

슈퍼요소를 이용한 개구부를 가진 전단벽의 해석 Analysis of Shear Wall with Openings Using Super Element

이 동 근*
Lee, Dong-Guen

김 현 수**
Kim, Hyun-Su

남 궁 계 홍***
Nam-Gung, Kye-Hong

ABSTRACT

The box system, composed only of reinforced concrete walls and slabs, are adopted by many high-rise apartment buildings recently constructed in Korea. In the buildings, one or more relatively large openings are cut in a shear wall for functional reasons. The openings influence the internal stress of the shear wall and also the structural behavior. Therefore, it is necessary to use subdivided plate elements for accurate analysis of the box system with openings. But it would cost tremendous amount of analysis time and computer memory if the shear wall is subdivided into a finer mesh in the analysis of high-rise buildings. So, it is difficult to apply this modeling method to practical procedure.

In this study, an efficient method is proposed for the efficient and accurate analysis of shear wall with openings. The proposed method used the super element and matrix condensations, fictitious beam technique.

1. 서 론

최근 우리 나라의 아파트 건물은 인구의 고밀화로 점차 그 규모가 커지고 고층화되어 가는 추세에 있다. 고층아파트 건물의 일반적인 구조형태는 전단벽과 바닥판으로만 구성된 벽식 구조형태(box system)가 주로 사용된다. 벽식 구조물의 내·외부 전단벽에는 그림 1과 같이 건축 평면계획의 필요에 의하여 창, 문, 복도 또는 설비 덕트 등으로 사용되는 개구부가 발생하게 된다. 이렇게 발생하게 되는 다양한 개구부 형태를 그림 2에 나타내었다. 개구부의 수, 위치, 크기는 벽체의 내부 응력뿐만 아니라 전체 건물의 거동에도 영향을 미치게 된다. 개구부를 가진 전단벽을 정확하게 해석하기 위해서는 판요소를 사용하여 전단벽을 세분하여 모형화하는 것이 필요하다. 그러나 개구부를 가진 벽식구조물 전체를 판요소로 세분하여 해석하는 것은 어렵기 때문에 개구부를 가진 전단벽의 강성을 대략적으로 계산해내는 것에 관한 연구가 여러 연구자에 의해서 수행되어 왔다.^{(1),(5),(6),(8)}

그러나 이러한 연구의 대부분이 개구부의 크기와 위치에 따라서 제안된 해석 방법의 효용성 및 정확성이

* 성균관대학교 건축공학과 교수
** 성균관대학교 건축공학과 박사과정
*** 성균관대학교 건축공학과 석사과정

크게 변화였고 대부분의 연구에서 전단벽을 모형화하기 위해서 사용된 판요소엔 면내회전자유도가 없으므로 보요소와의 연결이 어렵다. 그리고 개구부가 있는 전단벽의 강성을 근사적으로 계산하는 것만을 연구의 주요 목적으로 삼아서 전단벽 내부의 개구부 모서리에 발생하는 응력집중현상은 표현하지 못하였다.

