

개구부가 있는 고층 벽식 구조물의 효율적인 3차원 해석

Efficient Three Dimensional Analysis of High-Rise Shear Wall Building with Openings

김 현 수† 남궁 계 홍* 이 동 근**
Kim, Hyun-Su Nam-Gung, Kye-Hong Lee, Dong-Guen
(논문접수일 : 2001년 11월 8일 ; 심사종료일 : 2002년 4월 30일)

요 지

현재 국내에서는 벽체와 바닥판으로만 구성된 벽식 구조형식의 아파트 건물이 많이 사용되고 있다. 또한 횡력에 대한 저항이 뛰어나기 때문에 전단벽 코어를 갖는 입체골조구조물이 고층 빌딩의 구조시스템으로 자주 이용된다. 기능적인 이유로 인해 이러한 구조물들의 전단벽에는 하나 또는 여러 개의 개구부가 발생하게 된다. 개구부가 있는 전단벽을 정확하게 해석하기 위해서는 여러 개의 유한요소를 사용하여 구조물을 세분모형화하는 것이 필요하다. 그러나, 전체 구조물을 유한요소로 세분하여 모형화하는 것은 막대한 해석시간과 컴퓨터 메모리를 소요하게 된다. 개구부의 수, 크기, 위치에 상관없이 적용할 수 있는 효율적인 해석기법이 본 논문에서 제안되었다. 제안된 해석기법에서는 슈퍼요소와 부분구조, 행렬응축, 가상보 등을 이용하였고 제안된 해석기법의 효율성을 검증하기 위해 벽식구조물과 전단벽 코어를 갖는 입체골조구조물의 3차원 해석이 수행되었다. 예제구조물의 해석을 통해 제안된 해석기법이 해석시간과 컴퓨터메모리를 크게 감소시키고, 정확한 해석결과를 얻을 수 있음이 확인되었다.

핵심용어 : 개구부가 있는 전단벽, 슈퍼요소, 행렬응축기법, 부분구조기법, 가상보

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.

Keywords : shear wall with openings, super element, substructuring technique, matrix condensation, fictitious beam

† 책임저자, 정희원 · (주)마이다스아이티 개발1팀 대리
전화: 02-2142-0023; Fax: 02-2142-0011
E-mail: hskim@midasit.com

* 성균관대학교 건축공학과 석사과정

** 정희원 · 성균관대학교 건축공학과 교수

• 이 논문에 대한 토론을 2002년 9월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2002년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

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 그림 1(a)과 같이 건축계획의 필요에 의하여 창문, 출입문, 복도 또는 설비 덕트 등으로 사용되는 개구부가 발생하게 된다. 아파트 건물에 흔히 발생하게 되는 출입문 형식의 개구부와 창문 형식의 개구부를 그림 1(b)와 (c)에 나타내었다. 이러한 개구부의 개수, 위치, 크기는 벽체의 내부응력 뿐만 아니라 전체 건물의 거동에 도 영향을 미치게 된다.

개구부가 있는 전단벽을 정확하게 해석하기 위해서는 평면응력요소로 전단벽을 세분하여 모형화 하는 것이 필요하다. 그러나 구조물 전체를 수많은 요소로 세분하여 해석하는 것은 막대한 해석시간과 컴퓨터 메모리를 필요로 하기 때문에 비효율적이다. 따라서 이러한 구조물의 효율적인 해석에 관한 연구가 여러 연구자에 의해서 수행되어 왔다.^{1)~4)} 그러나 기존의 연구에서 제안된 해석 방법의 효율성 및 정확성은 개구부의 크기와 위치에 따라서 대부분 크게 변화였다.

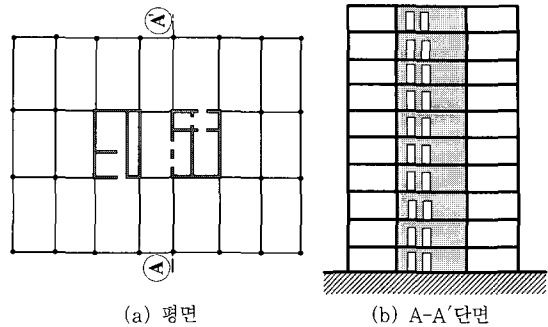
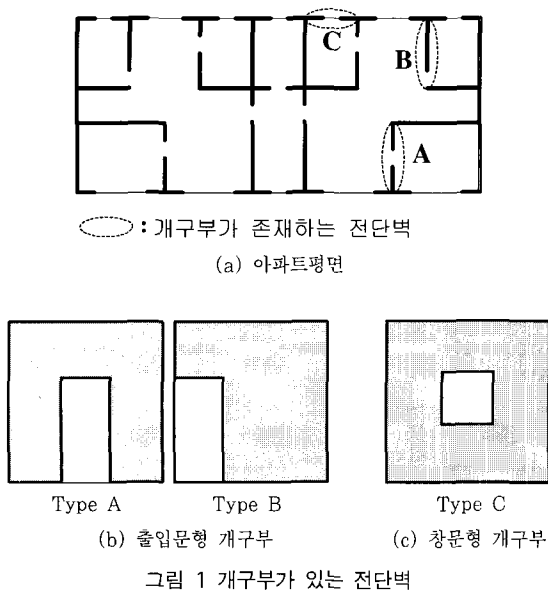


그림 2 전단벽 코어가 있는 입체골조구조물

근래에는 30-40층 규모 고층구조물의 구조형식으로 내부에 전단벽 코어가 있는 프레임 형식을 많이 사용하고 있다. 전단벽 코어와 주위의 프레임은 횡하중에 대하여 각각 휨변형과 전단변형거동을 나타내므로 구조적으로 상호 보완적인 기능을 가지며 횡하중에 저항한다. 이 구조 형식도 그림 2와 같이 내부 전단벽 코어에 엘리베이터 입구, 계단실 입구, 설비용 덕트 등의 목적으로 많은 개구부가 발생하게 된다.

위와 같은 구조물들을 정확하게 해석하기 위해서는 전단벽을 유한요소로 세분하여 모형화하는 것이 필요하나 실무에서는 개구부가 있는 전단벽을 근사적으로 모형화하여 해석하는 경우가 많다. 그림 3은 실무에서 많이 이용되는 개구부가 있는 전단벽의 해석을 위한 근사적인 모형화 방법들을 나타내고 있다. 그림 3(a)에서는 개구부의 크기가 전단벽에 비해 상대적으로 작은 경우, 개구부가 무시되는 모형화 방법을 보여주고 있다. 그림 3(b)는 개구부의 크기가 전단벽에 비해 상대적으로 큰 경우로서 이때에는 춤이 작은 전단벽을 등가의 보로 치환하여 모형화한다.

그러나, 이러한 모형화 방법들은 해석의 정확성에 한계를 갖게 된다. 개구부를 무시하는 모형화 방법은 세분모델에 비하여 개구부 만큼의 강성이 과대평가된다. 반면, 등가보를 이용하는 경우 횡방향 강성을 과소평가하게 된다. 그림 4는 개구부가 있는 전단벽의 세분모델과 등가보를 이용한 모델의 횡하중에 대한 변형형상을 나타낸 것이다. 그림에서 보여지는 것과 같이 전단벽을 등가보로 치환한 모형화 방법의 경우, 전단벽 상부의 전단변형과 하부의 전단변형이 동일한 비율을 나타내지만, 세분모델의 경우 전단벽 상, 하부 전단변형의 기울기가 다를 수 있다.

