다양한 형태의 개구부를 가진 전단벽식 구조물의 효율적인 동적해석

Efficient dynamic analysis of shear wall building structures with various types of openings

김 현 수* 이 승 재** 이 동 근***
Kim, Hyun-Su Lee, Seung-Jae Lee, Dong-Guen

ABSTRACT

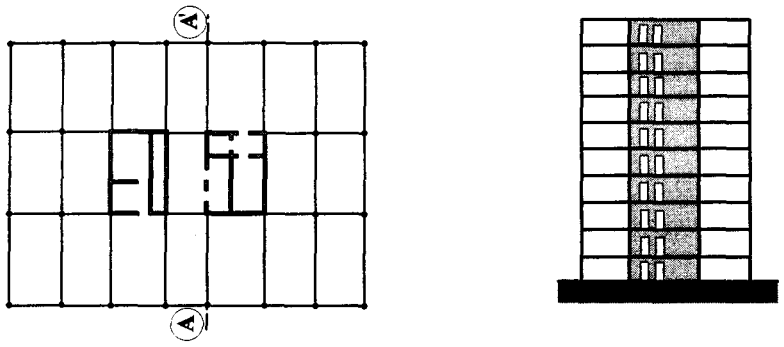
The box system that is composed only of reinforced concrete walls and slabs are adopted on many high-rise apartment buildings recently constructed in Korea. And the framed structure with shear wall core that can effectively resist horizontal forces is frequently adopted for the structural system for 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 significant 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 고층화되는 추세에 있다. 고층아파트 건물의 일반적인 구조형태에서는 전단벽과 바닥판으로만 구성되어 있는 벽식 구조가 주로 사용된다. 이러한 벽식 구조물의 내외부 전단벽에는 건축계획의 필요에 의하여 창문, 출입문 또는 설비 덕트 등으로 사용되는 개구부가 발생하게 되는데, 이러한 개구부의 개수, 위치, 크기는 벽체의 내부 응력뿐 아니라 전체 건물의 거동에도 영향을 미치게 된다.

근래에는 30-40층 규모 고층구조물의 구조형식으로 내부에 전단벽 코어가 있는 프레임 형식도 많이 사용되고 있는데, 이는 전단벽 코어와 주위의 프레임은 횡하중에 대하여 각각 휨변형과 전단변형거동을 나타내므로 구조적으로 상호 보완적인 기능을 가지며 횡하중에 저항하기 때문이다. 이 구조 형식도 그림 1과 같이 내부 전단벽 코어에 엘리베이터 입구, 계단실 입구, 설비용 덕트 등의 목적으로 많은 개구부가 발생하게 된다.

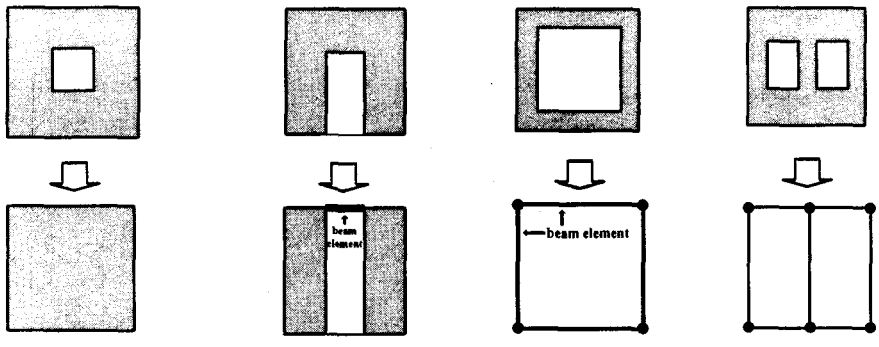
* 정 회 원 · 성균관대학교 건축공학과 박사 후 연구원
** 학생회원 · 성균관대학교 건축공학과 석사 과정
** 정 회 원 · 성균관대학교 건축공학과 교 수



(a) 평면 (b) A-A′단면

그림 1 전단벽 코어가 있는 입체골조구조물

위와 같은 구조물들을 해석하기 위해 실무에서는 개구부가 있는 전단벽을 그림 2와 같이 근사적으로 모형화하여 해석하는 경우가 많으나, 이러한 모형화 방법들은 해석의 정확성에 한계를 갖게 된다.