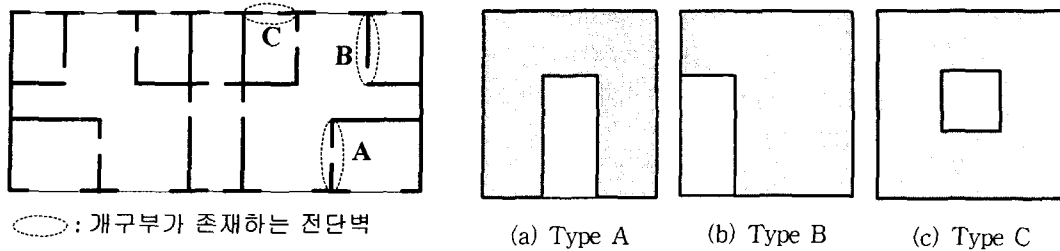


그림 1. 아파트 건물의 평면

그림 2. 다양한 개구부의 형태

또한 근년에 고층빌딩의 구조형식 중 내부에 전단벽 코어를 가지는 프레임 형식을 많이 사용하고 있다. 전단벽 코어와 주위의 프레임은 횡하중에 대하여 각각 휨변형과 전단변형 거동을 나타내므로 구조적으로 상호 보완적인 기능을 가진다. 이때 내부 전단벽 코어에도 역시 엘리베이터 입구, 계단실 입구, 설비용 덕트 등을 위해 많은 개구부가 발생하게 된다. 이와 같은 건물을 해석하기 위해서 전단벽 코어는 판요소를 사용하여 모형화하고 기둥과 보는 프레임 요소를 사용하여 모형화 하게 된다. 이 때 판요소에 면내 회전자유도가 없는 경우는 전단벽코어와 프레임의 연결부 모형화에 특별한 고려를 해야한다. 따라서 기존에도 전단벽과 보요소의 연결부에 관한 연구가 많이 수행되어 왔다.^{(2),(3),(4),(7)}

본 연구에서는 개구부의 크기, 위치, 개수에 상관없이 적용할 수 있는 해석기법을 제시하고자 한다. 또, 면내 회전자유도를 가진 판요소를 사용하여 보요소와 연결을 용이하게 하였다. 제안된 해석기법은 슈퍼요소와 행렬응축기법을 사용하였고 한 층의 전단벽을 나타내는 슈퍼요소와 슈퍼요소 사이의 변형적합조건을 만족시키기 위하여 가상의 보를 사용하였다. 전단벽 내부 개구부의 위치, 크기 및 개수를 변화시킨 여러 가지 해석 모델을 사용하여 제안된 해석 기법의 정확성을 검증하였다.

2. 슈퍼요소를 사용한 개구부를 가진 전단벽의 해석

개구부를 가진 전단벽을 보다 정확하게 해석하기 위한 기존의 연구 중 참고문헌[5]가 현실적으로 가장 효율적이라고 판단되는 방법이다. 즉, 요소의 자유도 수는 개구부가 없는 요소와 같지만 개구부의 영향을 비교적 효과적으로 잘 나타낼 수 있는 요소를 개발하였다. 그러나 개구부의 크기가 커지거나 위치가 변화하면 오차가 크게 발생하고 개구부의 모서리에 발생하는 응력집중현상을 표현하지 못하였다. 이러한 문제점을 개선할 수 있는 방법은 전단벽을 여러 개의 요소로 세분하여 모형화 하는 것이다. 하지만, 이렇게 전단벽을 여러 개의 요소로 세분하면 상당한 양의 해석 시간과 컴퓨터 메모리가 소요되는 문제점이 있다. 이러한 문제를 개선하고자 본 연구에서는 행렬응축기법과 슈퍼요소를 이용하여 해석시간과 컴퓨터 메모리를 절약할 수 있는 효율적인 해석 기법을 제안하였다.

2.1 행렬응축기법과 슈퍼요소

현재 국내에서 건설되고 있는 대부분의 고층아파트는 전단벽식 구조물이고, 매 층마다 동일한

입면을 가진 단위세대가 반복되는 특징이 있다. 그림 3(a)는 매 층 동일한 입면이고 개구부가 있는 벽식구조물을 단순화하여 표현한 것이다. 이러한 구조물을 같은 구조형태로 분리하면 그림 3(c)와 같다. 그림 3(c)는 그림 3(d)와 같이 동일한 강성행렬을 갖는 세 개의 슈퍼요소로 조합할 수 있다. 따라서, 슈퍼요소 한 개의 강성행렬을 구성한 후 이를 조합하면 구조물의 강성행렬을 얻을 수 있다. 또한 각 층의 전단벽 두께가 다르다 하더라도 개구부의 위치만 같으면 한 층의 강성행렬을 구한 후 비례상수만을 곱함으로써 다른 층 전단벽의 강성행렬을 쉽게 구할 수 있다.

