

개구부가 있는 벽식구조물의 3차원해석을 위한
슈퍼요소와 부분구조의 이용
Use of Super Elements and Substructures for
Three Dimensional Analysis of the Box System with Openings

이 동 근*
Lee, Dong-Guen

김 현 수**
Kim, Hyun-Su

남 궁 계 홍***
Nam-Gung, Kye-Hong

ABSTRACT

The box system that is composed only of reinforced concrete walls and slabs are adopted on many high-rise apartment buildings recently constructed in Korea. And the framed structure with shear wall core that can effectively resist horizontal forces is frequently adopted for the structural system for high-rise building structures. In these structures, a shear wall may have one or more openings for functional reasons. It is necessary to use subdivided finite elements for accurate analysis of the shear wall with openings. But it would take tremendous amount of computational time and memory if the entire building structure is subdivided into a finer mesh. An efficient analysis method that can be used regardless of the number, size and location of openings is proposed in this study. The analysis method uses super element, substructure, matrix condensation technique and fictitious beam technique. Three-dimensional analyses of the box system and the framed structure with shear wall core having various types of openings were performed to verify the efficiency of the proposed method. It was confirmed that the proposed method have outstanding accuracy with drastically reduced time and computer memory from the analyses of example structures.

1. 서 론

최근 우리 나라에서는 인구의 고밀화 및 경제적 이유로 인하여 아파트 건물의 규모가 커지고 고층화되어 가는 추세에 있다. 고층아파트 건물의 일반적인 구조형태는 전단벽과 바닥판으로만 구성되는 벽식 구조가 주로 사용된다. 이러한 벽식 구조물의 내 외부 전단벽에는 그림 1(a)과 같이 건축계획의 필요에 의하여 창문, 출입문, 복도 또는 설비 덕트 등으로 사용되는 개구부가 발생하게 된다.

* 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 교수

** 정회원 · (주) 마이다스아이티 개발1팀 대리

*** 성균관대학교 건축공학과 석사과정

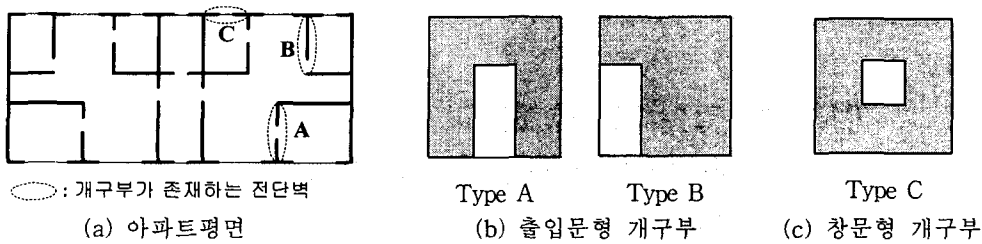


그림 1. 개구부가 있는 전단벽

아파트 건물에 흔히 발생하게 되는 출입문 형식과 창문 형식의 개구부를 그림 1(b)와 (c)에 나타내었다. 발생하는 개구부의 개수, 위치, 크기는 벽체의 내부응력 뿐만 아니라 전체 건물의 거동에도 영향을 미치게 된다. 개구부가 있는 전단벽을 정확하게 해석하기 위해서는 평면응력요소로 전단벽을 세분하여 모형화하는 것이 필요하다. 그러나 벽식 구조물 전체를 수많은 요소로 세분하여 해석하는 것은 막대한 해석시간과 컴퓨터 메모리를 필요로 하기 때문에 효율적인 해석에 관한 연구가 여러 연구자에 의해서 수행되어 왔다.^{(1),(2),(3),(4)} 그러나 이러한 연구에서 제안하는 해석 방법의 효율성 및 정확성은 개구부 크기와 위치에 따라서 대부분 크게 변하였다. 그림 2는 실무에서 많이 이용되는 개구부가 있는 전단벽의 근사적인 모형화 방법들이다. 그림 2(a)에서는 개구부의 크기가 전단벽에 비해 상대적으로 작은 경우, 개구부가 무시되는 경우이다. 그림 2(b)는 개구부의 크기가 전단벽에 비해 상대적으로 큰 경우로서 이때에는 춤이 작은 전단벽을 등가의 보로 치환하여 모형화 한다. 그러나, 이러한 모형화 방법들은 근사적인 방법이기 때문에 정확성에 한계를 갖는다.