(a) 개구부 무시 (b) 전단벽을 등가보로 모형화

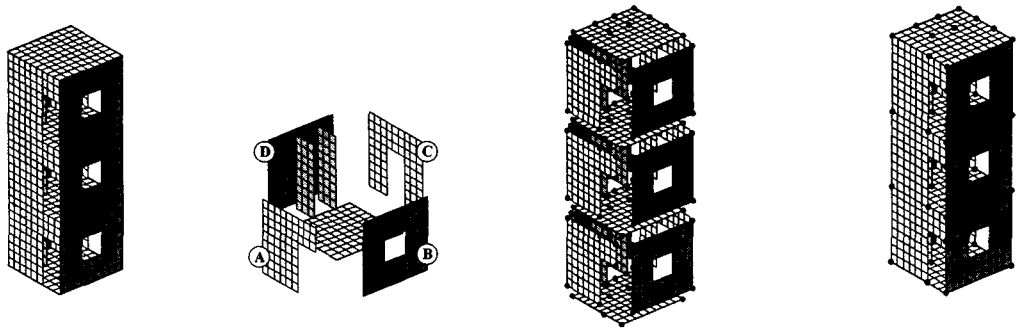
그림 2. 실무에서 개구부가 있는 전단벽이 근사적으로 모형화되는 방법

본 논문에서는 근사적인 모형화 방법들의 문제를 해결하면서 개구부의 크기, 위치 및 개수에 상관없이 적용할 수 있는 해석기법을 제시하였다. 제안된 해석기법을 사용하면 개구부를 고려하지 않은 모델과 같은 수의 자유도를 가지고도 개구부의 효과를 고려할 수 있다.

2. 슈퍼요소를 이용한 개구부가 있는 벽식구조물의 모형화

2.1 슈퍼요소를 이용한 모형화

슈퍼요소를 이용한 모형화 방법은 여러 개의 유한요소를 조합하여 하나의 슈퍼요소로 만들고 이를 구조부분이 동일한 곳에 재사용하여 해석시간과 컴퓨터 메모리를 줄일 수 있는 효율적인 해석 방법이다. 그림 3(a)는 벽식 구조물의 세분모델을 표현한 것인데, 이를 구조형태가 동일한 부분으로 분리하면 그림 3(b)와 같다. 분리된 전단벽과 바닥판에 대하여 최소한의 공유절점만 남긴 채 나머지 절점은 행렬응축기법을 통하여 소거함으로써 그림 3(c)와 같이 벽체와 바닥판을 구성하는 슈퍼요소들을 생성할 수 있다. 이렇게 생성된 슈퍼요소들을 조합하면 그림 3(d)와 같이 전체구조물을 모형화할 수 있다.



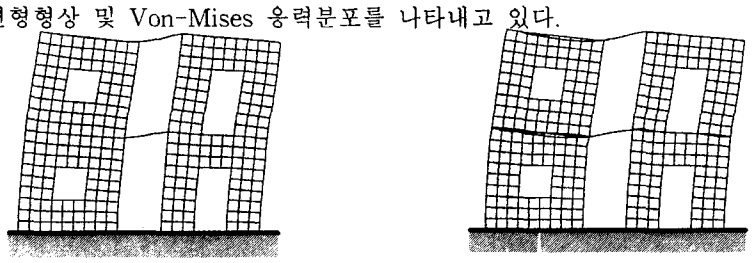
(a) 세분모델 (b) 분리 (c) 슈퍼요소 (d) 슈퍼요소조합

그림 3. 슈퍼요소를 이용한 모형화 방법

슈퍼요소를 생성시 그림 3(c)와 같이 필요한 부분의 절점만을 공유함으로서 자유도수를 감소시켜 효율성을 유지할 수 있게 된다. 이렇게 선정된 공유절점을 제외한 나머지 절점의 자유도를 행렬응축기법을 이용하여 소거하면 한 개의 슈퍼요소에 대한 강성행렬을 구성할 수 있다.