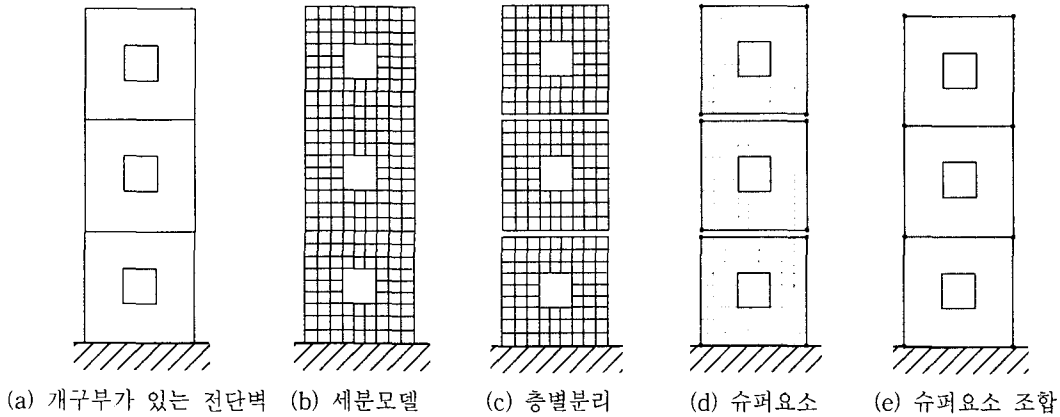


그림 3. 슈퍼요소를 이용한 개구부가 있는 전단벽의 모형화

2.2 적합조건

개구부가 있는 벽식 구조물을 정확하게 해석하기 위해서는 전단벽을 세분하는 것이 필요하고 세분화에 따라 생기는 자유도 수의 증가는 슈퍼요소와 행렬응축기법을 통하여 개선됨을 앞의 절을 통하여 알아보았다. 그러나, 슈퍼요소간에 모서리 절점만을 공유하는 경우, 서로 만나는 경계부분에서 변형적합조건을 만족시키지 못하는 문제점이 있다. 왜냐하면 이러한 모형화 방법은 경계상의 모든 절점을 공유하는 경우보다 건물의 횡방향 강성을 과소평가 하기 때문이다. 따라서, 해석의 정확성을 높이기 위해서 슈퍼요소간의 경계부분에서 변형적합조건을 만족시켜야 한다. 이러한 변형적합조건을 만족시키기 위해서는 슈퍼요소간의 공유절점 개수를 늘려야하는데, 그렇게 되면 자유도의 수가 증가하게 되어 슈퍼요소 사용의 효율성이 떨어지게 된다. 따라서 본 연구에서는 개구부가 없는 평판 요소와 같은 수의 자유도를 가지면서 개구부가 있는 슈퍼요소를 사용하여 효율성을 유지하면서 슈퍼요소간의 경계부분의 변형적합조건을 만족시킬 수 있는 해석기법이 요구된다.

3. 가상보의 사용

개구부가 있는 벽식 구조물을 효율적으로 해석하기 위한 해석기법으로 슈퍼요소를 사용하는 방법에 대해 앞 절에서 제시하였다. 그러나 슈퍼요소만 사용하게 되면 변형적합성을 만족시키지 못하는 문제가 있다. 따라서, 본 논문에서는 가상보를 이용하여 변형적합조건을 만족시킬 수 있는 해석방법을 제안하였다.

3.1 가상보 사용의 이론적 배경

그림 4(a)와 (b)에 본 논문에서 사용한 Lee요소⁽⁷⁾와 일반적인 보요소를 나타내었다. 그림 4(c)를 보면 Lee

요소의 임의의 한 변에서의 형상함수는 전형적인 보요소의 형상함수와 동일하다는 것을 알 수 있다. 따라서, 보요소와 Lee요소의 절점에 같은 이동변위와 회전변위가 발생하게 되면 동일한 3차 곡선 형상으로 변형이 발생하게 된다. 즉, Lee 요소의 한 변에 보요소가 존재하면 두 요소는 변형적합조건을 만족시키는 완전히 일치하는 변형형상을 보여주게 된다.