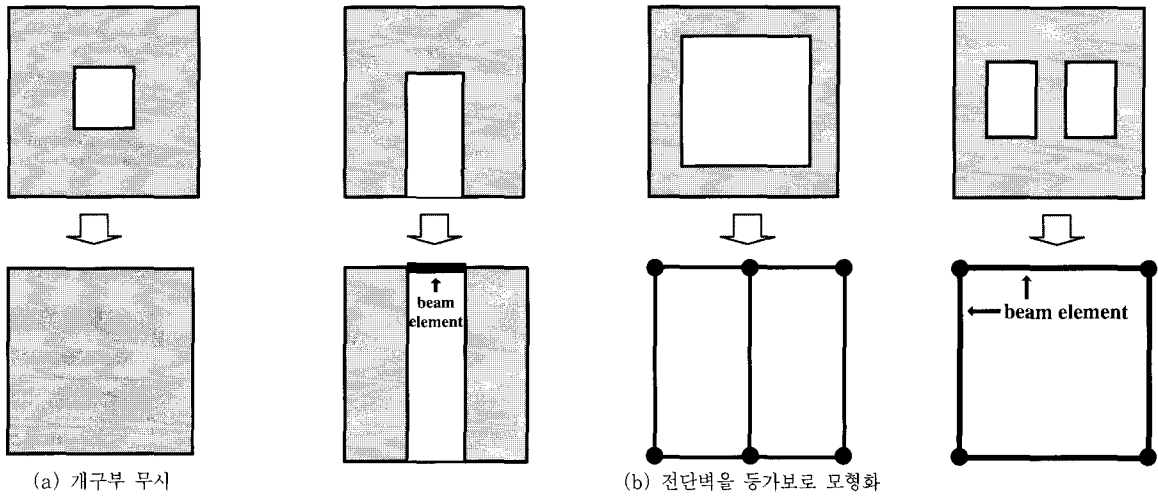


그림 3 개구부가 있는 전단벽의 근사적인 모형화 방법

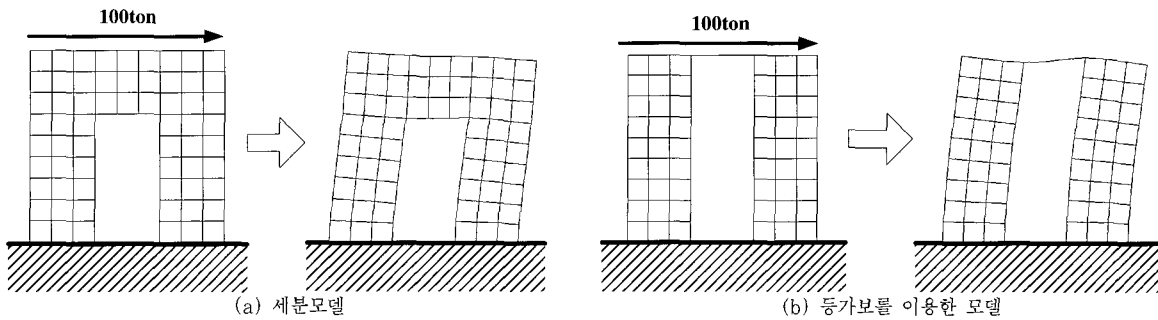


그림 4 횡하중에 대한 변형형상 비교

따라서, 세분모델보다 등가보를 이용하는 모델이 횡방향 강성을 과소평가하게 되어 횡변위가 크게 발생한다.

본 논문에서는 앞서 언급한 근사적인 모형화 방법들의 문제를 해결하면서 전단벽에 존재하는 개구부의 크기, 위치 및 개수에 상관없이 적용할 수 있는 해석기법을 제시하였다. 제안된 해석기법은 해석에 소요되는 자유도수와 해석시간의 감소를 위하여 슈퍼요소와 부분구조⁵⁾ 행렬응축기법⁶⁾을 사용하였고 슈퍼요소 경계부분의 변형적합조건을 만족시키기 위하여 가상보를 사용하였다. 제안된 해석기법을 사용하면 개구부를 고려하지 않은 모델과 같은 수의 자유도를 가지 고도 개구부의 효과를 고려할 수 있다. 예제해석을 통해 본 논문에서 제시한 해석기법의 효율성과 정확성을 검증하였다.

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 컴퓨터메모리를 줄일 수 있는 효율적인 해석방법이다. 그림 5(a)는 벽식구조물의 세분모델을 표현한 것이다. 이 세분모델을 구조형태가 동일한 부분으로 분리하면 그림 5(b)와 같다. 분리된 전단벽과 바닥판에 대하여 최소한의 공유절점만 남긴채 나머지 절점은 행렬응축기법을 통하여 소거함으로써 그림 5(c)와 같이 벽체를 구성하는 슈퍼요소들과 바닥판을 구성하는 슈퍼요소들을 생성할 수 있다. 이렇게 생성된 슈퍼요소들에 대해 공유절점의

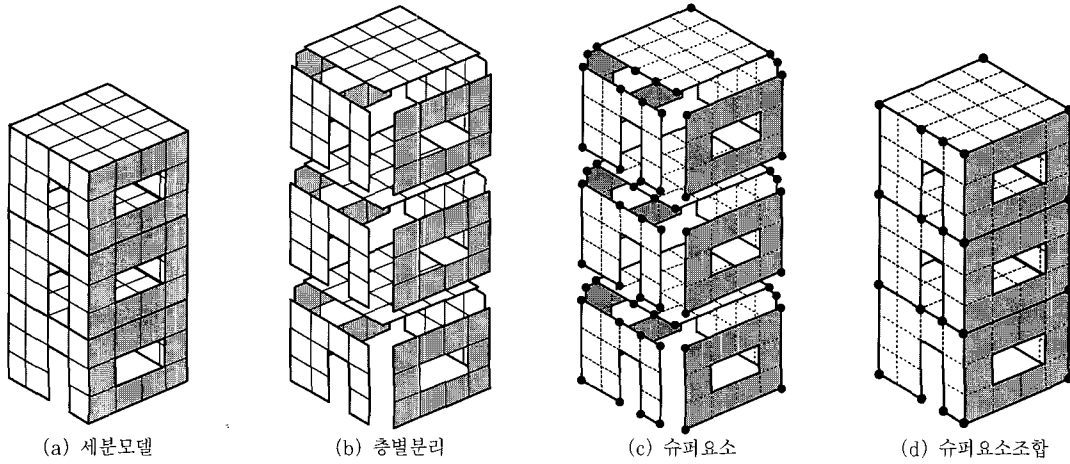


그림 5 슈퍼요소를 이용한 모형화 방법

로 조합하면 그림 5(d)와 같이 전체구조물을 모형화할 수 있다.

슈퍼요소를 생성할 때 경계부분의 모든 절점을 공유시키면 슈퍼요소 간의 변형적합조건을 만족시킬 수 있으나, 자유도수의 증가로 인해 해석의 효율성이 저하된다. 따라서, 그림 5(d)에서 보는 바와 같이 창문형 개구부가 있는 슈퍼요소의 경우에는 네모서리만 공유하고, 출입문형 개구부가 있는 슈퍼요소는 모서리와 개구부 하단 및 상단 절점만을 공유하는 것이 효율성을 유지할 수 있는 방법이다. 바닥판을 구성하는 슈퍼요소의 경우는 벽체 슈퍼요소에 생성된 공유절점에 맞추어 공유절점을 선정하면 된다. 이렇게 선정된 공유절점을 제외한 나머지 절점의 자유도를 행렬응축기법을 이용하여 소거하면 한 개의 슈퍼요소에 대한 강성행렬을 구성할 수 있다. 이와 같은 관계를 행렬 형태로 표현할 것이 식(1)과 (2)이다. 한 개의 슈퍼요소에 대하여 공유절점에 위치하는 자유도와 나머지 절점의 자유도로 정리하면 식(1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} S_{ii} & S_{ic} \\ S_{ci} & S_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_i \\ D_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_i \\ A_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 첨자 i 는 슈퍼요소의 내부절점, c 는 공유절점을 의미한다. 정적행렬응축기법에 의하여 내부절점의 자유도를 소거하고 공유절점의 자유도로 표시하면 다음과 같다.

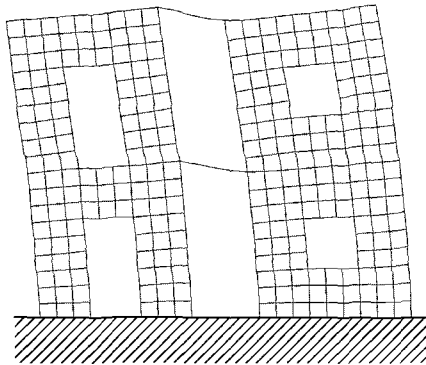
$$\begin{aligned} [S'_{cc}] [D_c] &= [A'_c] \\ [A'_c] &= [A_c] - [S_{ci}] [S_{ii}]^{-1} [A_i] \\ [S'_{cc}] &= [S_{cc}] - [S_{ci}] [S_{ii}]^{-1} [S_{ic}] \end{aligned} \quad (2)$$

행렬 $[S'_{cc}]$ 는 공유절점에 대한 슈퍼요소의 강성행렬을 의미하고 해석시에는 공유절점에 대한 자유도만 고려된다.