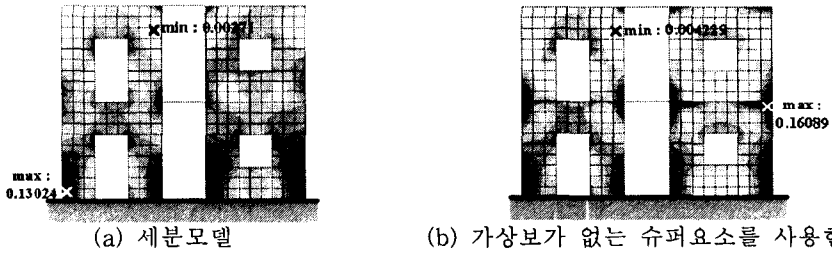
2.2 슈퍼요소 경계의 변형적합조건을 만족시키기 위한 가상보 사용

본 연구에서는 공유절점을 최소화하면서 슈퍼요소 경계부분의 변형적합조건을 만족시키기 위해 휨강성이 아주 큰 가상보 사용을 제안하였다. 그림 4와 5는 횡하중이 재하된 세분모델과 가상보가 없는 슈퍼요소의 변형형상 및 Von-Mises 응력분포를 나타내고 있다.



(a) 세분모델 (b) 가상보가 없는 슈퍼요소를 사용한 모델

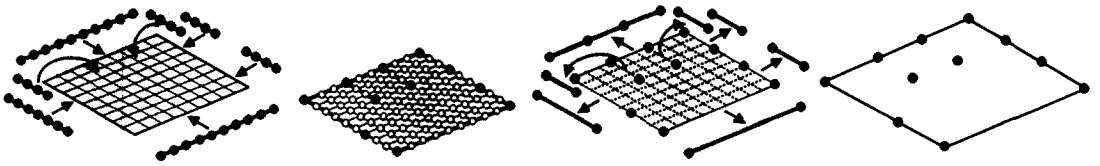
그림 4. 변형형상 비교



(a) 세분모델 (b) 가상보가 없는 슈퍼요소를 사용한 모델

그림 5. Von-Mises 응력 비교

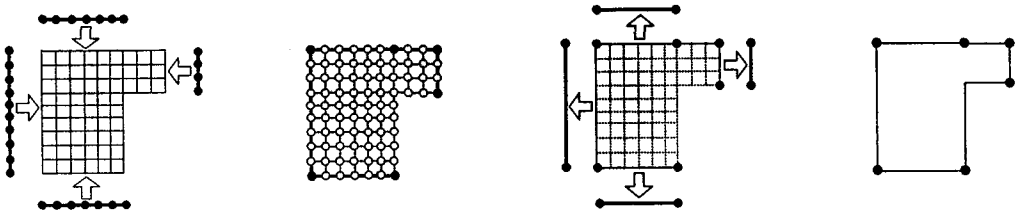
그림 6은 바닥판 슈퍼요소의 가상보 사용을 보여주고 있다. 그림 6(a)와 같이 전단벽과 연결되는 경계부분에 바닥판의 격자에 따라 가상보를 나누어서 추가한 후, 그림 6(b)와 같이 슈퍼요소의 공유절점을 제외한 나머지 절점 즉, 흰색 절점의 자유도를 행렬응축 기법으로 소거시킨다. 가상보에 의해서 추가되는 강성은 슈퍼요소의 강성에서 그림 6(c)와 같이 내부 절점이 없는 보의 강성만큼 빼주었다. 비록 추가된 가상보의 강성과 제거된 강성은 동일한 크기를 갖지만 슈퍼요소의 경계부분에서는 추가된 보의 효과가 남게되어 변형적합조건을 만족시키게 된다.



