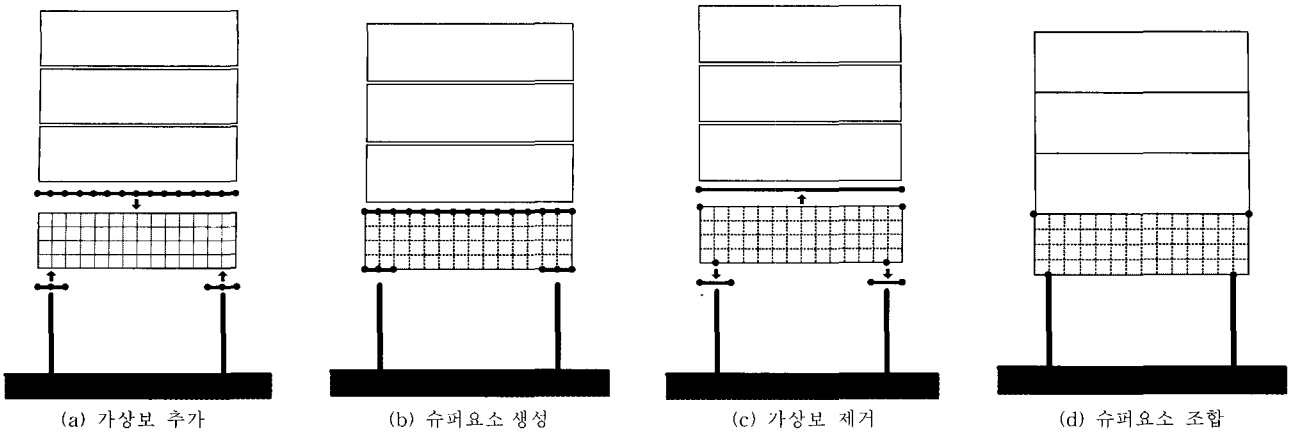


그림 11 전이보 슈퍼요소에 가상보를 사용한 필로티 유형 A의 모형화

3.3 변형적합조건을 만족시키기 위한 가상보 사용

본 논문에서는 다수의 유한요소로 모형화한 전이보와 하나의 유한요소로 모형화한 상부벽체의 경계부분에서 변형적합조건을 만족시키기 위하여 가상보를 사용하였다. 필로티가 있는 구조물을 슈퍼요소로 변환하는 과정에서 가상보가 어떻게 사용되는지를 유형별로 각각 그림 11, 12, 13에 나타내었다. 먼저 그림 11은 전이보를 모형화한 슈퍼요소에 가상보를 사용하여 필로티 유형 A를 모형화하는 과정이다. 상부벽체는 층당 하나의 평면응력요소로, 기둥은 보요소로 모형화하였다. 우선 그림 11(a)와 같이 세분한 전이보와 상부벽체가 접하게 되는 경계부분에 가상보를 추가한다. 또한 기둥과 전이보가 만나는 부분도 해석모델에서는 하나의 절점을 통해서만 연결이 되지만 실제로는 기둥 단면 전체가 전이보와 접합이 되어 있으므로 기둥과 전이보가 만나는 부분에도 기둥 단면의 크기만큼 전이보에 가상보를 추가한다. 그림 11(b)와 같이 행렬응축을 하여 상부 벽체 및 기둥과 연결되는 부분의 자유도만을 남기고 나머지 자유도는 모두 소거함으로써 슈퍼요소를 생성할 수 있다. 슈퍼요소의 강성행렬을 구성하는 최종단계에서 가상보에 의하여 추가된 강성을 제거한다. 제거되는 가상보는 추가된 가상보와는 달리 그림 11(c)에서 보는 바와 같이 내부 절점이 없는 보이다. 이러한 작업을 거치면 가상보가 추가되는 부분의 변형형상은 보의 변형형상인 3차곡선을 나타내게 된다. 그림 12와 13은 각각 필로티 유형 B와 C에 가상보를 사용하는 방법을 나타낸 그림이다. 가상보를 추가하거나 제거하여 슈퍼요소를 만드는 방법은 필로티 유형 A와 같지만 전이보를 모형화한 세분모델에 가상보가 추가되는 위치가 전이보와 연결되는 벽의 형태에 따라서 달라지는 것을 알 수 있다.