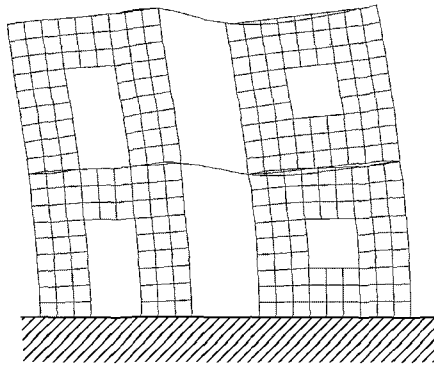
2.2 슈퍼요소 경계의 변형적합조건을 만족시키기 위한 가상보 사용

본 연구에서는 공유절점을 최소화하면서 슈퍼요소 경계부분의 변형적합조건을 만족시키기 위해 휨강성이 아주 큰 가상보¹²⁾ 사용을 제안하였다. 가상보의 강성이 지나치게 크면 행렬응축과정중에 수치오류를 발생시킬 수 있고, 작으면 변형적합조건을 만족시키지 못하는 문제가 있다. 가상보는 보통 벽체 두께를 보의 폭으로 하고, 층 높이를 보의 춤으로 한다. 그림 6과 7은 횡하중이 재하된 세분모델과 가상보가 없는 슈퍼요소의 변형형상 및 Von-Mises응력분포를 나타내고 있다. 그림 7의 Von-Mises응력 조합식은 식(3)과 같고 σ_1, σ_2 는 주응력선 방향의 응력을 의미한다.

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2]} \quad (3)$$



(a) 세분모델

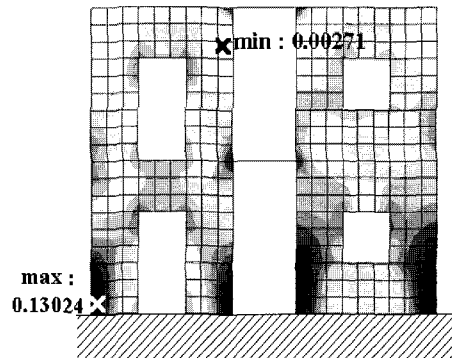


(b) 가상보가 없는 슈퍼요소를 사용한 모델

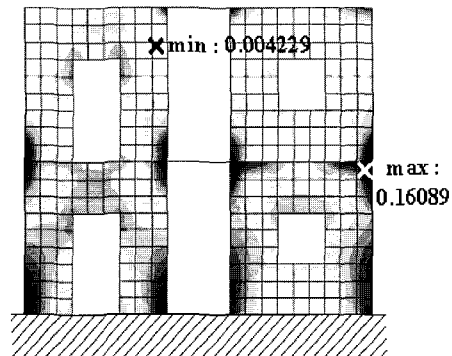
그림 6 변형형상 비교

그림 6(a)와 (b)에서 나타난 변형형상을 비교해 보았을 때 가상보가 없는 슈퍼요소를 사용한 모델의 경계 부분에서 변형적합조건이 만족되지 않음을 알 수 있다. 그림 7에 도시한 응력분포에서도 가상보를 사용하지 않는 경우, 상하 전단벽 경계에서 응력의 불연속이 나타나며 모서리에서 집중되는 현상을 확인 할 수 있다. 따라서, 슈퍼요소로 구조물을 모형화하기 위해서는 슈퍼요소간의 경계부분에서 변형적합조건을 만족시킬 수 있도록 조치를 취하여야 할 것으로 판단된다.

슈퍼요소경계의 변형적합조건을 만족시키기 위하여 본



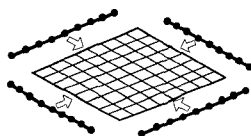
(a) 세분모델



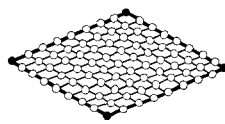
(b) 가상보가 없는 슈퍼요소를 사용한 모델

그림 7 Von-Mises 응력 비교

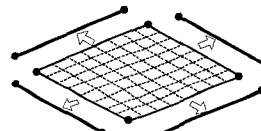
연구에서는 변형적합조건을 만족시키지 못하는 경계부분에 휩 강성이 아주 큰 가상보를 사용하였다. 그림 8은 바닥판 슈퍼요소의 가상보 사용을 보여주고 있다. 그림 8(a)와 같이 전단벽과 연결되는 경계부분에 바닥판의 격자에 따라 가상보를 나누어서 추가된한다. 그림 8(b)와 같이 슈퍼요소의 공유절점을 제외한 나머지 절점 즉, 흰색 절점의 자유도를 행렬응축 기법으로 소거시킨다. 가상보에 의해서 추가되는 강성은 슈퍼요소의 강성에서 그림 8(c)와 같이 내부 절점이 없는 보의 강성만큼 빼주었다. 비록 추가된 가상보의



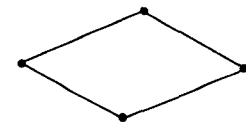
(a) 가상보 추가



(b) 행렬응축



(c) 가상보 제거



(d) 슈퍼요소

그림 8 바닥판 슈퍼요소의 가상보 사용

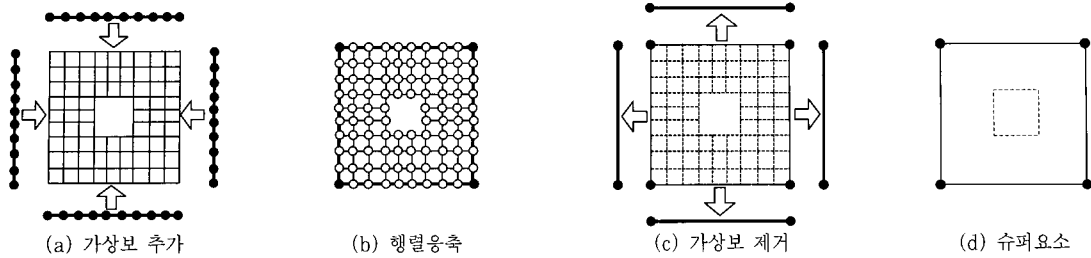


그림 9 창문형 개구부가 있는 벽체 슈퍼요소의 가상보 사용

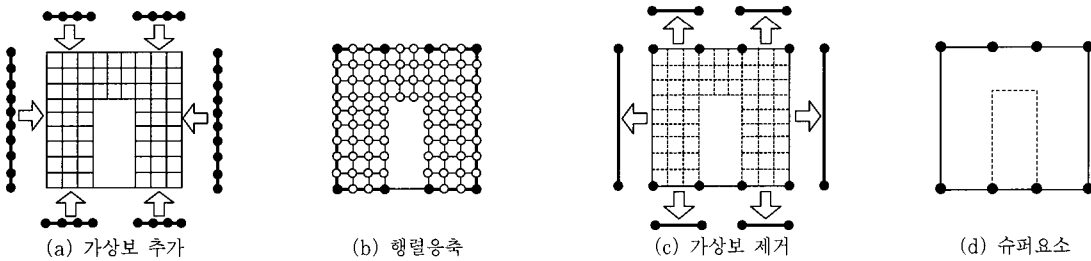


그림 10 출입문형 개구부가 있는 벽체 슈퍼요소의 가상보 사용

강성과 제거된 강성은 동일한 크기를 갖지만 슈퍼요소의 경계부에서는 추가된 보의 효과가 남게되어 변형 적합조건을 만족시키게 된다. 결과적으로 그림 8(d)와 같이 가상보의 효과가 포함된 슈퍼요소를 생성할 수 있다.

창문형 개구부가 있는 벽체 슈퍼요소의 가상보 사용을 도식적으로 표현하면 그림 9와 같다. 그림 9(a)와 같이 벽체 슈퍼요소의 경계부분에 가상보를 추가한다. 그림 9(b)에서 보는 바와 같이 공유절점을 제외한 모든 절점의 자유도를 행렬응축기법으로 소거한 후, 그림 9(c)와 같이 가상보에 의해 추가된 강성을 제거하면 그림 9(d)와 같은 슈퍼요소를 생성할 수 있다.