(a) 가상보 추가 (b) 행렬응축 (c) 가상보 제거 (d) 슈퍼요소

그림 6. 바닥판 슈퍼요소의 가상보 사용

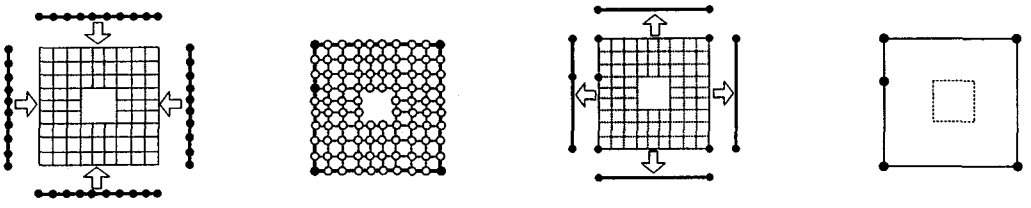
그림 3(b)의 슈퍼요소 A와 같이 벽체 모서리에 출입문형 개구부가 면해 있는 경우, 벽체 슈퍼요소의 가상보 사용을 도식적으로 표현하면 그림 7과 같다. 모서리에 접하는 개구부는 연결되는 요소가 없으므로 변형적합조건을 만족시킬 필요가 없으므로, 그림 7(a)와 같이 슈퍼요소 경계부에서 개구부가 없는 부분에 대해서만 가상보를 추가한다.



(a) 가상보 추가 (b) 행렬응축 (c) 가상보 제거 (d) 슈퍼요소

그림 7. 그림 3(b)에서 슈퍼요소 A의 가상보 사용

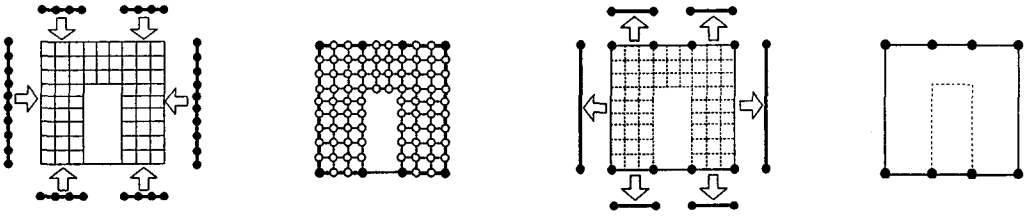
그림 3(b)의 슈퍼요소 B와 같은 창문형 개구부가 있는 벽체 슈퍼요소인 경우, 벽체의 모든 면이 슈퍼요소와 연결되므로 벽체 슈퍼요소의 모든 경계부분에 가상보를 추가한다. 다만, 슈퍼요소 A에 의해 추가로 생성된 공유절점을 고려해 가상보에 의해 추가된 강성은 그림 8(c)와 같이 제거한다.



(a) 가상보 추가 (b) 행렬응축 (c) 가상보 제거 (d) 슈퍼요소

그림 8. 그림 3(b)에서 슈퍼요소 B의 가상보 사용

출입문형 개구부가 있는 벽체 슈퍼요소는 그림 7의 경우와 유사하나, 개구부 하단에만 연결되는 요소가 없으므로 그림 9(a)와 같이 상, 하단 경계부에 가상보가 두 부분으로 나뉘어 추가된다.

