

개구부가 있는 전단벽의 효율적인 해석

Efficient Analysis of Shear Walls with Openings

김 현 수†

남궁 계 홍*

이 동 근**

Kim, Hyun-Su

Nam-Gung, Kye-Hong

Lee, Dong-Guen

(논문접수일 : 2001년 5월 11일 ; 심사종료일 : 2002년 4월 4일)

요 지

현재 국내에서는 벽과 슬래브만으로 이루어진 벽식 구조형식의 아파트 건물이 많이 사용되고 있다. 아파트 건물의 전단벽에는 기능적인 필요에 의하여 한 개 혹은 여러 개의 개구부가 존재할 수 있다. 이러한 개구부가 있는 전단벽의 해석에 대해서 기존에 많은 연구가 수행되어 왔으나, 적용하는데 많은 해석시간과 컴퓨터 메모리가 필요한 등 여러 가지 제한점 때문에 실제 해석 및 설계에는 별로 적용되지 못하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 기존 연구의 제한점들을 개선하여 개구부 크기, 위치 및 개수에 관계없이 적용할 수 있는 해석 방법을 제안하였다. 개구부가 있는 전단벽을 정확하게 해석하기 위해서는 전단벽을 평면응력요소로 세분화하여 모형화하는 것이 필요하다. 그러나 아파트 건물 전체를 평면응력요소로 세분화하여 모형화하는 것은 상당한 해석시간과 컴퓨터 메모리가 소요되므로 실무에 적용하기에는 어려운 점이 많다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 단점을 개선하고자 슈퍼요소와 행렬응축기법, 그리고 가상보를 사용한 해석기법을 제안하였다. 제안된 해석기법의 효율성을 검증하기 위하여 다양한 크기와 위치의 개구부가 있는 예제구조물을 선택하여 정적 및 동적해석을 수행하였다. 예제해석 결과 제안된 해석기법은 소요되는 해석시간과 컴퓨터 메모리를 대폭 줄이면서도 세분모델과 비슷한 정확성을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 개구부가 있는 전단벽, 슈퍼요소, 행렬응축기법, 가상보

Abstract

The wall system that is composed only of reinforced concrete walls and slabs is adopted on many high-rise apartment buildings recently constructed. In the apartment buildings, a shear wall may have one or more openings for functional reasons. Many researches on the analysis of shear wall with openings were performed. But, some restrictions prevent those research results being applied to practical analysis and design procedure. It is necessary to use subdivided finite elements for accurate analysis of the wall system with openings. But it would cost tremendous amount of analysis time and computer memory if the entire building structure is subdivided into a finer mesh. An efficient analysis method which can be used regardless of the number, size and location of openings is proposed in this study. The analysis method uses super element, matrix condensation technique and fictitious beam technique. Analyses of example structures having various types of openings were performed to verify the efficiency of 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, matrix condensation, fictitious beam

† 책임저자, 정회원 · (주)마이다스아이티 개발1팀 대리

전화: 02-2142-0023; Fax: 02-2142-0011

E-mail: hskim@midasit.com

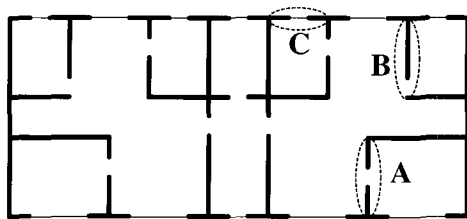
* 성균관대학교 건축공학과 석사과정

** 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 교수

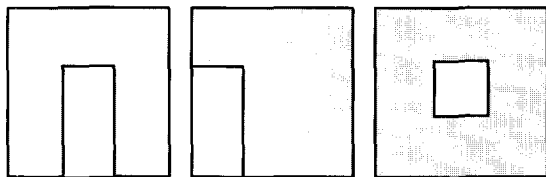
· 이 논문에 대한 토론을 2002년 9월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2002년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근 우리나라에서는 인구의 고밀화 및 지가의 상승으로 인하여 아파트 건물이 점차 고층화되어 가는 추세에 있다. 고층아파트 건물의 일반적인 구조형태는 전단벽과 슬래브로 구성되는 벽식구조이다. 이러한 벽식 구조물의 내·외부 전단벽에는 그림 1과 같이 건축계획의 필요에 의하여 창문, 출입문 등의 개구부가 발생하게 된다. 아파트 건물에 흔히 발생하게 되는 출입문 형식의 개구부와 창문 형식의 개구부를 그림 2에 나타내었다. 발생하는 개구부의 개수, 위치, 크기는 벽체의 내부응력 뿐 만 아니라 전체 건물의 거동에도 영향을 미치게 된다. 개구부가 있는 전단벽을 정확하게 해석하기 위해서는 평면응력요소를 사용하여 전단벽을 세분하여 모형화 하는 것이 필요하다. 그러나 아파트와 같은 벽식 구조물 전체를 수많은 요소로 세분하여 해석하는 것은 어렵기 때문에 개구부가 있는 전단벽의 강성을 대략적으로 계산하여 근사적인 해석을 수행하는 것에 관한 연구가 여러 연구자에 의해서 수행되어 왔다.^{1),5),6),8)} 그러나 이러한 연구에서 제안하는 해석 방법의 효율성 및 정확성은 개구부의 크기와 위치에 따라서 대부분 크게 변화하였다. 그리고 대부분의 연구가 개구부가 있는 전단벽의 강성을 근사적으로 계산하는 것에 집중되었기 때문에 전단벽 내부의 개구부 모서리에서 발생하는 응력집중현상은 표현하지 못하여왔다.