출입문형 개구부가 있는 벽체 슈퍼요소의 사용은 그림 10에서 보는 바와 같이 창문형 개구부가 있는 벽체 슈퍼요소의 경우와 동일한 과정을 거친다. 그러나, 개구부 하단부는 슈퍼요소와 연결되지 않으므로 변형 적합조건을 만족시킬 필요가 없다. 따라서, 그림 10(b)에서 보는 바와 같이 슈퍼요소의 상, 하단 경계부에서는 가상보가 한 변에 두 부분으로 나뉘어 추가됨을 알 수 있다.

2.3 가상보의 효용성

가상보의 효용성을 검증하기 위하여 그림 6에서 사용된 구조물을 가상보가 있는 슈퍼요소로 모형화하여 정적해석을 수행하였다. 가상보가 있는 슈퍼요소를 사

용한 모델의 변형형상을 표현한 그림 11(a)는 앞서 살펴본 세분모델의 변형형상인 그림 6(a)와 매우 유사하다. 또한, 그림 11(b)에서 보는 가상보가 있는 슈퍼요소를 사용한 모델의 Von-Mises 응력분포가 세분모델의 응력분포인 그림 7(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.

3. 가상보가 있는 슈퍼요소를 이용한 해석기법의 유용성

본 연구에서 제안된 가상보가 있는 슈퍼요소를 이용한 해석기법은 면내회전자유도가 없는 쉘요소를 사용한 슈퍼요소라 하더라도 가상보의 영향으로 인해 공유절점에서 면내회전강성이 생성된다. 따라서, 프레임과 같이 면내회전자유도가 있는 요소와 특별한 고려없이 연결할 수 있게 하는 유용성이 있다.

3.1 면내회전자유도가 있는 쉘요소

벽식 구조물의 3차원 해석을 위해서는 면내거동 뿐

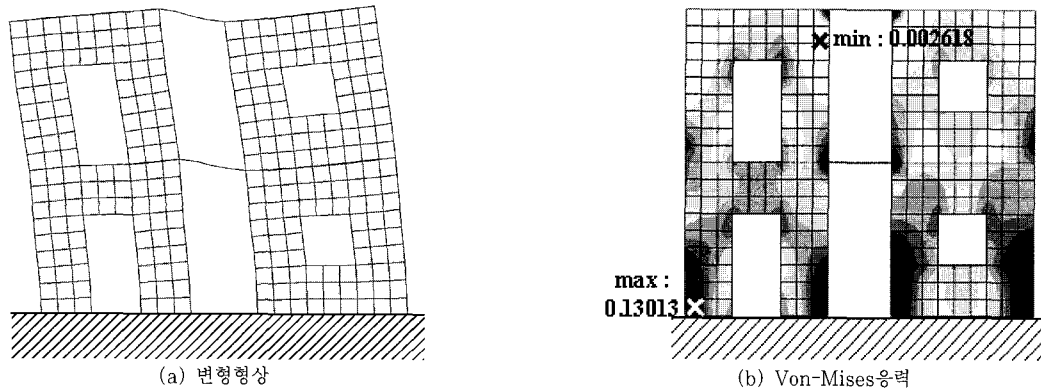


그림 11 가상보가 있는 슈퍼요소를 사용한 모델

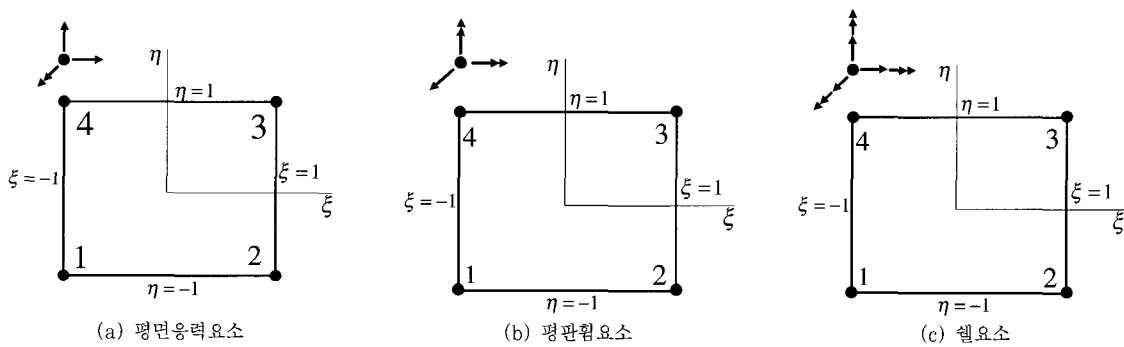


그림 12 면내회전자유도가 있는 쉘요소

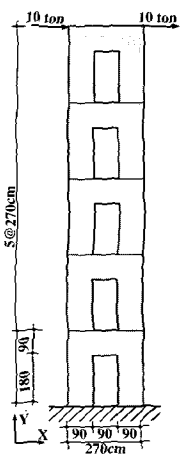
아니라 면외거동을 표현할 수 있는 요소가 필요하다. 본 연구에서는 평면응력요소와 평판휨요소를 결합하여 쉘요소의 강성행렬을 유도하였다. 평면응력요소로는 그림 12(a)에서 보는 바와 같이 면내회전자유도가 존재하는 12자유도 요소를 이용하였다(Lee 요소).⁷⁾ Lee 요소는 면내회전자유도가 있기 때문에 특별한 고려없이 보요소와 연결할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 평면응력요소내의 면내회전자유도에 대한 많은 연구가 수행되어 왔는데^{8)~10)} 그 중에서도 Lee 요소를 사용하는 이유는 요소 네 변의 형상함수가 3차 곡선으로 일반 보요소와 동일하기 때문에 보요소와의 적합조건이 뛰어나고, 요소 내부의 전단응력변화를 하나의 요소만 사용하여도 정확하게 나타낼 수 있기 때문이다. 이와 같은 평면응력요소에 그림 12(b)의 일반적인 평판휨요소¹¹⁾를 결합하여 그림 12(c)와 같은 절점 당 자유도가 6개인 쉘요소를 유도하였다.

3.2 예제구조물 해석

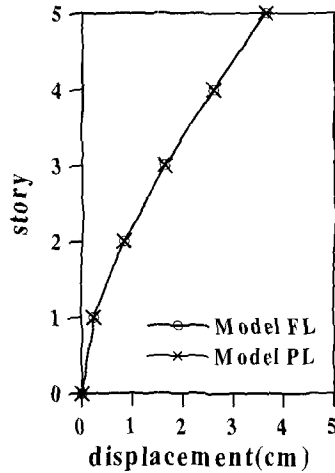
앞 절에서 유도한 면내회전자유도가 있는 쉘 요소를 이용하여 제안된 해석기법의 정확성을 검증하기 위하여 그림 13(a)와 같이 전단벽만으로 구성된 구조물에 대해 정적해석 및 고유치 해석을 수행하였다. Model FL은 가장 정확한 해석결과라고 가정할 수 있는 세분모델이다. Model PL은 본 논문에서 제안한 가상보가 있는 슈퍼요소를 이용한 모델이다.

그림 13(a)에서 보는 바와 같이 층변위 비교에서 세분모델과 제안된 모델의 결과가 매우 유사함을 알 수 있다. 그림 13(b)는 고유치해석을 수행하여 각 모델의 고유진동주기를 비교한 결과이다. 정적해석과 마찬가지로 두 모델의 고유진동주기가 거의 일치하는 결과를 보여주고 있다.