그림 14는 필로티가 있는 구조물에 대한 가상보 사용의 효율성을 검증하기 위해 나타낸 그림이다. 그림 14(a)는

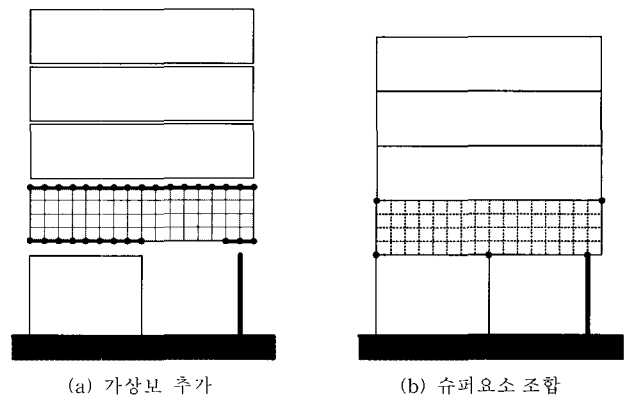


그림 12 필로티 유형 B의 모형화

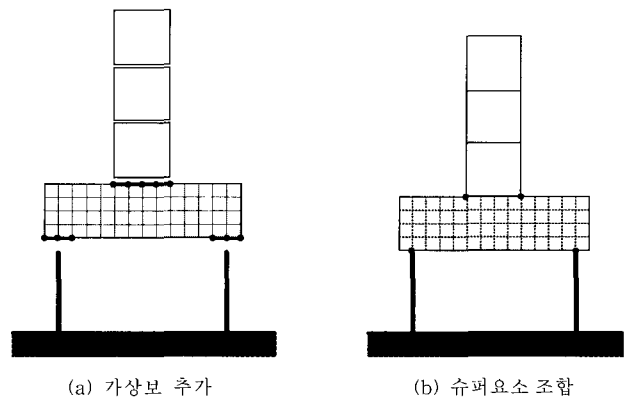


그림 13 필로티 유형 C의 모형화

전체구조물을 세분한 모델로서 가장 정확한 해석결과를 나타낼 것으로 판단된다. 그림 14(b)는 전이보를 세분하여 슈퍼요소로 만들어서 모형화하고 상부벽체는 하나의 평면응력요소로 모형화하였다. 이 모델에는 가상보를 사용하지 않았고 기둥은 보요소로 모형화하였다. 그림 14(c)는 전이보와 상부 벽체 및 기둥이 만나는 경계부분에 가상보를 사용한 모델이다. 슈퍼요소만 사용한 그림 14(b)의 모델은 슈퍼요소와 상부벽체의 경계부분에서 변형적합조건을 만족시키지 못하는 것을 볼 수 있다. 가상보를 슈퍼요소 경계부

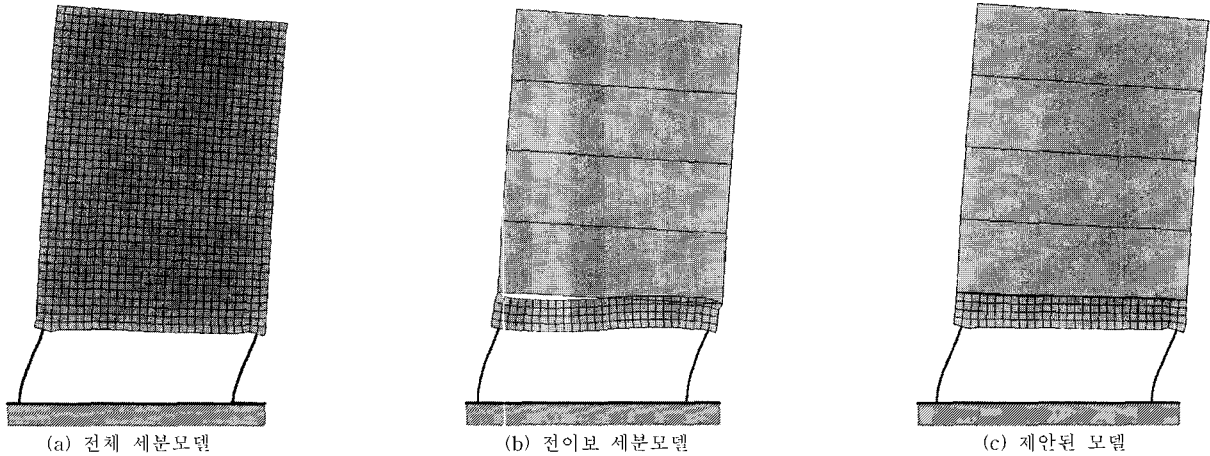


그림 14 가상보의 효용성 검증

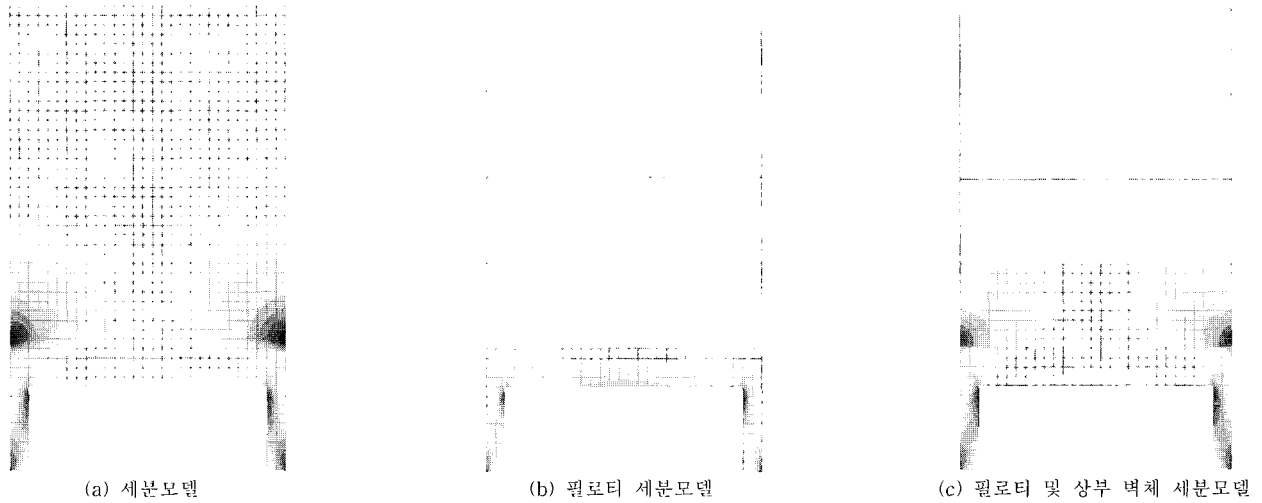


그림 15 연직하중에 대한 모형화 방법별 Von-Mises 응력 분포도

분에 사용한 그림 14(c)는 전이보와 상부벽체, 전이보와 기둥에서의 변형적합조건을 상당히 만족시키는 것을 확인할 수 있다.