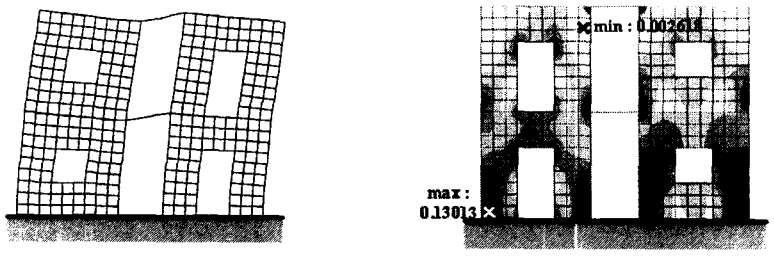


(a) 가상보 추가 (b) 행렬응축 (c) 가상보 제거 (d) 슈퍼요소

그림 9. 그림 3(b)에서 슈퍼요소 C의 가상보 사용

2.3 가상보의 효용성

가상보의 효용성을 검증하기 위하여 그림 4에서 사용된 구조물을 가상보가 있는 슈퍼요소로 모형화하여 정적해석을 수행하였다. 가상보가 있는 슈퍼요소를 사용한 모델의 변형형상을 표현한 그림 10(a)는 앞서 살펴본 세분모델의 변형형상인 그림 4(a)와 매우 유사하다. 또한, 그림 10(b)의 가상보가 있는 슈퍼요소를 사용한 모델에서 Von-Mises 응력분포가 세분모델의 응력분포인 그림 5(a)와 유사한 결과를 보이고 있다. 이것은 가상보를 사용하지 않았을 때 발생하였던, 슈퍼요소 경계부분의 응력집중현상과 응력불연속이 개선되었음을 의미한다. 가상보가 있는 슈퍼요소로 모형화를 하면 공유절점을 최소화하여 해석의 효율성을 높일 수 있고, 세분모델과 유사한 해석결과를 얻을 수 있었다.



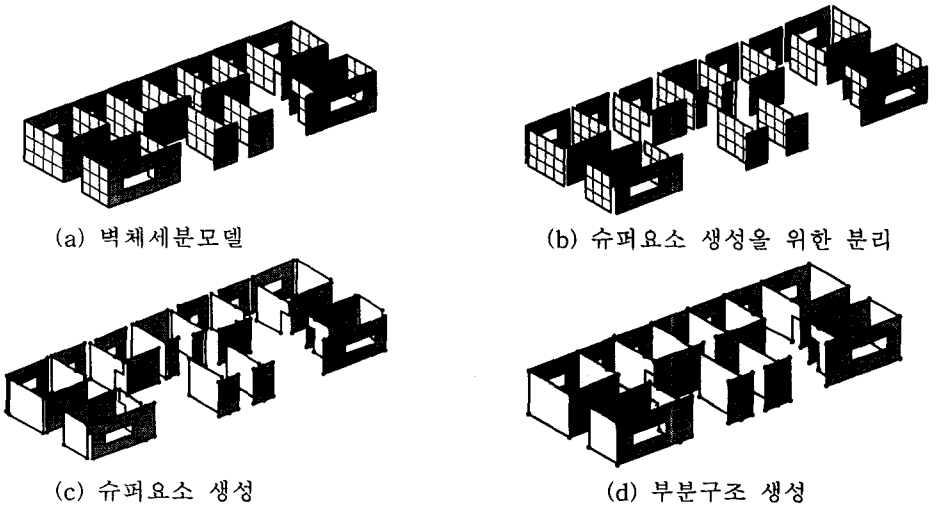
(a) 변형형상 (b) Von-Mises응력

그림 10. 가상보가 있는 슈퍼요소를 사용한 모델

3. 부분구조를 이용한 3차원 벽식구조물의 모형화

3.1 부분구조를 이용한 벽체의 모형화

국내에서 건설되는 벽식 아파트는 매 층 동일한 입면과 평면이 반복되는 특징을 갖고 있기 때문에 각 층의 벽체를 여러 개의 슈퍼요소와 이를 조합한 부분구조로 모형화하는 것이 효율적이다. 그림 11(a)에는 부분구조로 모형화하고자 하는 기준층 벽체의 세분모델을 표현하였다. 세분된 모델을 그림 11(b)와 같이 슈퍼요소 생성을 위해 분리한다. 공유절점을 제외한 나머지 절점의 자유도를 행렬응축기법에 의해 소거하면 그림 11(c)와 같은 여러 개의 슈퍼요소를 생성할 수 있으며, 생성된 슈퍼요소를 조합하면 그림 11(d)와 같이 기준층 벽체를 구성하는 부분구조가 생성된다.