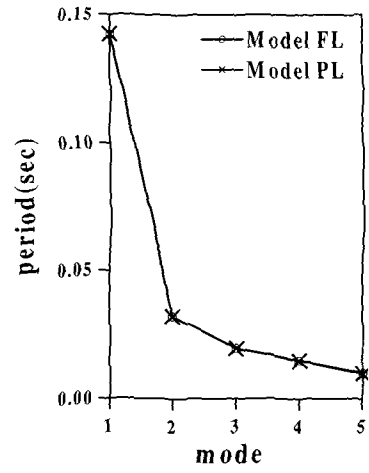
본 절에서 사용하는 쉘요소는 면내회전자유도를 갖고 있기 때문에 보요소와의 연결이 용이하다. 이러한 점을 고려하여 그림 14(a)와 같이 전단벽에 프레임이



(a) 예제구조물

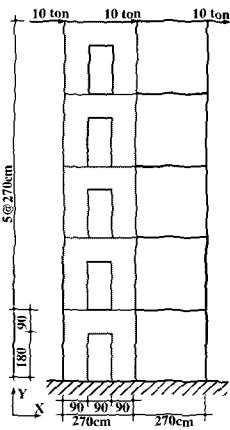


(b) 층변위

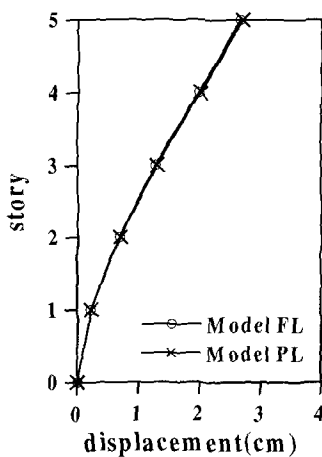


(c) 고유진동주기

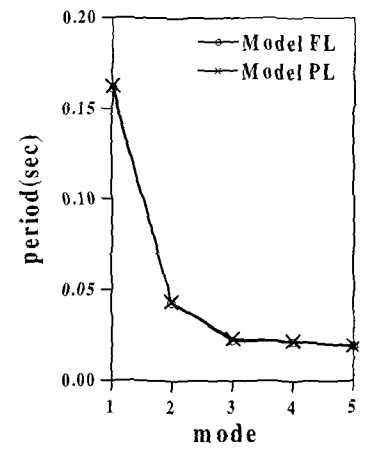
그림 13 출입문형 개구부가 있는 전단벽



(a) 예제구조물



(b) 층변위



(c) 고유진동주기

그림 14 프레임이 연결된 출입문형 개구부가 있는 전단벽

연결된 예제구조물의 해석을 수행하였다. 정적해석결과, 그림 14(b)에서 보는 바와 같이 비교적 정확한 결과라 생각되는 Model FL과 제안된 해석기법이 적용된 Model PL의 층변위가 매 층 유사한 결과를 보이고 있다. 고유치해석에서도 마찬가지로, 그림 14(b)에서와 같이 거의 동일한 고유진동주기를 얻을 수 있었다.

3.3 면내회전자유도가 없는 셸요소

일반적으로 많이 이용되는 면내 회전자유도가 없는

8자유도 평면응력요소(Q4 요소)¹¹⁾를 프레임과 연결하게 되면 프레임의 면내 휨 강성이 평면응력요소에 전달되지 않는다. 따라서, 집합부에서 특별한 고려를 해야만 보요소와 연결할 수 있다. 그러나, 슈퍼요소와 가상보를 이용한 해석기법을 이용하게 되면 면내회전자유도가 없는 평면응력요소를 사용하더라도 프레임과 연결할 수 있다. 그림 9(b)는 출입문형 개구부가 있는 전단벽에 가상보를 추가하는 것을 나타낸다. 이렇게 추가된 가상보의 휨강성은 모서리 절점만 남기고 행렬응축 하더라도 그 효과가 유지된다. 따라서, 가상보에 의

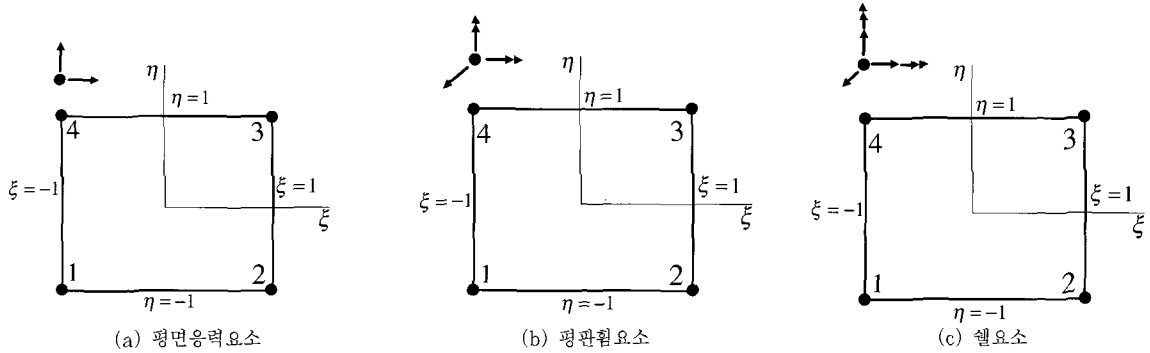


그림 15 면내회전자유도가 없는 셸요소

해 휨강성이 생기게 되고 이 절점에 프레임이 연결될 수 있다. 그림 15에서 면내회전자유도가 없는 셸요소를 유도하는 과정을 도시하였다. 그림 15(a)는 면내회전자유도가 없는 8자유도 평면응력요소인 Q4 요소이다. Q4 요소와 그림 15(b)의 일반적인 평판휨요소를 결합시키면 그림 15(c)에서 보는 바와 같이 절점당 5개 자유도를 갖는 셸요소를 유도할 수 있다.

3.4 예제구조물 해석

면내회전자유도가 없는 셸요소를 기본요소로한 슈퍼요소의 사용성을 검증하기 위해 그림 16(a)와 같은 전단벽으로 구성된 예제구조물에 대해 정적해석 및 고유치해석을 수행하였다. Model FL과 Model FQ는 세

분모델로서 전자는 면내회전자유도가 있는 셸요소를 이용하였고, 후자는 면내회전자유도가 없는 셸요소를 이용한 모델이다. Model PL과 Model PQ는 제안된 해석기법을 적용한 모델로서 전자는 면내회전자유도를 갖고 있고 후자는 면내회전자유도가 없는 셸요소를 이용하였다. 네 가지 해석모델 중에서 가장 정확한 해석 결과를 보일 것으로 판단되는 모델은 Model FL이다. 해석 결과, 그림 16(b)와 (c)에서 정적 층변위 및 고유진동주기가 모든 경우에 동일한 결과를 보이고 있다. 그림 17(a)의 예제구조물은 프레임이 연결된 벽식구조물이다. 정적해석 수행결과, 그림 17(b)에서 보는 바와 같이 면내회전자유도가 없는 세분모델 Model MQ는 다른 모델에 비하여 층 변위가 크게 발생하였다. Model MQ는 비록 세분모델이지만 면내회전자유도가 없는 셸요소를 사용하였기 때문에 프레임과 연결