본 논문에서는 앞에서 언급한 문제들을 해결하면서 전단벽에 존재하는 개구부의 크기, 위치 및 개수에 상관 없이 적용할 수 있는 해석기법을 제시하였다. 제안된 해석기법은 효율적인 해석을 위하여 슈퍼요소와 부분구조, 행렬응축기법을 사용하였고 슈퍼요소 경계부분의 변형적합조건을 만족시키기 위하여 가상의 보를 사용하였다. 제안된 해석 기법의 정확성을 검증하기 위하여 벽식 구조물에 대한 3차원 해석을 수행하였다.

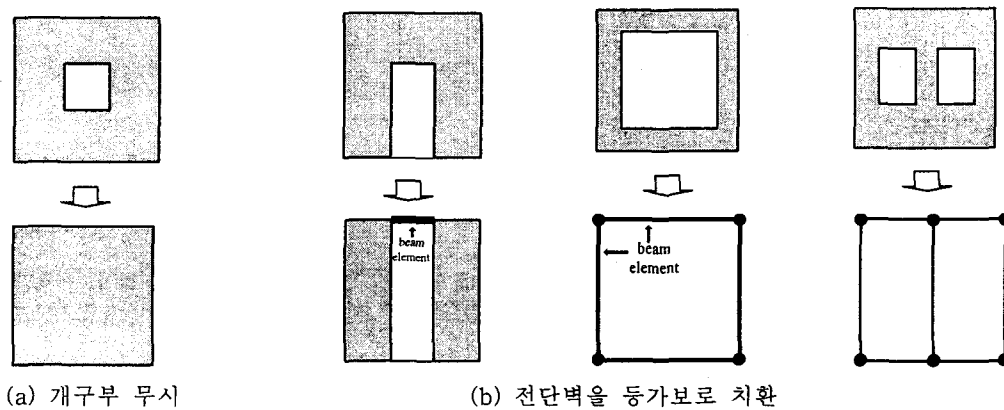


그림 2. 개구부가 있는 전단벽의 근사적인 모형화 방법

2. 슈퍼요소를 이용한 개구부가 있는 벽식구조물의 모형화

2.1 슈퍼요소를 이용한 모형화

개구부가 있는 벽식구조물을 정확하게 해석하기 위해서는 전체구조물을 다수의 유한요소로 세분하는 것이 필요하다. 그러나, 이러한 모형화 방법은 막대한 해석시간과 컴퓨터 메모리를 요구하게 된다. 따라서, 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 슈퍼요소와 부분구조를 이용한 모형화 방법을 이용한다.

슈퍼요소를 이용한 모형화 방법은 국내의 아파트 건물과 같이 매 층 동일한 입면과 평면을 갖는 구조물에 적합하다. 그림 3(a)는 이러한 벽식구조물의 세분모형을 표현한 것이다. 이 세분모형을 구조형태가 동일한 부분으로 분리하면 그림 3(b)와 같다. 분리된 모서리의 공유절점만 남긴채 나머지 절점은 행렬응축기법을 통하여 소거하면 그림 3(c)와 같은 벽체를 구성하는 슈퍼요소들과 바닥판을 구성하는 슈퍼요소를 생성할 수 있다. 이 과정에서 전체구조물의 강성행렬은 한 개 층의 슈퍼요소들의 강성행렬을 구성한 후 이를 재사용하는 방법으로 간단히 조합할 수 있다. 또한, 각 층의 벽체 두께가 다르다 하더라도 벽체의 두께에 따른 비례상수를 슈퍼요소의 강성행렬에 곱하여 다른 층의 전단벽에 대한 강성행렬을 쉽게 구할 수 있다.