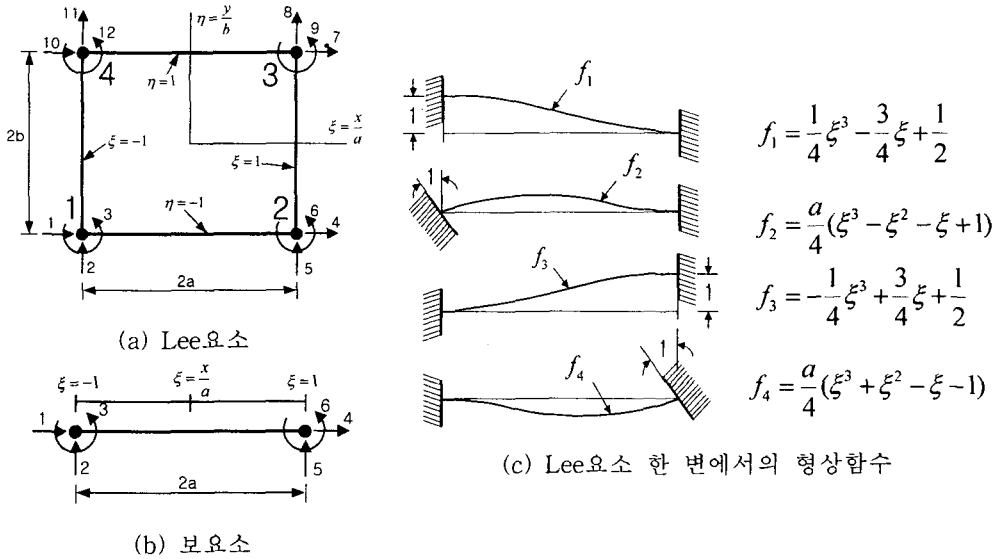


그림 4. Lee요소와 보요소 및 형상함수

3.2 적합조건을 위한 가상보의 사용

그림 5는 창문이 있는 세분된 전단벽을 슈퍼요소로 변환하는 과정 중에 가상보가 어떻게 사용되는가를 보여주고 있다. 그림 5(a)와 같이 창문이 있는 세분된 전단벽 모델에 전단벽 격자와 같은 길이로 세분된 가상보를 추가하고 그림 5(b)와 같이 행렬응축을 하여 전단벽 모서리 절점의 자유도만을 고려한다. 이렇게 하면 그림 5(c)의 슈퍼요소에 대한 강성행렬을 구성할 수 있고, 강성행렬 구성의 최종단계에서 추가된 가상보의 강성을 제거하기 위해 그림 5(d)와 같이 내부 절점이 없는 가상보의 강성을 빼주었다. 또한, 그림 6은 출입문이 있는 경우이다. 모든 과정이 창문이 있는 경우와 동일하고, 그림 6(a)에서 보는 바와 같이 출입문 상단부분에서는 윗층과 연결되는 판요소가 없기 때문에 변형적합조건이 문제가 발생하지 않으므로 가상보를 사용하지 않고, 그 외의 부분에서만 가상의 보를 사용하였다.

가상의 보의 효용성을 검증하기 위한 해석결과를 그림 7과 그림 8에 보여주고 있다. 그림 7은 창문이 있는 전단벽에 가상보를 사용한 경우이다. 그림 7(a)는 세분모델로서 가장 정확한 모델이라고 생각되는 경우이다. 그림 7(b)는 가상보를 사용하지 않고 슈퍼요소만 사용한 모델로서 슈퍼요소 간의 경계부분에서 변형적합조건을 만족시키지 못하고 있다. 그림 7(c)는 가상보를 슈퍼요소 간의 경계부분에 사용한 경우로서 정확한 모델이라고 생각되는 그림 7(a)와 거의 동일한 변형형상을 보이고 있다. 그림 8은 출입문이 있는 모델인데 해석 결과는 그림 7의 경우와 마찬가지로 가상보 사용의 효용성을 확인할 수 있다.