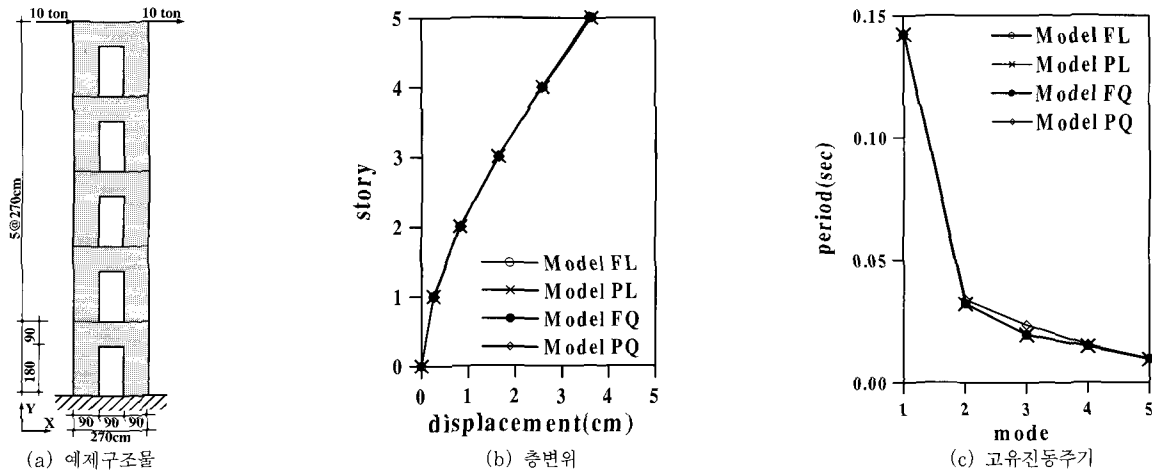


그림 16 출입문형 개구부가 있는 전단벽

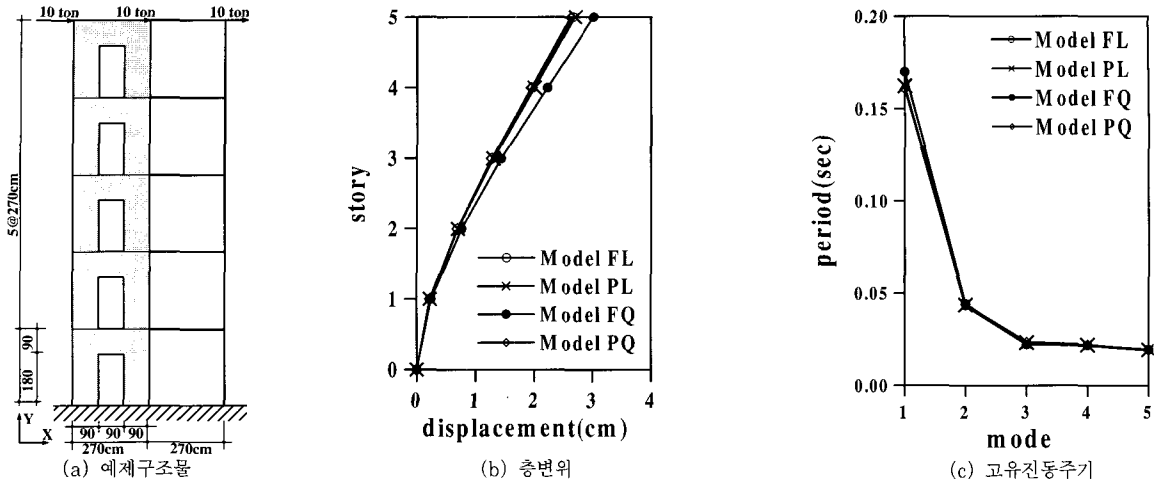


그림 17 프레임이 연결된 출입문형 개구부가 있는 전단벽

되지 않는다. 그러나, 면내회전자유도가 없는 쉘요소를 사용하더라도 제안된 해석기법을 적용한 Model PQ는 다른 모델들과 거의 유사한 층변위를 나타내었다. 이는 추가되는 가상보의 휨강성이 프레임과 연결되는 회전 자유도에 영향을 주었기 때문이다. 고유치해석에서도 마찬가지로 Model MQ를 제외한 나머지 모델이 유사한 결과를 보이고 있다.

위와 같은 해석결과를 통해 본 논문에서 제안된 가상보가 있는 슈퍼요소를 이용한 해석기법은 면내회전 자유도의 유무에 상관없이 어떠한 쉘요소에도 적용할 수 있는 유용성을 확인하였다.

4. 부분구조를 이용한 3차원 벽식구조물의 모형화

4.1 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 18은 벽식아파트의 벽체를 부분구조로 모형화하는 과정을 나타낸 것이다. 그림 18(a)에는 부분구조로 모형화하고자 하는 기준층 벽체의 세분모델을 표현하였다. 세분된 모델을 그림 18(b)와 같이 슈퍼요소 생성을 위해 분리한다. 분리된 전단벽은 입면에 따라 동일한 형

태가 여러 개 생기게 되는데 구조형태가 동일한 전단벽은 하나의 슈퍼요소로 모형화 한다. 공유절점을 제외한 나머지 절점의 자유도를 행렬응축기법에 의해 소거하면 그림 18(c)와 같은 여러 개의 슈퍼요소를 생성할 수 있다. 생성된 슈퍼요소를 조합하면 그림 18(d)와 같이 기준층 벽체를 구성하는 부분구조가 생성된다.

4.2 부분구조를 이용한 바닥판의 모형화

바닥판을 부분구조로 모형화 하는 과정은 그림 19와 같다. 그림 19(a)는 아파트 평면의 바닥판을 세분한 모델이다. 그림 19(b)는 세분한 바닥판을 슈퍼요소 생성을 위해 단위 세대와 계단실로 나눈 형태이다. 나누어진 단위 세대와 계단실은 그림 19(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 19(d)와 같이 아파트 한 층의 바닥을 나타내는 부분구조를 형성할 수 있다. 생성된 바닥판 부분구조를 매 층마다 재사용한다면 모형화 과정의 편의와 해석의 효율성을 얻을 수 있다.

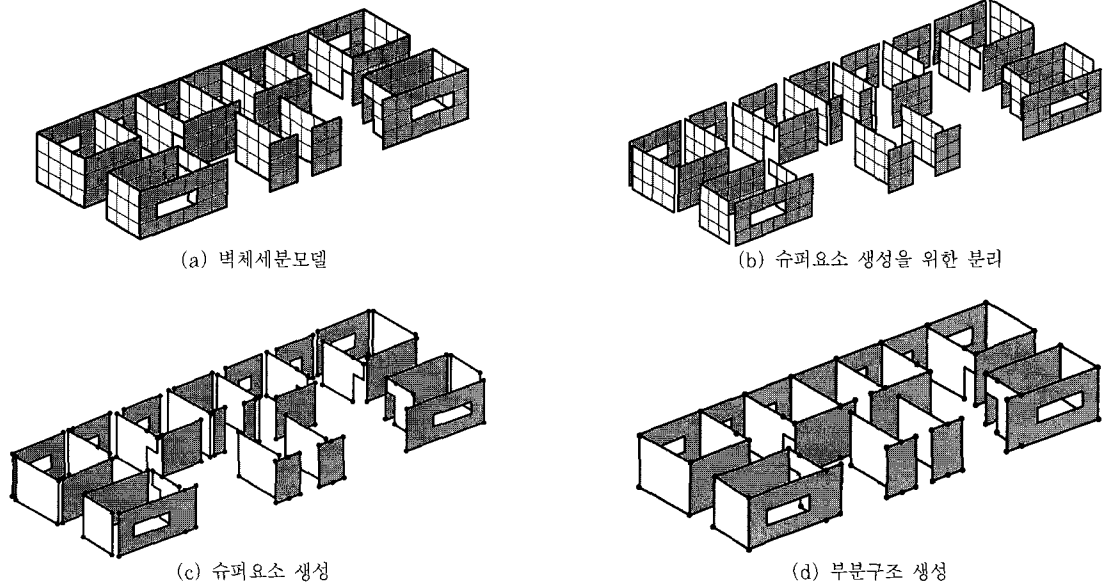


그림 18 부분구조를 이용한 벽체의 모형화 과정

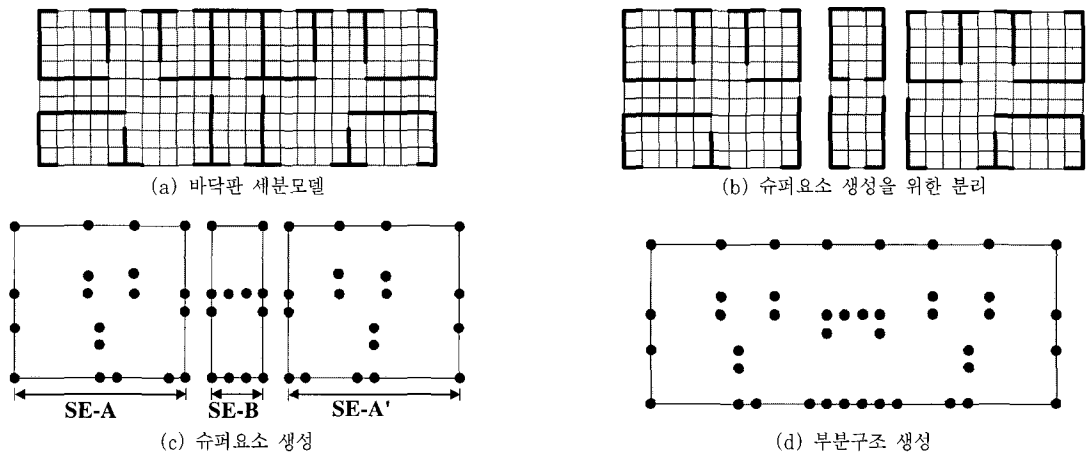


그림 19 부분구조를 이용한 바닥판의 모형화 과정

4.3 부분구조를 이용한 3차원 벽식 구조물의 모형화

전체구조물은 벽체와 바닥판을 각각의 부분구조로 모형화 한 후에 이를 조합하여 모형화한다. 그림 20은 바닥판 부분구조와 벽체 부분구조를 조합하여 기준층 모델을 완성하는 과정을 보여주고 있다. 4.1절과 4.2절에서 생성한 벽체 부분구조와 바닥판 부분구조간의 공유절점을 최소화하여 기준층을 모형화하

고, 모형화된 기준층을 전체구조물의 층 수 만큼 재사용하게 된다. 이때 각 층수에 따라 벽체의 두께가 달라진다 하더라도, 두께에 대한 비율을 고려하여 강성행렬에 곱하면 쉽게 해당 층의 강성행렬을 구할 수 있다. 따라서, 부분구조를 이용하여 전체구조물을 모형화하면 동일한 구조물에 대한 세분모델에 비하여, 해석시간과 컴퓨터메모리를 급격하게 감소시킬 수 있다.