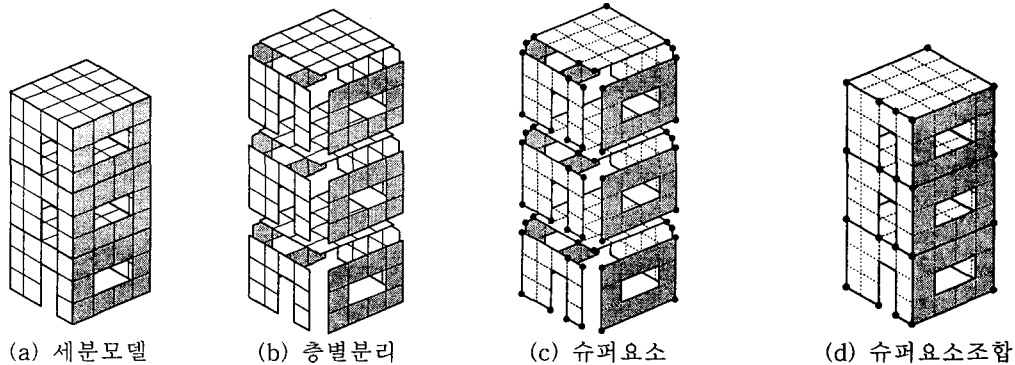


그림 3. 슈퍼요소를 이용한 모형화 방법

2.2 슈퍼요소 경계의 변형적합조건을 만족시키기 위한 가상보 사용

슈퍼요소를 사용한 모형화 기법은 동일한 형태의 구조부분을 재사용할 수 있다는 효율성을 갖고 있지만, 해석의 효율성을 극대화 시키기 위해 공유절점의 수를 최소화하면 슈퍼요소간의 적합조건을 만족시키지 못한다. 슈퍼요소 경계부분에서 변형적합조건을 만족시키기 위해서는 슈퍼요소 경계부분의 절점을 모두 공유하면 되지만, 이러한 경우 자유도 수의 증가로 인하여 효율성을 저하시키게 된다. 본 연구에서는 공유절점을 최소화 하면서 슈퍼요소 경계부분의 변형적합조건을 만족시키기 위해 가상보 사용을 제안하였다.

그림 4는 횡하중이 재하된 세분모델과 가상보가 없는 슈퍼요소를 사용한 모델의 변형형상 비교결과를 나타내고 있다. 그림 4의 변형형상 비교를 보면 가상보가 없는 슈퍼요소의 경계부분에서 변형적합조건이 만족되지 않음을 알 수 있다. 또한, 양쪽 전단벽 사이의 선은 바닥판을 나타내는데, 바닥판과 벽체의 경계부에서 변형이 일치되지 않는 현상을 볼 수 있다.

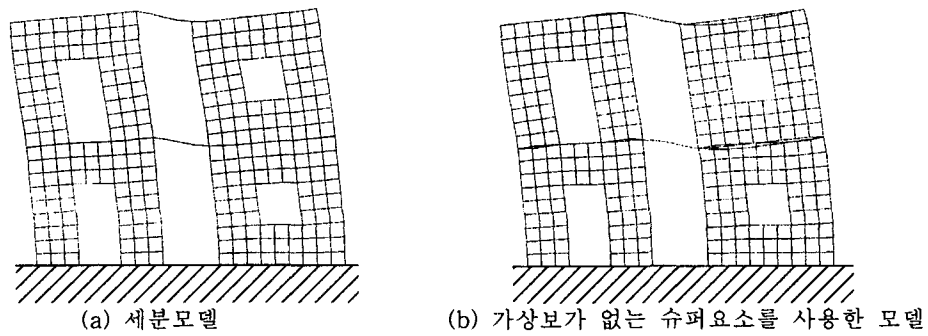


그림 4. 변형형상 비교

슈퍼요소 경계부분의 변형적합조건을 만족시키기 위하여 본 연구에서는 휨 강성이 아주 큰 가상보를 사용하였다. 그림 5는 바닥판 슈퍼요소의 가상보 사용을 보여주고 있다. 그림 5(a)와 같이 전단벽과 연결되는 부분의 바닥판을 휨강성이 큰 보를 추가한다. 이때 가상보는 바닥판의 격자에 따라 분리하여 추가한다. 그런 다음, 그림 5(b)와 같이 슈퍼요소의 공유절점을 제외한 나머지 절점의 자유도를 행렬응축 기법으로 소거시킨다. 가상보에 의해서 추가되는 강성은 슈퍼요소의 강성에서 그림 5(c)와 같이 내부 절점이 없는 보의 강성만큼 빼주었다. 결과적으로 그림 5(d)와 같이 가상보의 효과가 고려된 슈퍼요소를 생성할 수 있다.