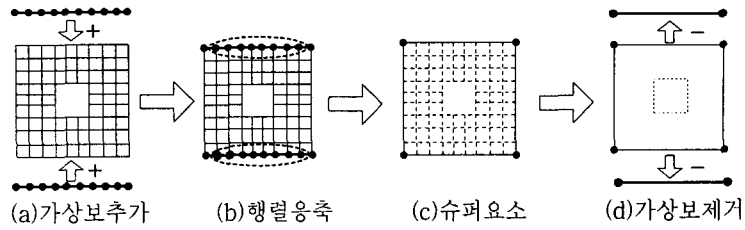


그림 5. 창문이 있는 전단벽의 가상보 사용

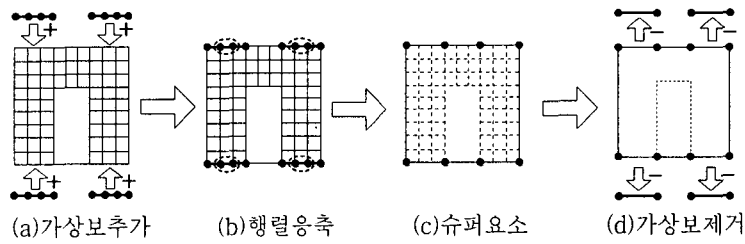
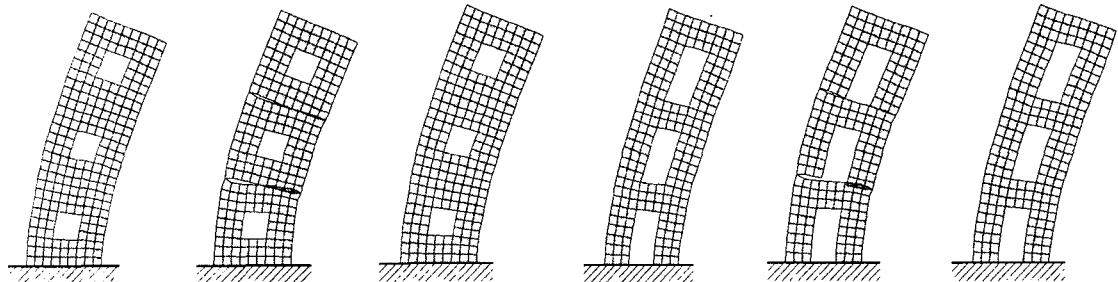


그림 6. 출입문이 있는 전단벽의 가상보 사용



(a) 세분모델 (b) 가상보가 없는 슈퍼요소 (c) 가상보가 있는 슈퍼요소

그림 7. 창문이 있는 전단벽의 가상보 효율성

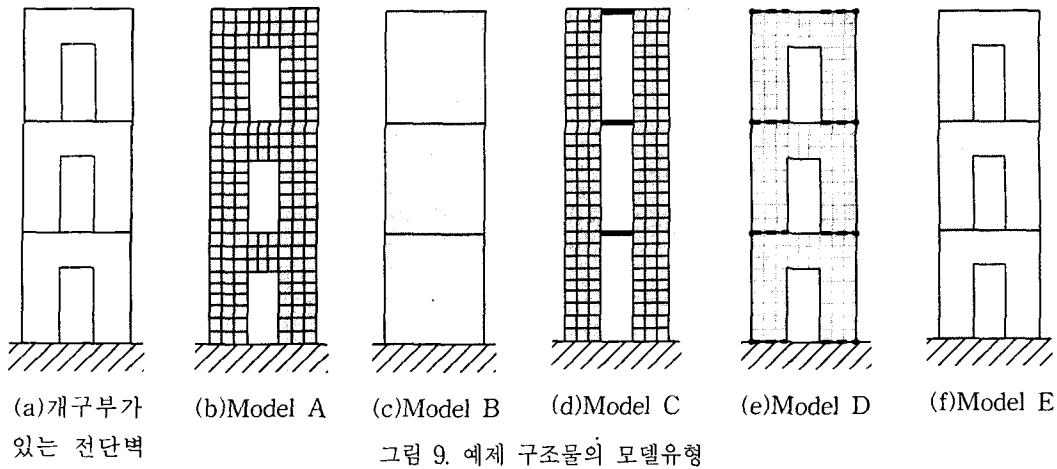
(a) 세분모델 (b) 가상보가 없는 슈퍼요소 (c) 가상보가 있는 슈퍼요소