3.4 상부벽체의 모형화

지금까지는 앞에서 설명한 바와 같이 필로티와 연결되는 상부벽체를 층 당 한 개의 요소로 모형화하였다. 그러나 본 논문의 2.2절에서 설명한 필로티가 있는 구조물의 거동을 생각해보면 응력의 분포는 전이보 뿐만 아니라 전이보와 연결되는 상부 1개 층의 벽체에서도 매우 불규칙적이고 응력집중현상도 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 필로티가 있는 구조물의 보다 정확한 해석을 위해서는 전이보 뿐만 아니라 최소한 전이보와 연결되는 상부벽체의 1개 층이라도 유한요소로 세분하여 모형화하는 것이 필요하다. 그림 15는 연직하중에 대한 모형화 방법별 Von-Mises 응력 분포도를 나타낸다. 그림 15(a)의 세분모델이 가장 정확한

결과를 나타내리라고 생각할 수 있다. 앞에서 설명한 다수의 유한요소로 만든 슈퍼요소를 사용하여 필로티를 모형화한 모델을 그림 15(b)에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 슈퍼요소를 사용하여 모형화한 필로티에서는 응력의 분포를 세분모델과 거의 비슷하게 표현할 수 있다. 그러나 층 당 하나의 요소로 모형화한 상부벽체에 발생하는 응력의 분포는 제대로 표현하지 못한다. 전이보 및 전이보와 연결되는 상부벽체 1개 층에만 슈퍼요소를 사용하여 모형화한 모델을 그림 15(c)에 나타내었다. 그림을 보면 전이보와 연결되는 상부벽체에서 발생하는 응력집중현상을 상당히 정확하게 나타낼 수 있는 것을 알 수 있다. 그림 15(a)에서 보는 바와 같이 3층 이상의 벽체에서는 큰 응력의 변화가 없기 때문에 층 당 하나의 요소만을 사용하여 모형화하는 것이 더욱 효율적이라고 판단된다. 전이보와 연결되는 상부벽체를 다수의 유한요소로 세분하여 모형화하여도 앞에서 설명한 방법으로 슈퍼요소를 이용하여 모형화하기 때문에 슈퍼요소를 만들 때 약간의 시간을 더 소비하지만 행

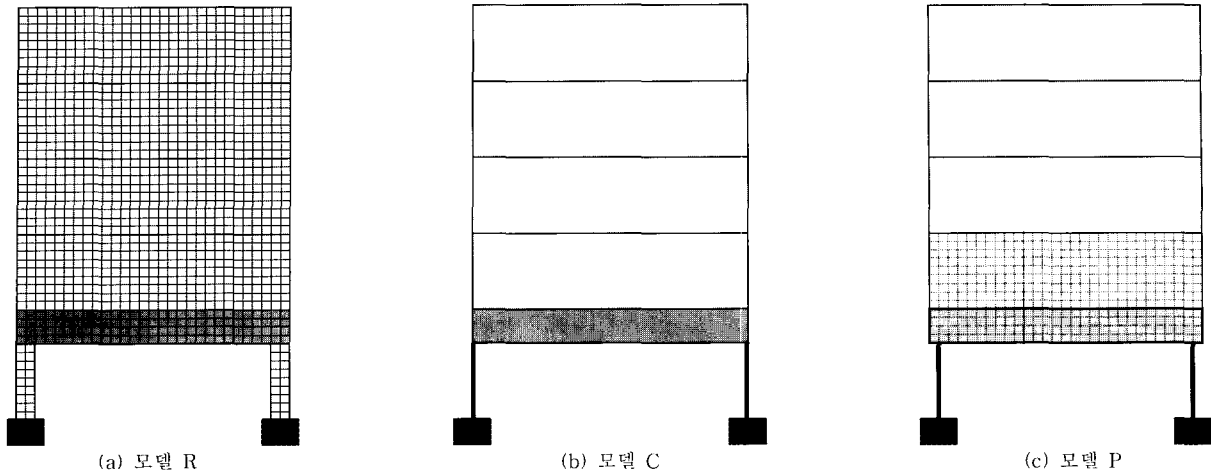


그림 16 해석모델의 종류

렬응축 후 구조물의 전체 자유도는 변화가 없으므로 해석 시간에 큰 영향을 미치지 않게 된다.

4. 예제해석

필로티가 있는 구조물을 몇 가지 모형화방법으로 해석하여 제안된 해석기법의 정확성을 검증하여 보았다. 앞에서 제시한 필로티가 있는 구조물의 대표적인 유형 세가지를 사용하여 횡력에 대한 2차원 정적 및 동적해석을 수행한 후 해석결과를 비교하여 보았다. 해석프로그램은 본 연구실에서 개발한 전단벽식 구조물 전용해석프로그램인 SWAN을 이용하였다.