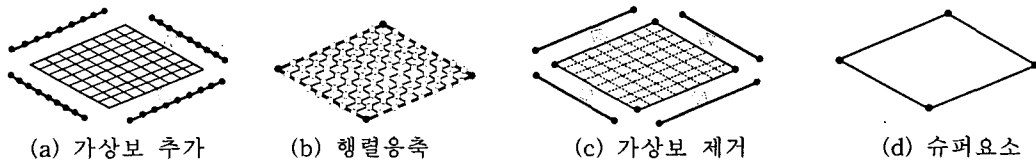


그림 5. 바닥판 슈퍼요소의 가상보 사용

창문형 개구부가 있는 벽체 슈퍼요소의 가상보 사용은 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a)와 같이 바닥판 슈퍼요소의 경계와 벽체 슈퍼요소의 경계부분에 가상보를 추가한다. 그림 6(b)에서 보는 바와 같이 공유절점을 제외한 모든 절점의 자유도를 행렬응축기법으로 소거한 후 그림 6(c)와 같이 가상보에 의해 추가된 강성을 제거한다.

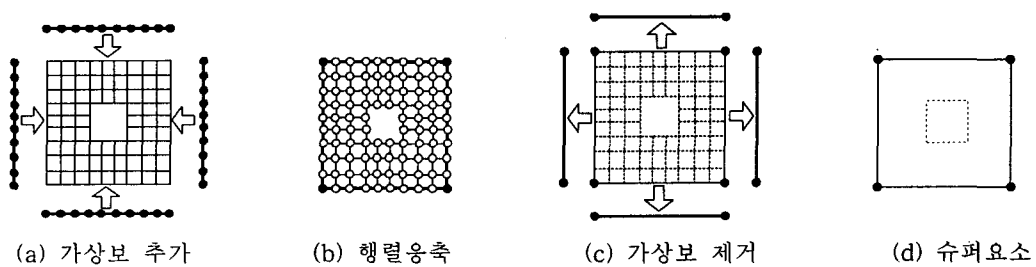


그림 6. 창문형 개구부가 있는 벽체 슈퍼요소의 가상보 사용

출입문형 개구부가 있는 벽체 슈퍼요소의 사용은 그림 7에서 보는 바와 같이 창문형 개구부가 있는 벽체 슈퍼요소의 경우와 동일한 과정을 거친다. 그러나, 개구부 하단부는 슈퍼요소와 연결되지 않으므로 변형적합 조건을 만족시킬 필요가 없다. 따라서, 그림 7(b)에서 보는 바와 같이 슈퍼요소의 상,하단 경계부에서는 가상보가 한 번에 2개로 나뉘어 추가됨을 알 수 있다.

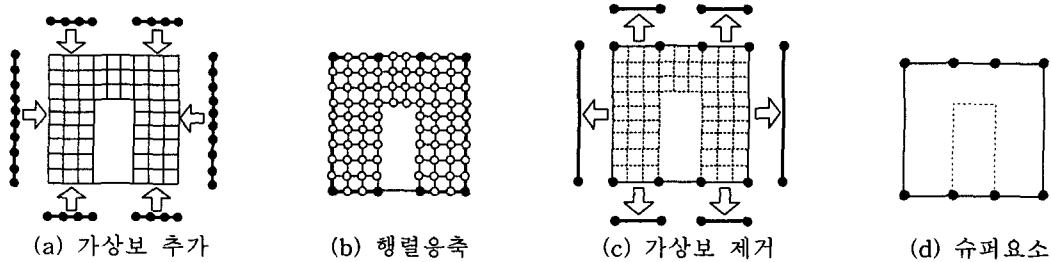


그림 7. 출입문형 개구부가 있는 벽체 슈퍼요소의 가상보 사용

가상보의 효율성을 검증하기 위하여 그림 4에서 사용된 구조물을 가상보가 있는 슈퍼요소로 모형화하여 해석을 수행하였다. 그림 8에서 보는 바와 같이 가상보를 이용한 모형화 기법이 슈퍼요소 경계부분에서 변형적합조건을 만족시키고 있다는 것을 알 수 있다.