그림 8. 출입문이 있는 전단벽의 가상보 효율성

4. 예제구조물의 해석

4.1 해석모델의 개요

제안된 해석방법의 정확성을 검증하기 위하여 그림 9와 같은 모델들을 사용하여 해석을 수행하고자 한다. 그림 9(b)는 가장 정확한 해석 결과를 나타내는 모델이라고 생각되는 세분모델로서 Model A라 한다. 그림 9(c)는 Model B로서 개구부를 고려하지 않은 전단벽 모델이다. 그림 9(d)는 개구부 상단부분을 등가의 보요소로 치환한 모델로서 Model C라 한다. Model C는 현재 실무에서 출입문 형태의 개구부를 표현하기 위하여 사용하는 해석모델이다. 그림 9(e)의 Model D는 본 논문에서 제안한 방법으로서 각 층별 슈퍼요소를 사용하고, 슈퍼요소간의 경계에는 가상보를 사용한 모델이다. 그림 9(f)의 Model E는 개구부를 갖는 평판요소로서 참고문헌[5]에서 제안된 모델이다.



4.2 중앙에 창문이 있는 전단벽

본 예제구조물은 참고문헌[5]에서 사용한 예제 구조물이다. 그림 10에서 보는 바와 같이 $a/b=0.1$ 일 때의 해석결과는 Model C만 제외하고 모든 모델에 관하여 유사한 결과를 보이고 있다. 이는 개구부의 크기가 전단벽의 크기에 비해 작기 때문에 개구부의 영향이 미소한 것으로 판단된다. $a/b=0.3$ 인 경우, $a/b=0.1$ 과 마찬가지로의 결과를 보인다. 그러나 $a/b=0.5$ 인 경우, 개구부의 영향이 상당히 크게 되어 모델간의 해석결과에 차이가 발생한다. 개구부를 고려하지 않는 모형인 Model B는 가장 적은 변위를 보이고, 각층 전단벽을 하나의 요소로 모형화 한 Model E도 세분모델보다 적은 변위를 보이고 있다. 개구부 상단을 인방보로 등가 치환한 Model C는 개구부 상단부분의 휨강성을 제대로 표현할 수 없어 세분모델에 비해 더 큰 변위를 보인다. 본 논문에서 제안한 슈퍼요소와 가상보를 사용한 모형인 Model D는 개구부의 크기와 관계없이 세분모델과 거의 동일한 층변위를 보이고 있다.