4.1 해석모델

본 논문에서 사용한 해석 모델을 그림 16에 나타내었다. 그림 16(a)와 같이 유한요소로 세분하여 가장 정확한 해석 결과를 보일 것으로 판단되는 모델을 모델 R이라고 하였다. 모델 C는 실무에서 주로 사용되고 있는 방법으로서 전이보를 보요소 대신에 평면응력요소로 사용하여 모형화하고 기둥을 보요소로 모형화하는 방법이다. 모델 P는 본 논문에서 제안하는 모델로서 그림 8과 그림 11의 모형화 과정을 통하여 전체 구조물을 모형화하는 방법이다. 전이보 및 전이보와 연결되는 상부벽체는 평면응력요소로 세분한 슈퍼요소로 모형화하고 나머지 상부벽체는 층당 하나의 평면응력요소요소로 모형화하였으며, 기둥은 보요소로 모형화 하였다. 이때 전이보와 상부 벽체가 만나는 부분은 변형 적합조건을 만족시키기 위하여 가상보를 사용하였고, 기둥과 전이보가 만나는 부분도 실제 기둥의 단면 크기만큼의 가상보를 전이보에 추가하였다. 각 모델별 자유도 수는 표 2와 같다.

표 2 모델별 자유도수 비교

모델명	필로티 유형 A	필로티 유형 B	필로티 유형 C
모델 R	3,834	4,242	1,674
모델 C	36	54	48
모델 P	36	54	48

4.2 필로티 유형별 정적 해석

다양한 형태의 필로티가 있는 구조물에 대하여 앞 절에서 제시한 모형화방법으로 해석한 후 결과를 비교해 보았다. 양단 기둥에 의해서 지지되는 일반적인 필로티 구조물에 대해 최상층에 100tonf의 횡하중을 주었을 때, 발생하는 모델별 변위를 그림 17(b)에 나타내었다. 가장 정확한 해석결과를 나타낼 것으로 생각되는 모델 R과 비교하여 보았을 경우에 실무에서 일반적으로 사용하는 모델인 모델 C는 횡방향 강성이 비교적 과대평가되어 횡변위가 작게 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 모형화할 때 사용한 평면응력요소의 개수와도 관계가 있는데 일반적으로 유한요소의 수를 점점 많이 사용하여 모형화 할수록 특정한 개수가

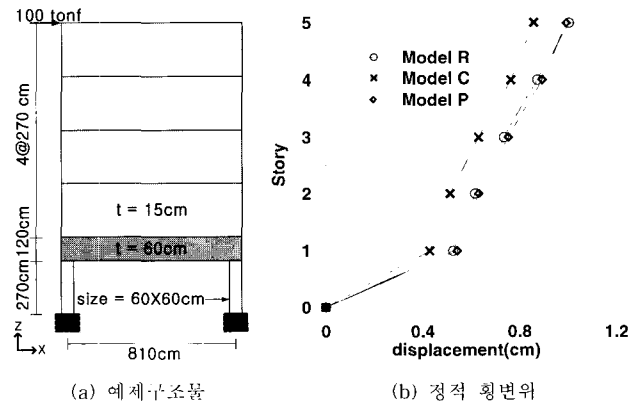


그림 17 횡하중에 의한 필로티 유형 A의 층변위 비교

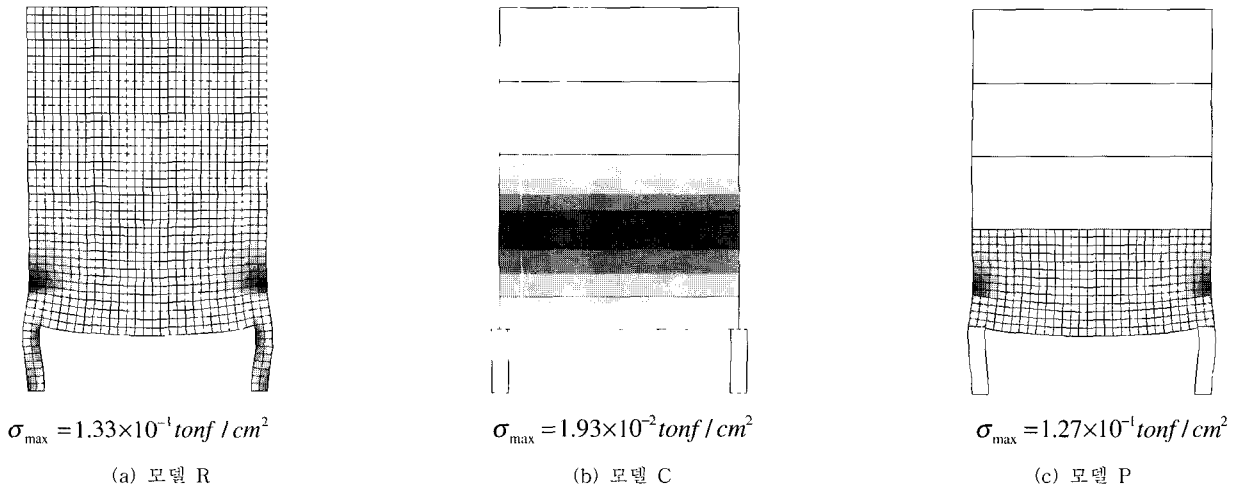


그림 18 수직하중에 의한 필로티 유형 A의 변형형상 및 Von-Mises응력 최대값

지는 구조물의 강성이 작게 평가되는 경향이 있다. 본 논문에서 제안한 모델인 모델 P는 모델 R과 유사한 해석 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 가장 복잡한 응력분포를 나타내는 전이보 및 전이보와 연결되는 상부벽체를 평면응력요소로 세분하여 만든 슈퍼요소를 사용하여 모형화하였기 때문으로 판단된다. 그림 18은 수직하중에 대하여 필로티 유형 A의 변형형상 및 응력의 분포를 나타낸다. 수직하중에 대해서도 모델 P가 모델 R의 결과와 유사한 결과를 나타내었고 특히, 전이보 및 상부벽체에서 발생하