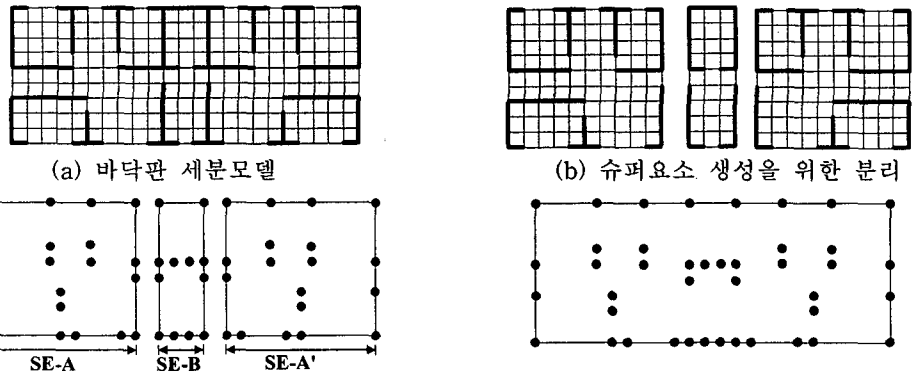
(a) 벽체세분모델 (b) 슈퍼요소 생성을 위한 분리

(c) 슈퍼요소 생성 (d) 부분구조 생성

그림 11. 부분구조를 이용한 벽체의 모형화 과정

3.2 부분구조를 이용한 바닥판의 모형화

바닥판을 부분구조로 모형화 하는 과정은 그림 12와 같다. 그림 12(a)는 아파트 평면의 바닥판을 세분한 모델이다. 그림 12(b)는 세분한 바닥판을 슈퍼요소 생성을 위해 단위 세대와 계단실로 나눈 형태이다. 나누어진 단위 세대와 계단실은 그림 12(c)와 같이 각각의 슈퍼요소로 모형화된다. SE-A와 SE-A'는 서로 대칭인 슈퍼요소로 하나의 강성행렬과 질량행렬만 구성하면 다른 하나는 자유도 위치 변환만으로 쉽게 얻을 수 있다. 일반적으로 고층 아파트 건물의 단위 세대 형식은 하나나 두개 정도로 제한되어 있기 때문에 구조물의 바닥판을 모형화하기 위해서는 같은 수의 슈퍼요소가 사용될 것이다. 슈퍼요소를 조합하여 그림 12(d)와 같이 아파트 한 층의 바닥을 나타내는 부분구조를 형성할 수 있다. 생성된 바닥판 부분구조를 매 층마다 재사용 한다면 모형화 과정의 편의와 해석의 효율성을 얻을 수 있다.



(a) 바닥판 세분모델 (b) 슈퍼요소 생성을 위한 분리

(c) 슈퍼요소 생성 (d) 부분구조 생성

그림 12. 부분구조를 이용한 바닥판의 모형화 과정

3.3 부분구조를 이용한 3차원 벽식 구조물의 모형화

전체구조물은 벽체와 바닥판을 각각의 부분구조로 모형화 한 후에 이를 조합하여 모형화한다. 그림 13은 바닥판 부분구조와 벽체 부분구조를 조합하여 기준층 모델을 완성하는 과정을 보여주고 있다. 3.1절과 3.2절에서 생성한 벽체 부분구조와 바닥판 부분구조간의 공유절점을 최소화하여 기준층을 모형화하고, 모형화된 기준층을 전체구조물의 층 수 만큼 재사용하게 된다. 따라서, 부분구조를 이용하여 전체구조물을 모형화하면 동일한 구조물에 대한 세분모델에 비하여, 해석시간과 컴퓨터 메모리를 급격하게 감소시킬 수 있다.