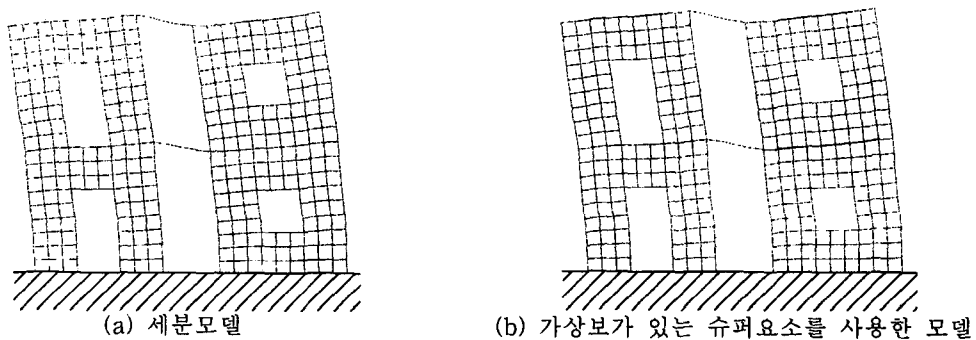


그림 8. 변형형상 비교

3. 부분구조를 이용한 3차원 벽식구조물의 모형화

3.1 부분구조를 이용한 벽체의 모형화

국내에서 건설되는 벽식아파트는 매 층 동일한 입면과 평면이 반복되는 특징을 갖고 있다. 이러한 특징을 이용하여 각층의 벽체를 여러 개의 슈퍼요소와 이를 조합한 부분구조로 모형화하는 것은 전체구조물을 유한요소로 세분한 모델에 비해 상당히 효율적이다. 그림 9에서는 벽식아파트의 벽체를 부분구조로 모형화 하는 과정을 나타낸다. 그림 9(a)는 기준층 벽체의 세분모델을 표현하였다. 세분된 모델을 그림 9(b)와 같이 슈퍼요소 생성을 위해 분리한다. 분리된 전단벽은 입면에 따라 동일한 형태가 여러 개 생기게 되는데 구조형태가 동일한 전단벽은 하나의 슈퍼요소로 모형화한다. 공유절점을 제외한 나머지 절점의 자유도는 행렬응축기법에 의해 소거하면 그림 9(c)와 같은 슈퍼요소를 생성할 수 있다. 생성된 슈퍼요소를 조합하면 그림 9(d)와 같은 한개 층 벽체의 부분구조를 생성할 수 있다.

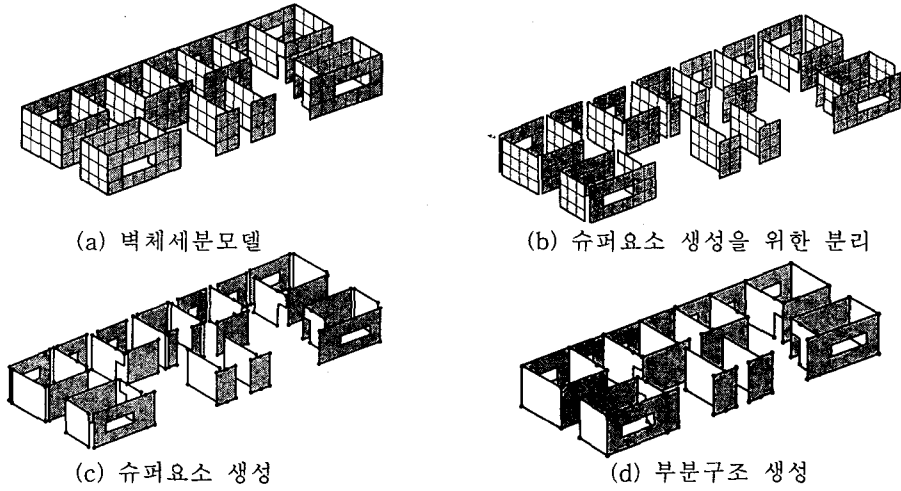


그림 9. 부분구조를 이용한 벽체의 모형화 과정

3.2 부분구조를 이용한 바닥판의 모형화

그림 10은 바닥판 부분구조를 생성하는 과정이다. 그림 10(a)는 아파트 평면의 바닥판을 세분한 모델이다. 세분모델을 동일한 구조부분으로 분리하면 그림 10(b)와 같다. 나누어진 단위 세대와 계단실은 그림 10(c)와 같이 각각의 슈퍼요소로 만든다. SE-A와 SE-A'는 서로 대칭인 슈퍼요소로 하나의 강성행렬과 질량행렬만 구성하면 다른 하나는 자유도 위치의 변환만으로 쉽게 얻을 수 있다. 슈퍼요소를 조합하여 그림 10(d)와 같이 아파트 한 층의 바닥판을 나타내는 부분구조를 형성할 수 있다.