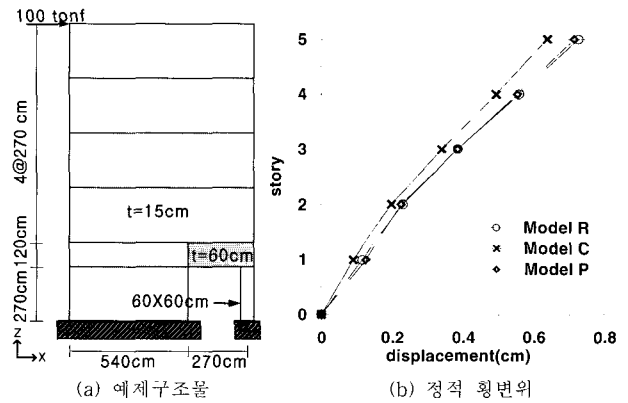


그림 19 횡하중에 의한 필로티 유형 B의 층변위 비교

표 3 횡하중에 의한 기둥의 응력 비교 (단위: kg/cm²)

위치	모델 R		모델 C		모델 P	
	응력	오차(%)	응력	오차(%)	응력	오차(%)
A	-0.234	-2.56	-0.228	-2.56	-0.230	-1.71
B	0.089	59.55	0.142	59.55	0.098	10.11
C	0.145	3.45	0.150	3.45	0.151	4.13
D	-0.239	-2.93	-0.232	-2.93	-0.245	2.51

는 응력집중현상을 상당히 정확하게 나타낸다는 것을 확인할 수 있다. 이에 반하여 모델 C는 벽체에서 발생하는 Von-Mises응력의 분포를 제대로 나타내지 못하므로 응력집중현상을 고려할 수도 없고 최대 응력값도 모델 R에 비하여 상당히 과소평가하기 때문에 모델 C의 해석결과를 사용하

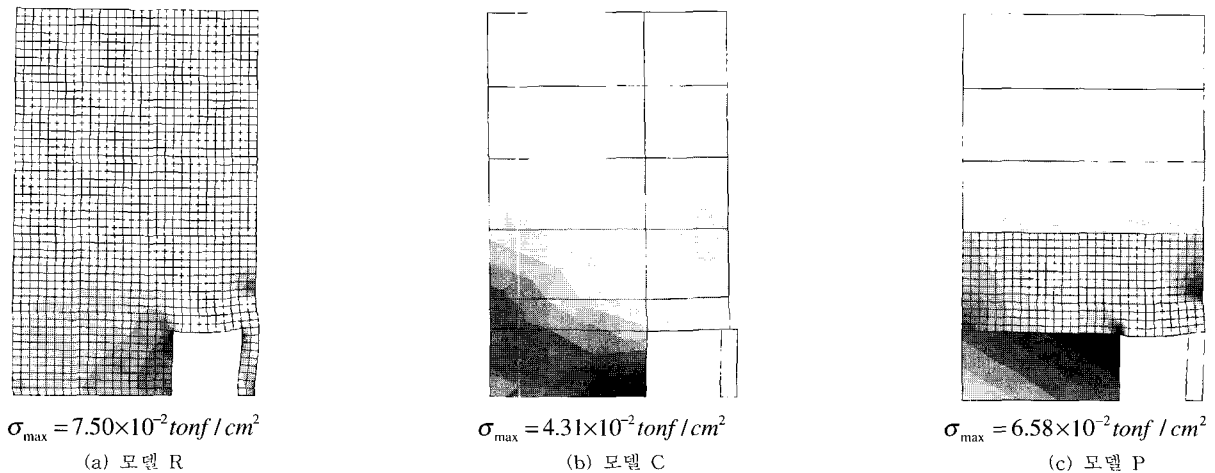


그림 20 수직하중에 의한 필로티 유형 B의 변형형상 및 Von-Mises응력 최대값

여 설계를 수행할 경우에는 주의를 기울여야 할 것으로 판단된다.

표 3은 그림 17의 예제구조물의 해석을 수행하여 우측 기둥의 상부와 하부에 작용하는 수직응력에 대해 각 모델 별로 해석결과를 비교하여 나타낸 것이다. 응력을 계산하는 방법 및 위치는 그림 7과 같다. 표에서 보는 것과 같이 기둥의 축응력은 모델간에 큰 차이가 없으나 B위치에서는 모델C의 오차가 비교적 큰 것을 알 수 있다. 그림 19와 20은 필로티가 편심으로 배치된 경우에 횡하중 및 수직하중에 의한 해석결과를 나타낸 것이다. 필로티가 편심으로 배치된 경우에도 모델 C가 다른 모델에 비하여 횡변위를 작게 평가하였고, 제안된 모델인 모델 P가 모델 R에 가장 가까운 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 그림 20을 보면 모델 P가 전이보와 상부벽체에서 발생하는 불규칙한 응력의 분포와 응력집중현상을 비교적 우수하게 표현할 수 있는 것을 알 수 있다. 그림 21과 22는 필로티 유형 C인 필로티 상부벽이 일부분만 있는 경우에 대하여 해석한 결과를 나타내었다. 이 경우에도 모델 P의 결과가 모델 R과

매우 비슷하다. 그림 22를 보면 모델 C는 응력의 분포를 전혀 나타내지 못할 뿐만 아니라 응력의 최대값도 모델 R의 14%정도 밖에 안 되기 때문에 이 결과를 설계에 사용할 때에는 큰 오류를 범하게 된다. 이상의 결과로 본 논문에서 제안하는 해석 기법은 필로티의 유형에 상관없이 적용할 수 있다고 판단된다.