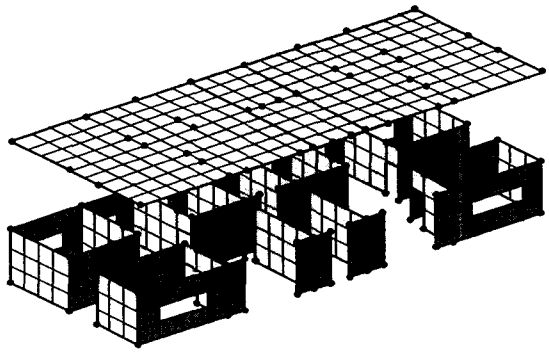


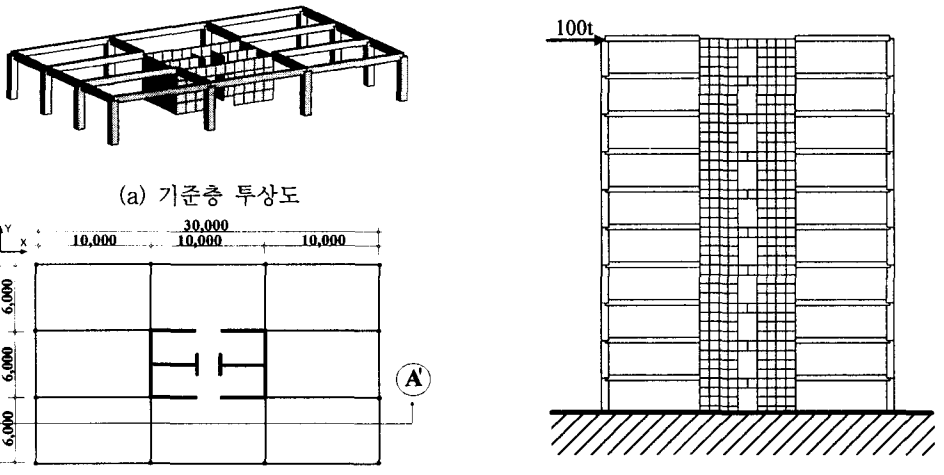
그림 13. 부분구조를 이용한 기준층 모형화

4. 예제구조물 해석

제안된 방법의 효율성을 검증하기 위해 입체골조 구조물에 대해 정적 및 고유치해석, 지진해석을 수행하였다. Model FL, EL, PL은 각각 세분모델과 전단벽을 등가의 보로 치환한 모델, 본 논문에서 제안한 슈퍼요소와 가상보를 이용한 모델을 나타낸다.

4.1 예제구조물

최근에 고층건물의 구조형식으로 전단벽 코어를 가진 프레임 형식이 많이 사용되고 있다. 따라서, 본 논문에서 제안된 해석기법을 이러한 구조시스템에 대한 적용성 타진을 위하여 그림 14와 같이 전단벽 코어가 있는 입체골조구조물을 예제구조물로 하여 해석을 수행하였다.