○ : 개구부가 존재하는 전단벽
그림 1 아파트 건물의 평면

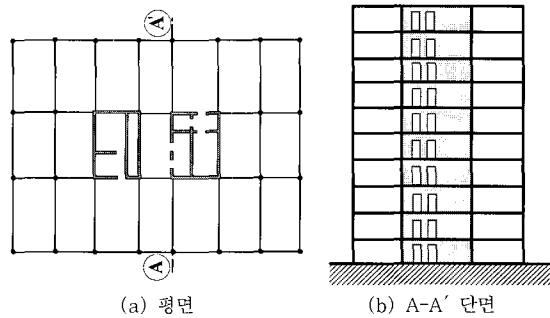


(a) Type A (b) Type B (c) Type C

그림 2 다양한 개구부의 형태

근래에는 30-40층 정도의 고층구조물의 구조형식으로 내부에 전단벽 코어를 가지는 프레임 형식을 많이 사용하고 있다. 전단벽 코어와 주위의 프레임은 횡하중에 대하여 각각 휨변형과 전단변형 거동을 나타내므로 구조적으로 상호보완적인 기능을 가지며 횡하중에 저항한다. 이 구조 형식도 역시 내부 전단벽 코어에 엘리베이터 입구, 계단실 입구, 설비용 덕트 등의 목적으로 많은 개구부가 발생하게 된다. 이러한 구조형식의 예제 구조물을 그림 3에 나타내었다. 이러한 건물을 해석하기 위해서 전단벽 코어는 평면응력요소를 사용하여 모형화하고 기둥과 보는 프레임 요소를 사용하여 모형화하게 된다. 이때, 평면응력요소에 면내 회전자유도가 없는 경우는 전단벽코어와 프레임의 연결부를 모형화하기가 어려우며 특별한 고려가 필요하다. 따라서 이전에도 다른 연구자들에 의해서 전단벽과 보요소의 연결부에 관한 연구가 수행되어 왔다.^{2)~4),7)} 그러나 몇가지 제한점 때문에 실제 해석과 설계에는 쉽게 적용되지 못하였다.

그러므로 본 논문에서는 앞에서 언급한 여러 가지 문제를 해결할 수 있고 전단벽에 존재하는 개구부의 크기, 위치 및 개수에 상관없이 적용할 수 있는 해석기법을 제시하였다. 즉, 전단벽 내부 개구부의 모서리 부분에 발생하는 응력집중현상의 표현이 가능하도록 하였고, 면내회전자유도를 가진 Lee 요소⁷⁾를 사용하여 보요소와의 연결을 용이하게 하였다. 제안된 해석기법은 효율적인 해석을 위하여 슈퍼요소와 행렬응축기법을 사용하였고, 한 층의 전단벽을 나타내는 슈퍼요소와 슈퍼요소 사이의 변형적합조건을 만족시키기 위하여 가상의 보²⁰⁾를 사용하였다. 제안된 해석 기법의 정확성을 검증하기 위하여 전단벽 내부에 있는 개구부의 위치, 크기 및 개수를 변화시킨 여러 가지 해석모델을 선택하여 정적 및 동적해석을 수행하였다.



(a) 평면 (b) A-A' 단면
그림 3 전단벽 코어를 가진 프레임 구조물

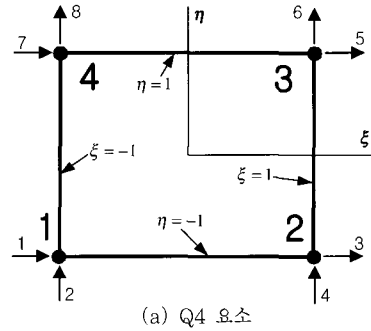
2. 개구부가 있는 전단벽의 해석

개구부가 있는 전단벽을 보다 정확하게 해석하기 위한 기존의 연구 중에서 최창근과 방명석⁵⁾에 의한 연구가 현실적으로 가장 효율적이라고 판단되는 방법이다. 이 연구에서는 요소의 자유도 수는 개구부가 없는 요소와 같지만 개구부의 영향을 비교적 효과적으로 나타낼 수 있는 요소를 개발하였다. 본 절에서는 전단벽 해석을 위한 평면응력요소로 대하여 알아보고, 기존의 연구 중에서 개구부가 있는 전단벽의 해석에 가장 효율적인 방법이라고 판단되는 방법의 장단점을 소개하고자 한다.