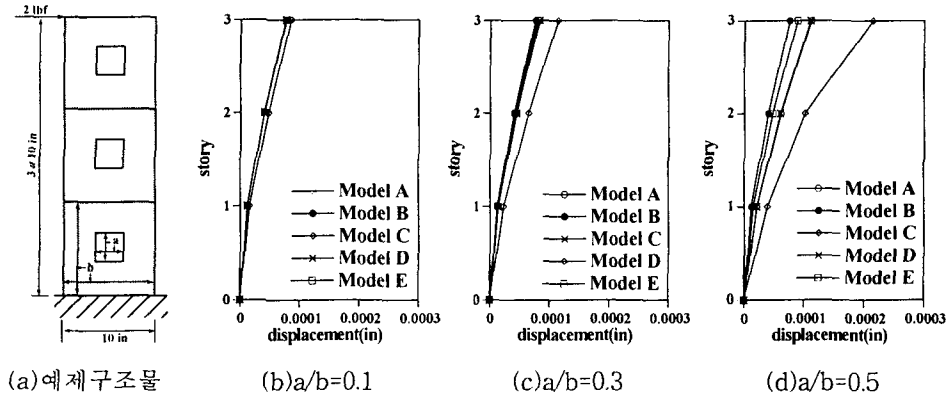


그림 10. 중앙에 창문이 있는 전단벽의 층변위 비교

4.3 출입문이 있는 전단벽

그림 11은 개구부의 높이는 고정하고 개구부의 폭을 변화시킨 예제이다. 해석결과, 개구부를 고려하지 않는 모형화 방법인 Model B는 정확해라고 생각되는 Model A와 큰 오차가 있고, 본 논문에서 제안한 Model

D는 어떤 경우에도 Model A와 유사한 결과를 보이고 있다. 인방보를 사용한 모형화 방법인 Model C는 개구부 폭이 커질수록 Model A에 비하여 큰 변위를 나타내는 것을 알 수 있다.

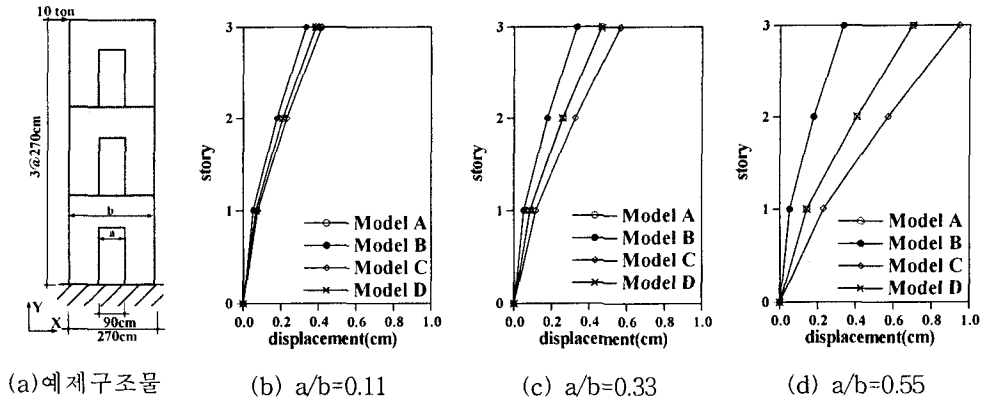


그림 11. 개구부 폭을 변화시킨 전단벽의 층변위 비교

4.4 프레임과 연결된 개구부를 가진 전단벽

본 논문에서는 전단벽을 모형화 할 때 Lee요소를 사용한다.⁽⁷⁾ Lee요소는 면내 회전자유도를 가지고 있기 때문에 보요소와 연결이 용이하다. 그림 12는 중앙에 창문을 가진 전단벽에 프레임이 연결된 예제구조물이다. 해석결과 본 논문에서 제안한 방법인 Model D와 세분모델인 Model A사이에 최상층에서 약간의 변위 차이가 있으나 거의 일치함을 알 수 있다. 그림 13은 프레임이 연결된 출입문을 가진 전단벽 예제구조물이다. 해석결과 제안된 방법이 정확성에 있어서 우수함을 보이고 있다.