4.3 필로티 유형별 동적 해석

본 논문에서 제안된 해석 방법이 구조물의 동적 거동을 예상하는 데에도 적용이 될 수 있는지를 검토하기 위하여 예제구조물을 대상으로 고유치해석 및 시간이력해석을 수행하였다. 시간이력해석에서는 그림 23과 같이 El Centro (NS, 1940) 지진하중을 이용하였고 본 논문에서 제안된 방법의 효율성을 검증하기 위하여 해석시간을 세분모델과 비교하였다. 그림 24는 양단지지형 필로티를 가진 구조물에 대해 동적해석을 수행한 결과이다. 그림 24(b)에 고유치 해석결과를 나타내었다. 정확해라고 생각되는 모델 R과 본 논문에서 제안한 슈퍼요소와 가상보를 사용한 모델 P가 비슷한 결과를 나타내는 것을 볼 수 있다. 최상층 변위시간 이력을 나타내는 그림 24(c)에서도 거의 비슷한 결과를 보이고 있다. 이에 비하여 모델 B의 경우는 최상층 변위시간 이력이 다른 두 모델에 비하여 상당히 작게 발생하는 것을 볼 수 있다.

필로티가 편심으로 배치된 구조물의 동적해석 결과를 그림 25에 나타내었다. 고유치해석 결과와 최상층 변위시간 이력을 비교한 결과를 보면 양단지지형 필로티를 가진 구조물과 마찬가지로 모델 R과 모델 P 사이에 차이가 거의 없는데 비하여 실무에서 주로 사용되는 모델인 모델 C는 오차가 많이 발생하는 것을 알 수 있다. 그림 26에서 보는

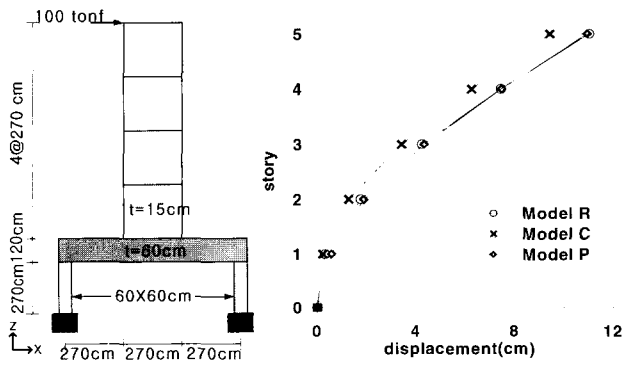


그림 21 횡하중에 의한 필로티 유형 C의 층변위 비교

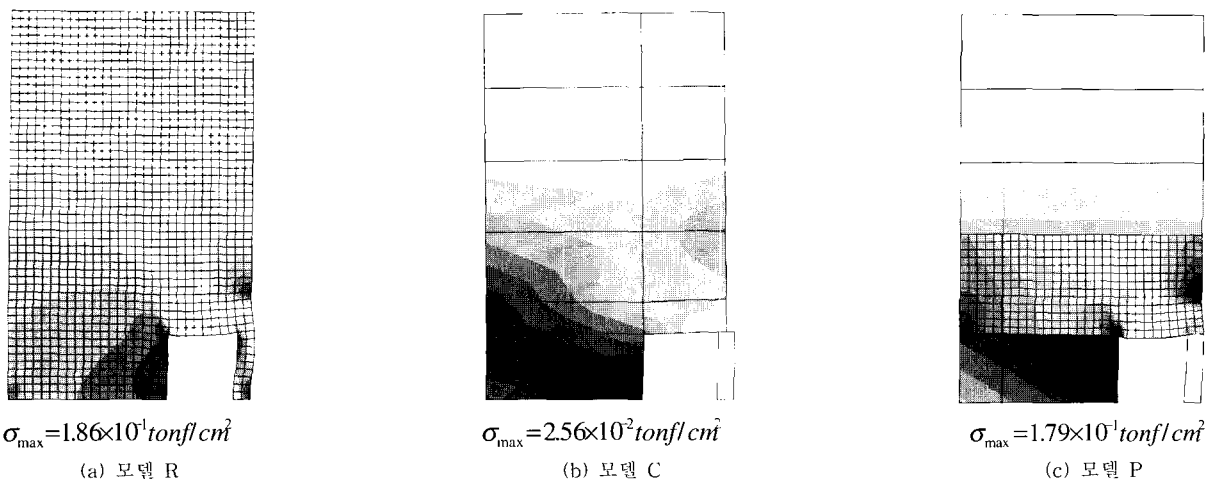
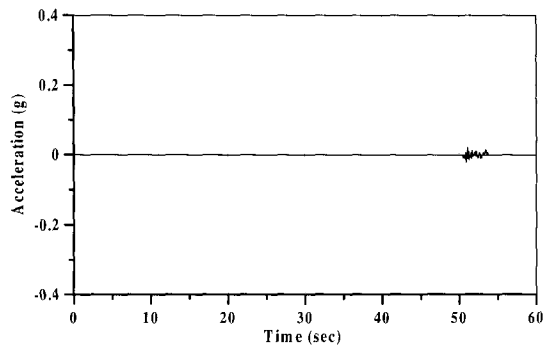
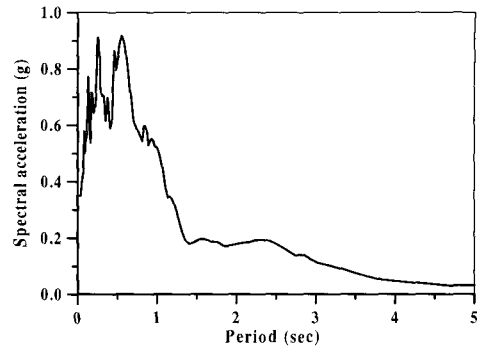