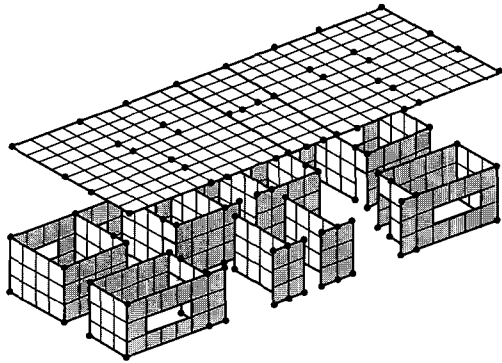
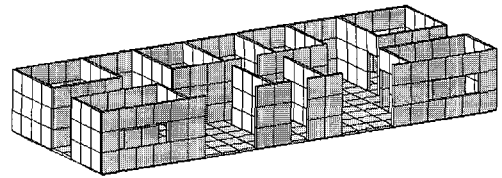
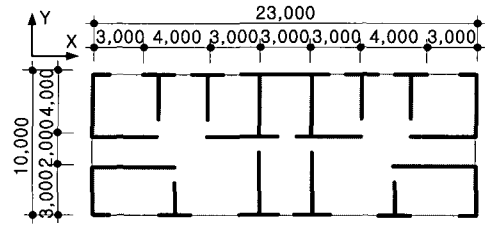


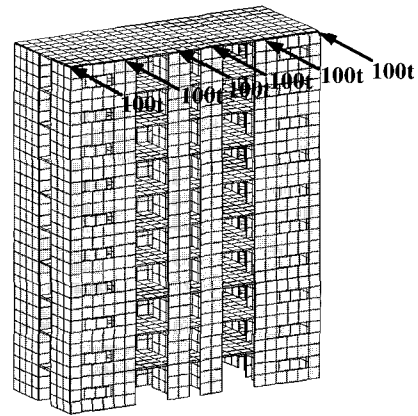
그림 20 부분구조를 이용한 기준층 모형화



(a) 기준층 투상도



(b) 평면도



(c) 구조물 투상도

그림 21 예제구조물

5. 예제구조물 해석

제안된 해석기법의 효율성을 검증하기 위해 현실적인 규모의 벽식구조물과 전단벽코어를 갖는 입체골조 구조물에 대해 정적 및 고유치해석, 지진해석을 수행하였다. 세분모델 Model FL은 가장 정확한 해석결과를 보일 것으로 판단된다. 실무에서 많이 이용되는 모형화 방법인 전단벽을 등가의 보로 치환한 모델은 Model EL이라 하고 본 논문에서 제안한 모형화 방법인 슈퍼 요소와 가상보를 이용한 모델은 Model PL이라 한다. 본 예제구조물은 면내회전자유도가 있는 쉘요소를 기본 요소로 하여 해석을 수행하였다.

5.1 벽식구조물

5.1.1 예제구조물

예제구조물은 그림 21에서 보는 바와 같이 전단벽식 아파트이다. 그림 21(a)와 같이 벽체에는 창문형 개구부와 출입문형 개구부를 갖고 있다. 그림 21(b)는 예제구조물의 평면도로서 가운데 부분의 계단실을 중심으로 좌우 대칭인 2세대 평면임을 알 수 있다. 예제구조물은 총 20세대의 10층 규모이다.

5.1.2 예제구조물 해석 결과

그림 21의 예제구조물에 대해 정적해석 및 고유치 해석, 시간이력해석을 수행하였고 해석결과를 그림 22에 나타내었다. 정적해석결과 그림 22(a)에서 보는 바와 같이 제안된 해석기법이 적용된 Model PL과 가장 정확한 결과를 보일 것으로 판단이 되는 Model FL의

횡변위가 거의 유사함을 알 수 있다. 그러나, 실무에서 많이 쓰이는 모형화 방법인 Model EL은 횡방향 강성을 과소 평가하여 Model FL에 비해 큰 층변위를 보이고 있다. Model FL의 경우 전단벽 상단의 전단변형이 하부에 비해 작게 발생하지만 등가보를 이용한 Model EL은 전단벽 상하부의 전단변형이 동일하다. 따라서, 전단벽 상부만 볼 때, Model ML에 비해 Model EL은 더 큰 전단변형을 일으키게 되고 횡방향 강성을 과소 평가하게 된다. 고유치해석 결과에서도 마찬가지로 Model EL의 고유진동주기가 다른 모델에 비하여 과대 평가되고 있음을 알 수 있다. 각 모델에 대해 시간이력해석을 한 결과를 그림 22(c)에서 나타내었다. 사용된 하중은 El Centro(NS.1940) 지진가속도를

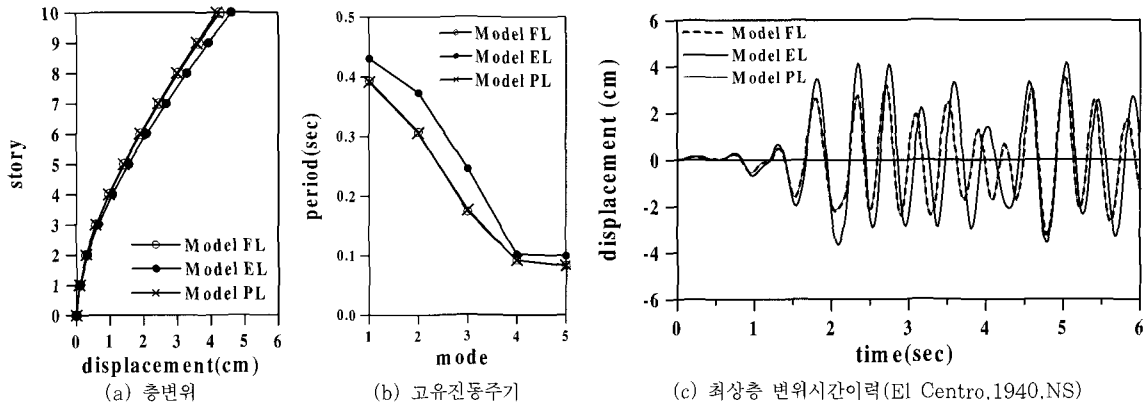


그림 22 해석결과 비교

이용하였고 해석결과 세분모델인 Model FL과 제안된 해석기법이 적용된 Model PL은 비교적 유사한 결과를 보이고 있으나 Model EL은 횡방향 강성이 과소 평가되어 다른 모델에 비해 변위가 더 크게 발생하게 된다. 표 1은 예제구조물에 대한 각 해석기법의 해석 소요시간을 비교한 것이다. 세분모델인 Model FL은 자유도수가 가장 많아 약 132분의 해석시간을 필요로 하였다. 등가보를 이용한 모형화 방법인 Model EL의 경우, 실무에서는 각 층 강막가정을 적용하여 자유도수를 최소화 하지만 본 논문에서는 바닥판을 모형화한 모델을 이용하였기 때문에 자유도수가 급격히 늘어나게 된다. 해석소요시간은 약 127분 가량 소요되었다. 앞에서 살펴본 바와 같이 등가보를 이용한 모형화 방법은 횡방향 강성을 과소평가하여 정확한 해석결과를 얻을 수 없었다. 본 논문에서 제안한 해석기법을 적용한 Model PL은 약 5분 가량의 해석시간이 소요되며 이는 세분모델인 Model FL에 비하여 약 4% 정도수준이다. 해석결과도 세분모델과 유사하게 나타남을 확인하였다. 따라서, 본 논문에서 제안한 해석기법을 이용하면 해석의 정확성을 유지하면서 해석시간을 크게 줄일 수 있음을 확인하였다.