(a) 기준층 투상도

(b) 평면도

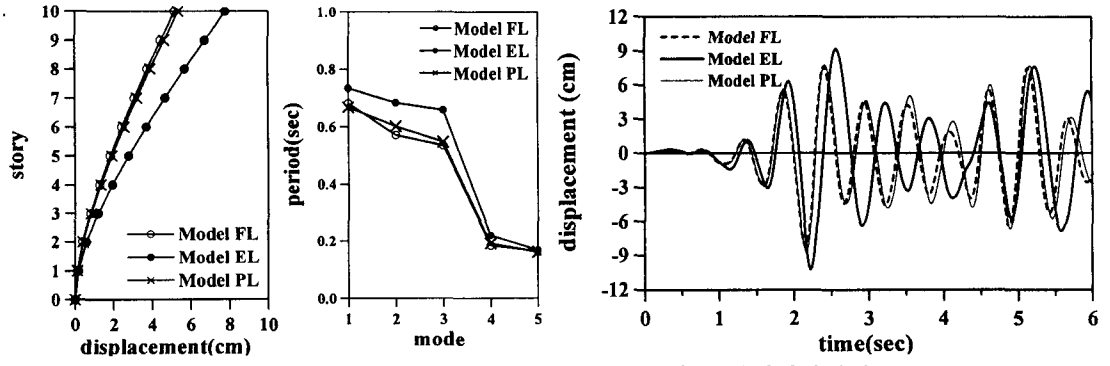
(c) A~A′ 단면도

그림 14. 예제구조물

그림 14(a)에서는 기준층 투상도를 보여주고 있는데, 전단벽 코어에 출입문형 개구부가 있음을 확인할 수 있다. 그림 14(b)와 (c)는 예제구조물의 평면도 및 단면도를 나타내고 있다.

4.2 예제구조물 해석 결과

그림 15(a)에서 보는 바와 같이 Model FL과 Model PL은 유사한 층변위를 보이고 있으나, Model EL은 개구부가 있는 전단벽의 영향이 크게 작용하여 횡방향 강성이 과소평가 되었다.



(a) 층변위 (b) 고유진동주기 (c) 최상층 변위시간이력(El Centro,1940,NS)

그림 15. 해석결과 비교

그림 15(b)의 고유치해석 결과에서도 마찬가지로 Model EL은 다른 모델에 비하여 더 큰 고유진동주기를 보여주고 있다. 각 모델에 대해 최상층 변위시간이력해석 결과를 그림 15(c)에서 나타내었다. 등가보를 이용한 Model EL은 다른 모델에 비하여 진폭과 더불어 위상각의 차이도 크게 발생하였다. 이는 다른 모델에 비하여 고유진동주기의 차가 크기 때문이다.

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 효용성에 대해 검토하기 위하여 전단벽식 아파트 구조물와 전단벽코어가 있는 입체골조구조물을 예제구조물로 하여 정적해석, 고유치해석, 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) 가상보가 있는 슈퍼요소를 이용하게 되면 면내회전자유도가 없는 평면응력요소를 사용하더라도 공유절점에서 면내회전강성을 생성하게 된다. 따라서, 특별한 고려없이 프레임과 연결할 수 있었고, 면내회전자유도가 있는 평면응력요소를 사용한 세분모델과 유사한 해석결과를 보였다.
3) 본 연구에서 제안한 해석기법을 이용하면 슈퍼요소와 부분구조를 이용하여 모형화하기 때문에 고려해야할 자유도수가 크게 줄어 해석시간 및 컴퓨터 메모리를 절약할 수 있으며 세분모델과 유사한 해석결과를 얻을 수 있었다.

감사의 글

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

참고문헌

1. Choi, C. K., and Bang, M. S., "Plate element with cutout for perforated shear wall," Journal of Structural Engineering, Vol.133, 1987, pp.295~306
2. Amaruddin, M., "In-plane stiffness of shear walls with opeings," Building and Environment, Vol.34, 1999, pp.109~127
3. Tham, L. G., and Cheung, Y. K. , "Approximate analysis of shear wall assemblies with opeings," The Structural Engineer, Vol.61B, 1983, pp.41~45
4. Ali, R., and Atwall, S. J. , "Prediction of natrural frequencies of vibration of rectangular plates with rectangular cutouts," Computers & Structures, Vol.12, 1980, pp.819~823
5. Petersson, H., and Popov, EP. , "Substructuring and equation system solutions in finite element analysis", Computers and Structures, Vol. 7, 1977, pp. 197~206.
6. Weaver, W., Jr., and Johnson, P. R., Structural Dynamics by Finite Elements, Prentice Hall, 1987
7. 이동근, 김현수, "바닥판의 휨강성을 고려한 전단벽식 건물의 효율적인 지진해석," 한국전산구조공학회 논문집, 제14권, 제12호, 2001, pp.193~202