그림 22 수직하중에 의한 필로티 유형 C의 변형형상 및 Von-Mises응력 최대값

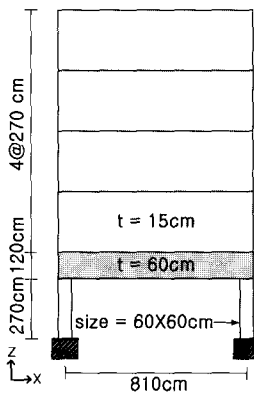


(a) 가속도 시간이력 곡선

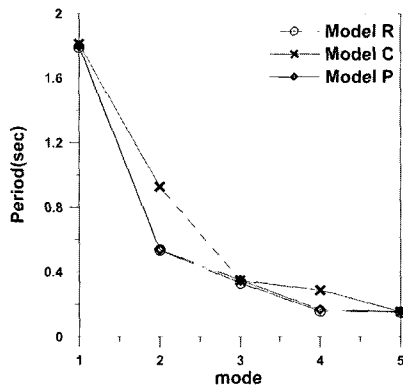


(b) 응답스펙트럼 곡선

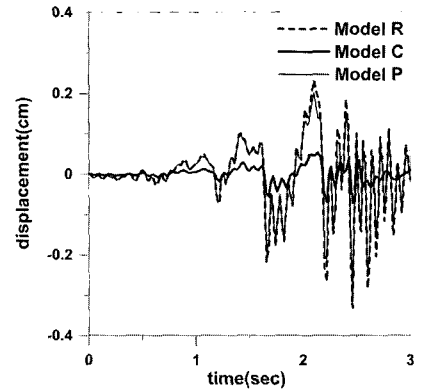
그림 23 El Centro(NS, 1940) 지진하중



(a) 예제구조물

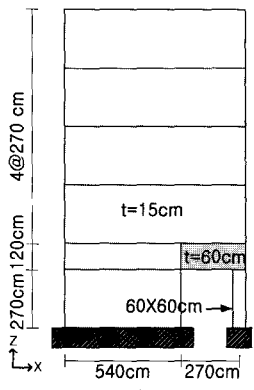


(b) 고유치 해석

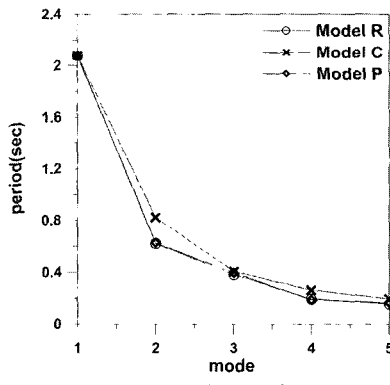


(c) 최상층 변위시간이력

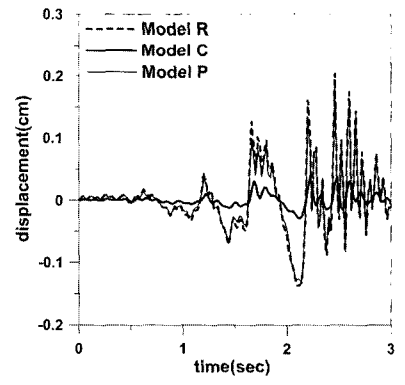
그림 24 양단지형 필로티를 가진 구조물의 동적해석



(a) 예제구조물

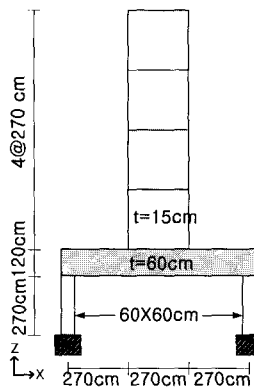


(b) 고유치 해석

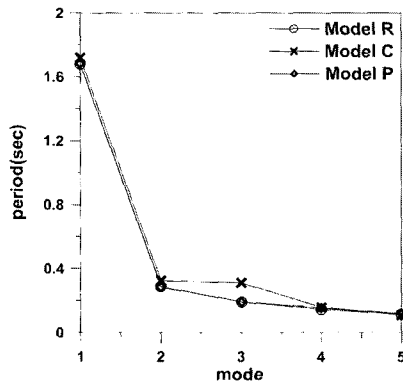


(c) 최상층 변위시간이력

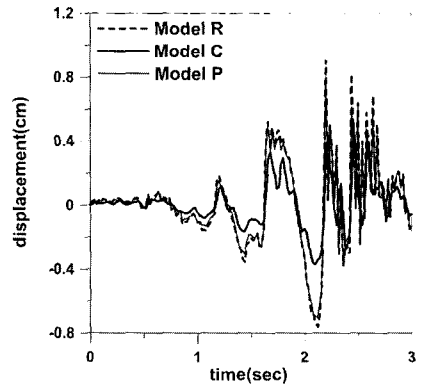
그림 25 필로티가 편심으로 배치된 구조물의 동적해석



(a) 예제구조물



(b) 고유치 해석



(c) 최상층 변위시간이력

그림 26 필로티 상부벽이 일부분만 있는 구조물의 동적해석

표 4 해석시간의 비교

(단위:초)