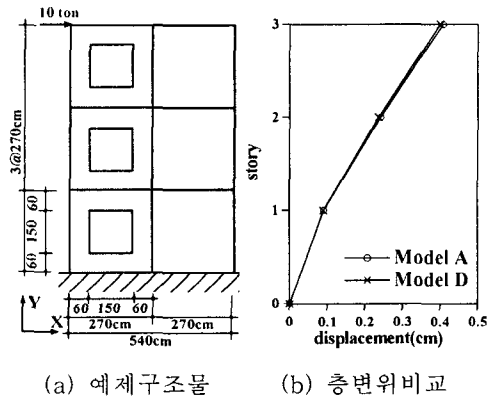


그림 12. 프레임이 연결된 창문을 가진 전단벽

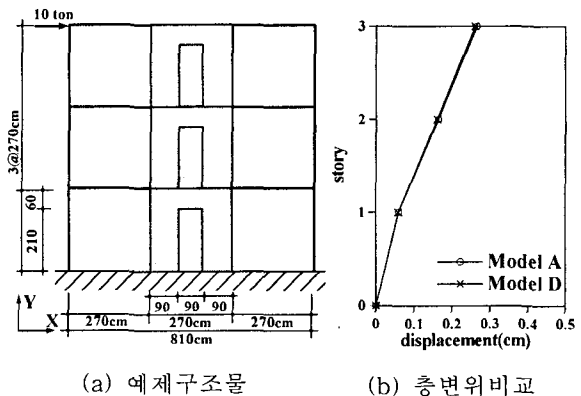


그림 13. 프레임이 연결된 출입문을 가진 전단벽

5. 결 론 및 추후 연구과제

본 논문에서는 개구부가 있는 전단벽의 효율적인 해석을 위해 슈퍼요소와 가상보를 사용한 해석 기법을 제안하였고 예제구조물의 해석을 통해 정확성과 효용성에 대하여 검토하였다. 본 연구를

통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 요소의 강성행렬을 구성할 때 개구부가 존재하는 부분을 적분에서 제외함으로써 얻은 평판요소는 개구부의 크기가 전단벽에 비하여 작을 때는 세분모델과 해석결과가 비슷하였으나 개구부의 크기가 커지면 오차가 크게 발생하였다. 또한 개구부 주위의 응력집중현상을 제대로 표현하지 못하는 문제가 있다.
- 2) 개구부 상단부분을 등가의 보로 치환한 모형화 방법의 경우, 개구부의 폭이 작은 경우에는 세분 모델과 비슷한 해석결과를 얻을 수 있었으나 개구부의 폭이 커지는 경우 구조물의 횡방향 강성을 과소평가하게 되어 세분모델 보다 상당히 큰 횡변위를 나타내었다.
- 3) 본 연구에서 제안한 방법을 사용하면 개구부의 개수, 크기, 위치에 관계없이 세분모델과 해석결과가 매우 비슷하였다. 또한 개구부 주위 응력집중현상을 비교적 정확하게 표현할 수 있었고 일반 판요소가 갖는 자유도수와 동일한 자유도수를 이용하여 개구부가 있는 전단벽을 해석할 수 있었다.
- 4) 본 연구는 2차원 구조물의 정적해석에만 국한하여 제안된 방법의 유용성을 판단하였다. 따라서 추후에 동적해석 및 3차원 구조물에 적용성에 관한 연구가 뒤따라야 한다고 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2001년도 두뇌한국21사업 핵심분야 사업비와 서울대학교 지진공학연구센터(KEERC)를 통한 한국과학재단 우수연구센터에 의하여 지원되었음을 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 ang Phill-Seung Lee and Yong-Myung Park, "Defect-free 4-node flat shell element: NMS-4F element," *Structural Engineering and Mechanics*, Vol.8, No.2, 1999, pp.207~231
3. Adanan Ibrahimbegovic, Robert L. Taylor and Edward L. Wilson, "A robust quadrilateral membrane finite element with drilling degrees of freedom," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.30, 1990, pp.445~457
4. Thomas J.R. Hughes, "On drilling degrees of freedom," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.72, 1989, pp.105~121
5. 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
6. 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
7. William Weaver,jr., Dong-Guen Lee, and George Derbalian, "Finite element for shear walls in multistory frames," *Journal of the Sructural Division ASCE*, Vol.107, 1981, pp.1365~1369
8. 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