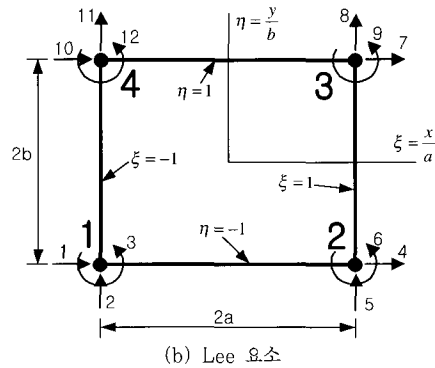
2.1 개구부가 없는 전단벽의 해석을 위한 요소

벽식 구조물을 해석하기 위해서는 일반적으로 그림 4(a)와 같이 절점 당 2개의 이동자유도를 가지는 Q4요소를 사용한다.¹⁴⁾ 그러나 이러한 요소는 요소의 변형을 나타내는 형상함수의 차수가 낮기 때문에 요소 모서리의 변형을 직선으로 밖에 표현하지 못하고 요소 내부의 전단응력 변화도 표현할 수 없다. 그리고 면내 회전자유도가 존재하지 않기 때문에 보요소와의 연결이 어렵다. 그러므로 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 면내 회전자유도를 가진 12자유도 평면응력요소 (Lee 요소)를 사용하고자 한다.⁷⁾

평면응력요소의 면내 회전자유도에 관한 연구는 많이 수행되어왔다.^{2)~4)} 그 중에서 Lee 요소를 사용하는 이유는 요소의 네 변의 형상함수가 일반 보요소와 정확하게 일치하기 때문에 보요소와의 적합성이 뛰어나고 요소 내부의 전단응력 변화를 하나의 요소를 사용하더라도 정확하게 표현할 수 있기 때문이다. Lee 요소의 효용성을 검증하기 위하여 그림 5와 같은 예제구조물을 해석하여 요소 내부의 전단응력변화를 확인하였다. 그림 6은 Q4 요소를 사용하여 한 층을 4가지 방법으로 분할하여 모형화한 모델을 나타낸다. Lee 요소는 그림 6(a)와 같이 한 층에 하나의 요소만을 사용하여 모형화 하였다. Q4 요소의 4가지 모델과 Lee 요소를 사용한 모델의 해석결과를 정확해와 비교하여 그림 7에 나타내었다. Q4요소의 해석결과를 보면, 전단벽을 세분화하여야만 정확해와 근사한 전단응력분포를 얻을 수 있다. 그러나 Lee요소의 경우 한 개의 요소를 사용하여도 정확해에 매우 유사한 전단응력분포를 얻을 수 있다.



(a) Q4 요소



(b) Lee 요소

그림 4 전단벽의 해석을 위한 평면응력요소

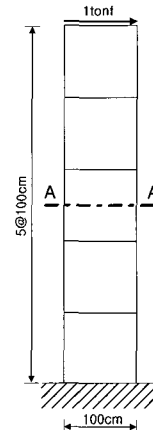


그림 5 예제구조물

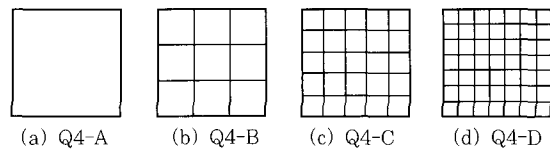


그림 6 각층 전단벽의 세분 유형(Q4요소)

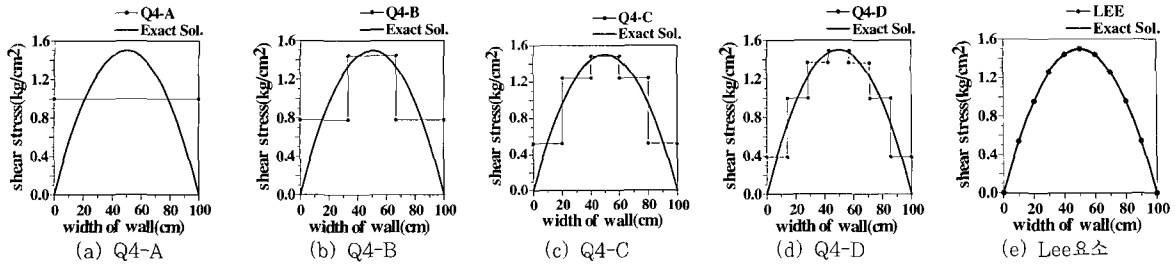


그림 7 전단응력의 비교(A-A')