필로티 유형	모델명	해석시간				
		강성·질량 행렬구성	평형방정식	고유치 해석	시간이력 해석	전체
A	모델 R	64.45	47.59	989.17	105.31	1206.52
	모델 C	0.29	0.01	0.49	0.99	1.78
	모델 P	0.44	0.01	0.53	1.13	2.11
B	모델 R	25.50	7.45	280.50	43.42	356.87
	모델 C	0.40	0.02	0.71	1.21	2.34
	모델 P	0.62	0.02	0.80	1.35	2.79
C	모델 R	69.65	48.61	1116.04	118.20	1352.50
	모델 C	0.60	0.02	0.78	1.45	2.85
	모델 P	0.63	0.02	0.86	1.50	3.01

바와 같이 필로티 상부의 일부분에만 벽체가 있는 구조물에서도 본 논문에서 제안한 모델 P와 정확해라고 판단되는 모델 R이 유사한 결과를 나타내고 있다.

표 4는 필로티 유형별 동적해석에 대한 해석시간을 비교한 것이다. 세분모델인 모델 R은 자유도수가 가장 많기 때문에 해석시간이 많이 소요되었다. 단순모델인 모델 C는 해석의 효율성은 높으나 앞에서 살펴본 바와 같이 횡방향 강성을 과대평가하여 정확한 해석결과를 얻을 수 없었다. 본 논문에서 제안한 해석기법을 적용한 모델 P는 세분모델에 비해 매우 적은 해석시간을 소요하였고, 해석결과도 정확해라고 판단되는 모델 R과 유사한 것을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 해석기법을 이용하면 해석의 정확성을 유지하면서 해석시간을 크게 줄일 수 있음을 확인할 수 있다. 또한 이러한 경향은 건물이 커지고 복잡해져서 자유도 수가 증가하면 더욱 커지리라고 예상된다.

5. 결론 및 추후 연구과제

본 논문에서는 필로티가 있는 구조물의 효율적인 해석을 위하여 슈퍼요소와 가상보를 사용한 해석기법을 제안하였고 예제구조물의 해석을 통하여 제안된 해석기법의 정확성과 효율성에 대하여 검토하였다. 본 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 필로티가 있는 구조물을 모형화할 경우 전이보를 하나의 판요소나 보요소로 모형화하면 세분모델 보다 구조물의 횡강성을 과대평가하게 된다. 따라서 세분모델에 비하여 횡방향 변위가 작게 발생하게 된다.
- 2) 본 연구에서 제안한 해석기법을 이용하면 정적해석 및 동적해석에서 세분모델과 유사한 해석결과를 얻을 수 있다. 또한 슈퍼요소를 이용하여 모형화하기 때문에 고려해야할 자유도수가 크게 줄어 해석시간 및 컴퓨터 메

모리를 절약할 수 있다.

- 3) 전이보와 기둥, 전이보와 상부벽체간의 공유절점 최소화로 인하여 발생하는 변형적합조건의 불일치는 가상보를 사용하여 해결이 가능하였고, 경계부분의 전체 절점을 공유한 세분모델과 유사한 해석결과를 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 두뇌한국 21사업 핵심분야 사업비와 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원에 의하여 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 1) Lee, D. G., Kim, H. S., "Efficient Seismic Analysis of High-Rise Shear Wall Buildings considering the Flexural Stiffness of Floor Slabs", *Proceeding of the Sixth Asian Pacific Conference on Shell and Spatial Structures, APCS 2000*, Seoul, October, 2000
- 2) Lee, D. G., Kim, H. S. and Chun, M. H., "Efficient Seismic Analysis of High-Rise Shear Wall Buildings considering the Flexural Stiffness of Floor Slabs", *Engineering Structures*, Vol.24, No.5, 2002, pp.613~623
- 3) Kim, H. S., Lee, D. G., "Efficient Analysis of Shear Walls with Openings", *Engineering Structures*, Vol.25, No.8, 2003, pp.981~991
- 4) 김현수, 남궁계홍, 이동근, "개구부가 있는 고층 벽식 구조물의 효율적인 3차원 해석", 한국전산구조공학회

논문집, 제15권, 제3호, 2002, pp.351~365

- 5) Green, D. R., "The Interaction of Solid Shear Walls and their Supporting Structures", *Build. Sci.* Vol.7, 1972, pp.239~248
- 6) Weaver, W., Jr., Lee, D. G., and Derbalian, G., "Finite element for shear walls multistory frames", *Journal of the Structural Division ASCE*, Vol.107, 1981, pp.1365~1369
- 7) Lee, D. G., "An Efficient Element for Analysis of Frames with Shear Walls", *ICES88*, Atlanta, April, 1988
- 8) Weaver, W., Jr., Gere, James M., *Matrix Analysis of Framed Structures*, Van Nostrand Reinhold, Third Edition, 1990
- 9) Weaver, W., Jr., Johnson, Paul R., *Structural Dynamics by Finite Elements*, Prentice Hall, 1987
- 10) Weaver, W., Jr., Johnsonston, *Finite Elements for Structural Analysis*, Prentice Hall, 1984