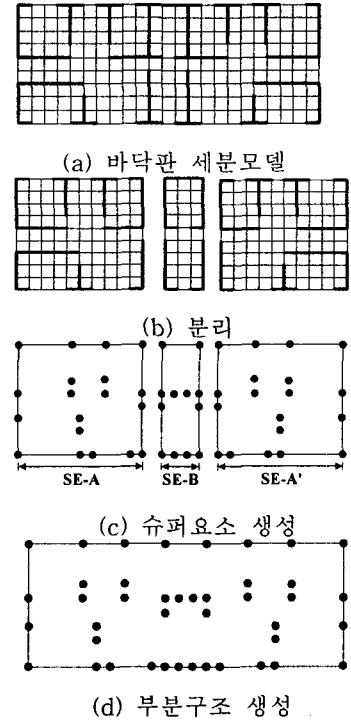


그림 10. 부분구조를 이용한 바닥판의 모형화 과정

4. 예제구조물 해석

4.1 예제구조물 개요

제안된 해석기법의 효율성을 검증하기 위해 그림 11과 같은 예제구조물에 대해 정적 및 고유치해석, 지진 해석을 수행하였다. 예제구조물은 그림 11(a)와 같은 기준층이 반복되는 10층의 벽식아파트이다. 창문형 개구부와 출입문형 개구부로 이루어진 전단벽은 그림 11(a)에서 볼 수 있다. 그림 11(b)는 예제구조물의 평면도로서 평면 중앙부의 계단실을 중심으로 좌우 대칭임을 알 수 있다. 이러한 예제구조물에 대해 유한요소로 세분모델을 Model A라 하고 가장 정확한 해석결과를 보일 것으로 판단된다. 실무에서 주로 사용되는 근사적인 모형화 방법인 개구부 상단 전단벽을 등가보로 치환한 모델은 Model B라 한다. 본

논문에서 제안한 모형화 방법인 슈퍼요소와 부분구조 그리고 가상보를 이용한 모델은 Model C라 한다.

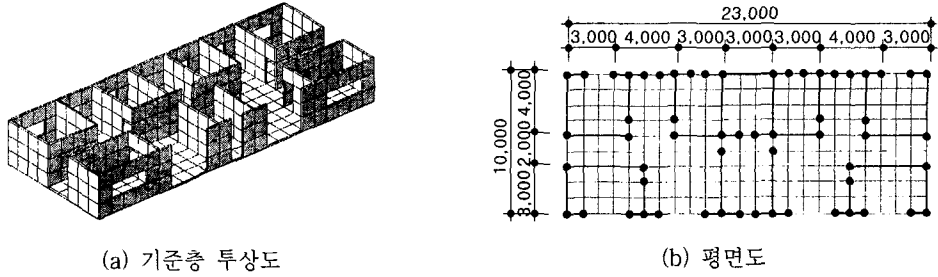


그림 11. 예제구조물

4.2 해석결과 분석

그림 11의 예제구조물에 대해 정적해석 및 고유치해석, 시간이력해석을 수행하였고 해석결과를 그림 12에 나타내었다. 정적해석결과 그림 12(a)에서 보는 바와 같이 제안된 해석기법이 적용된 Model C와 가장 정확한 결과를 보일 것으로 판단이 되는 Model A의 결과가 거의 유사함을 알 수 있다. 그러나, 실무에서 많이 쓰이는 모형화 방법인 Model B는 횡방향 강성을 과소 평가하여 Model A에 비해 큰 층변위를 보이고 있다. Model A의 경우 전단벽 상단의 전단변형이 하부에 비해 작게 발생하지만 등가보를 이용한 Model B는 전단벽 상하부의 전단변형이 동일하다. 따라서, 전단벽 상부만 볼 때, Model A에 비해 Model B가 더 큰 전단변형을 일으키게 되고 횡방향 강성을 과소 평가하게 된다. 고유치해석결과에서도 마찬가지로 Model B의 고유진동주기가 다른 모델에 비하여 과대 평가되고 있음을 알 수 있다. 각 모델에 대해 시간이력해석을 한 결과를 그림 12(c)에서 나타내었다. 사용된 하중은 El Centro(NS,1940) 지진가속도를 이용하였고 해석결과 Model A와 Model C는 비교적 유사한 결과를 보이고 있으나 Model B는 횡방향 강성이 과소 평가됨을 알 수 있다.