5.2 전단벽코어가 있는 입체골조구조물

5.2.1 예제구조물

최근에 고층건물의 구조형식으로 전단벽 코어를 가진 프레임 형식이 많이 사용되고 있다. 따라서, 본 논문에서 제안된 해석기법을 이러한 구조시스템에 대한 적용성 타진을 위하여 그림 23과 같이 전단벽 코어가 있는 입체골조구조물을 예제구조물로 하여 해석을 수행하였다. 또한, 본 논문에서 벽체와 바닥판을 모형화 하기 위해 사용한 유한요소는 면내회전자유도가 있는 쉘요소이다.

이 요소는 앞에서 설명한 바와 같이 프레임과 특별한 고려없이 연결할 수 있는 장점을 갖는다. 그림 23(a)에서는 기준층 투상도를 보여주고 있는데, 전단벽 코어에 출입문형 개구부가 있음을 확인할 수 있다. 그림 23(b)와 (c)는 예제구조물의 평면도 및 단면도를 나타내고 있다.

5.2.2 예제구조물 해석 결과

그림 23의 예제구조물에 대해 정적해석 및 고유치 해석, 시간이력해석을 수행하였고 해석결과를 그림 24에

표 1 자유도수 및 해석시간의 비교

Model	자유도수	해석시간(sec)				
		강성·질량 행렬구성	평형 방정식	고유치 해석	시간이력 해석	전체
Model FL	28320	36	657	7043	226	7962(약 132분)
Model EL	27600	35	614	6748	230	7627(약 127분)
Model PL	3240	69	14	185	20	288(약 5분)

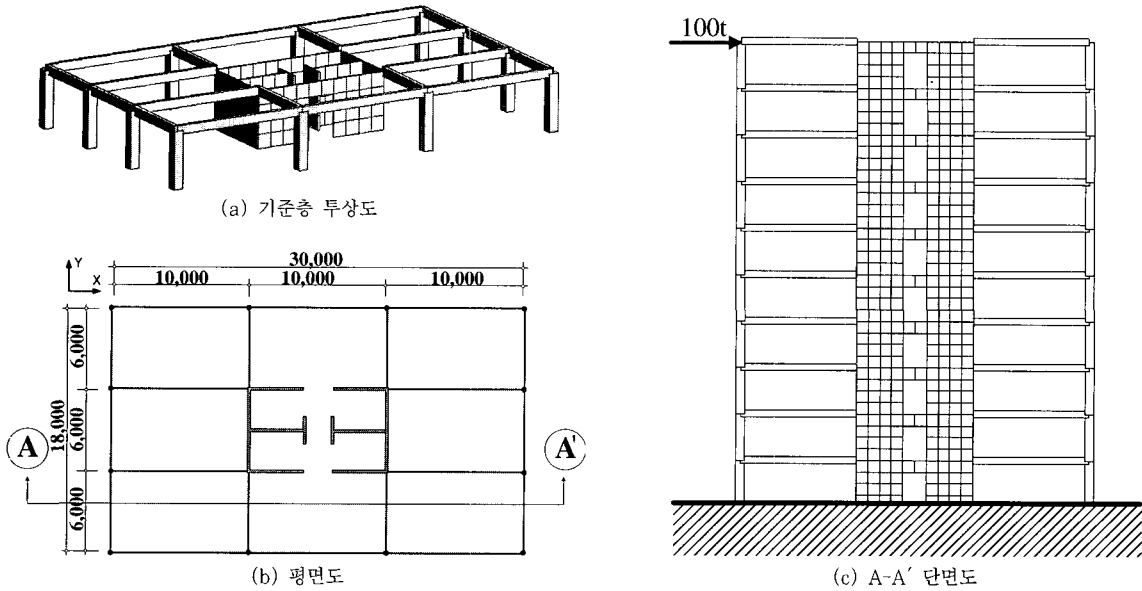


그림 23 예제구조물

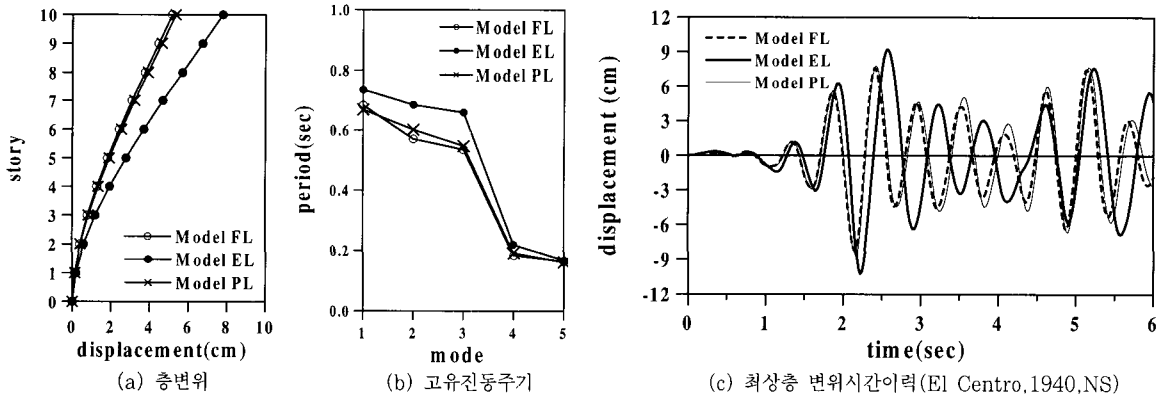


그림 24 해석결과 비교

나타내었다. 그림 24(a)에서 보는 바와 같이 Model FL과 Model PL은 유사한 층변위를 보이고 있으나, Model EL은 개구부가 있는 전단벽의 영향이 크게 작용하여 횡방향 강성이 과소평가됨을 알 수 있다. 그림 24(b)의 고유치해석 결과에서도 마찬가지로 Model EL은 다른 모델에 비하여 더 큰 고유진동주기를 보여주고 있다. 각 모델에 대해 최상층 변위시간이력해석 결과를 그림 24(c)에서 나타내었다. 등가보를 이용한 Model EL은 다른 모델에 비하여 진폭과 더불어 위상각의 차이도 크게 발생하였다. 이는 다른 모델에 비하여 고유진동주기의 차가 크기 때문이다.

6. 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 구조물과 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 면내회전 자유도가 없는 평면응력요소를 사용하더라도 공유 절점에서 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 고려해야 할 자유도수가 크게 줄어 해석시간 및 컴퓨터 메모리를 절약할 수 있으며 세분모델과 유사한 해석 결과를 얻을 수 있었다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

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 openings," *Building and Environment*, Vol. 34, 1999, pp.109~127
3. Tham, L. G., and Cheung, Y. K., "Approximate analysis of shear wall assemblies with openings," *The Structural Engineer*, Vol. 61B, 1983, pp. 41~45
4. Ali, R., and Atwall, S. J., "Prediction of natural 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. Weaver, W., Jr., Lee, D. G., and Derbalian, G., "Finite element for shear walls in multi-story frames," *Journal of the Structural Division ASCE*, Vol. 107, 1981, pp.1365~1369
8. Choi, C. K., Lee, P. S. and Park, Y. M., "Defect-free 4-node flat shell element: NMS-4F element," *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 8, No. 2, 1999, pp.207~231
9. Ibrahimbegovic, A., Taylor, R. L., and Wilson, E. L., "A robust quadrilateral membrane finite element with drilling degrees of freedom," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 30, 1990, pp.445~457
10. Hughes, T. J. R., "On drilling degrees of freedom," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 72, 1989, pp.105~121
11. Weaver, W., Jr., and Johnson, P. R., *Finite Elements for Structural Analysis*, Prentice Hall, 1984
12. 이동근, 김현수, "바닥판의 휨강성을 고려한 전단벽식 건물의 효율적인 지진해석," 한국전산구조공학회 논문집, 제14권, 제12호, 2001, pp.193~202