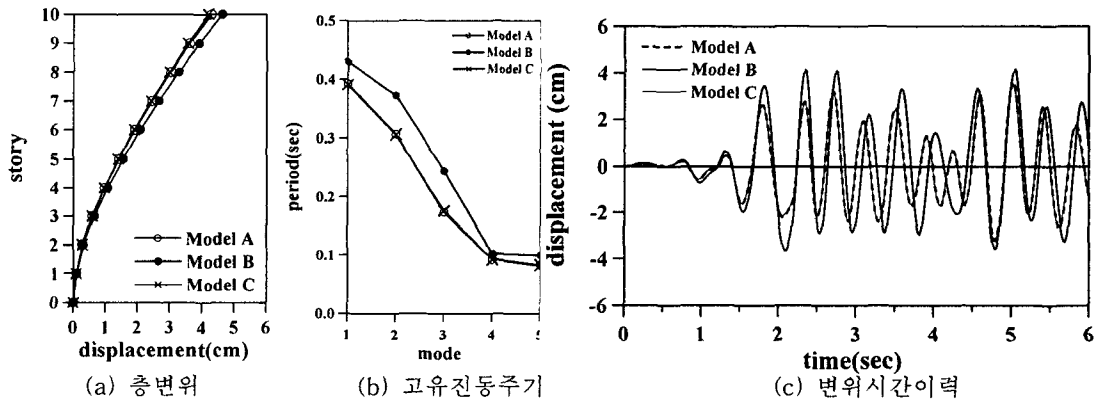


그림 12. 예제구조물의 해석 결과 비교

5. 결론 및 추후 연구과제

본 논문에서는 개구부가 있는 전단벽의 효율적인 3차원 해석을 위해 슈퍼요소와 부분구조를 사용한 모형화 방법을 제안하였고, 슈퍼요소 경계부의 변형적합조건을 만족시키기 위해서 가상보를 사용하였다. 또한, 제안된 해석기법의 정확성과 효율성에 대해 검토하기 위하여 전단벽식 아파트 구조물을 예제구조물로 하여 정적해석, 고유치 해석, 시간이력해석을 수행하였다. 본 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 개구부 상단부분을 등가의 보로 치환한 근사적인 모형화 방법의 경우, 전단벽 상부의 전단변형이 세분모델에 비해 더 크게 발생하여 구조물의 횡방향 강성을 과소평가하는 결과를 나타내었다. 따라서, 세분모델에 비하여 횡방향 변위가 크게 발생하고 고유진동주기와 변위시간이력에서도 정확한 결과를 얻을 수 없었다.
- 2) 본 연구에서 제안한 해석기법을 이용하면 정적해석 및 고유치해석, 시간이력해석 등에서 세분모델과 유사한 해석결과를 얻을 수 있었다. 또한, 슈퍼요소와 부분구조를 이용하여 모형화하기 때문에 고려해야할 자유도수가 크게 줄어 해석시간 및 컴퓨터 메모리를 절약할 수 있었다.
- 3) 본 연구는 전단벽식 아파트 구조물에 대해서만 국한하여 제안된 방법의 유용성을 판단하였다. 따라서, 다양한 개구부가 있는 구조물과 프레임이 연결된 구조물 등의 적용성에 관한 연구가 뒤따라야 한다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 두뇌한국21사업 핵심분야 사업비와 (주)마이다스아이티의 지원에 의하여 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. M. amaruddin, "In-plane stiffness of shear walls with opeings," *Building and Environment*, Vol.34, 1999, pp.109~127
2. Chang-Koon Choi and Myung-Suk Bang, "Plate element with cutout for perforated shear wall," *Journal of Structural Engineering*, Vol.133, No.2, 1987, pp.295~306
3. L.G. Tham and Y.K. Cheung, "Approximate analysis of shear wall assemblies with opeings," *The Structural Engineer*, Vol.61B, No.2, 1983, pp.41~45
4. R. Ali and S.J. Atwall, "Prediction of natrural frequencies of vibration of rectangular plates with rectangular cutouts," *Computers & Structures*, Vol.12, 1980, pp.819~823