2.2 개구부가 있는 전단벽의 해석을 위한 요소

개구부가 있는 전단벽 해석을 위한 요소로는 최창근과 방명석⁵⁾에서 제시된 요소가 가장 효율적인 것으로 판단되며, 이 논문에서 제안하는 개구부가 있는 평면응력요소의 강성행렬 K_c 는 그림 8과 같은 방법에 의하여 구성된다. 여기서 E 는 탄성계수 행렬, B 는 변형도-변위 관계 행렬(strain-displacement matrix),¹⁴⁾ J 는 자코비안 연산자(jacobian operator),¹⁴⁾ t 는 평면응력요소의 두께를 나타낸다. 개구부가 있는 평면응력요소 K_c 의 강성행렬 K_c 는 개구부가 없는 평면응력요소의 강성행렬 K_0 에서 개구부가 차지하는 만큼의 강성행렬 K_1 을 제거함으로써 얻을 수 있다. K_0 와 K_1 은 식(1)에 의하여 구할 수 있다. 그러나 K_0 와 K_1 의 구성방법에 차이가 있는데, K_1 은 일반적인 평면응력요소의 정식화 방법에 따라 구성하는 반면에 K_0 는 형상함수를 가정하는 단계에서 휨에 대한 비직합 변위 모드를 추가하고, 강성행렬을 구성하는 최종단계에서 정적응축에 의하여 비직합 변위를 소거함으로써 강성행렬을 구성한다. 결과적으로 비직합 변위 모드를 고려하지 않은 요소보다

더 연화된 요소를 개발할 수 있다. 개구부가 있는 평면응력요소는 개구부의 크기가 작을 경우에는 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있으나, 개구부의 크기가 커질수록 오차가 커지는 결과를 보이며, 개구부 모서리에서 발생하는 응력집중현상을 표현할 수 없는 문제점이 있다. 그러므로 위와 같은 문제점들을 개선하면서도 해석상의 효율성을 유지하는 해석기법이 요구된다.

$$K_0 = t \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \mathbf{B}^T \mathbf{E} \mathbf{B} |J| d\xi d\eta$$

$$K_1 = t \int_{b_2}^{a_2} \int_{a_1}^{b_1} \mathbf{B}^T \mathbf{E} \mathbf{B} |J| d\xi d\eta \quad (1)$$

3. 슈퍼요소를 사용한 개구부가 있는 전단벽의 해석

개구부가 있는 벽식 구조물의 해석에 있어서 앞 절에서 설명한 개구부가 있는 요소를 이용하는 방법은 효율성의 우수함에 비해 정확성에 한계가 있다. 해석의 정확성을 확보하기 위한 가장 좋은 방법은 전단벽을 여러 개의 평면응력요소로 세분하여 모형화하는 것이다.

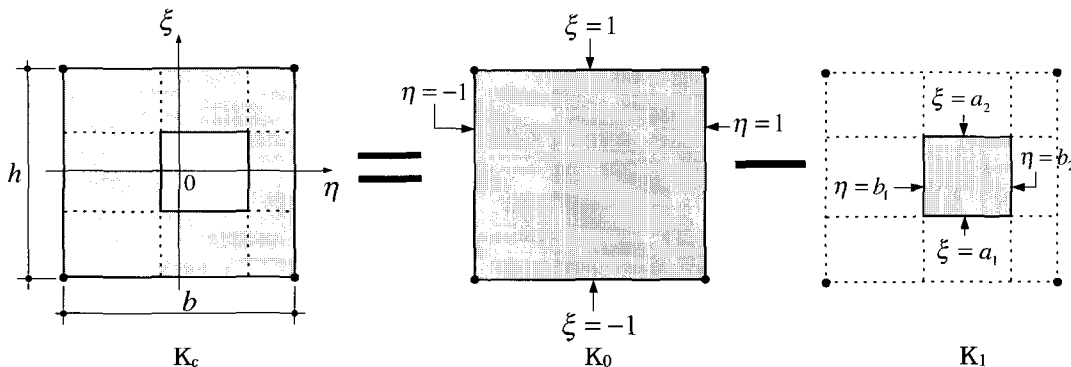


그림 8 개구부가 있는 전단벽 해석을 위한 요소의 강성행렬 구성

그러나 이렇게 전단벽을 여러 개의 평면응력요소로 세분하여 모형화하면 상당한 해석 시간과 컴퓨터 메모리가 소요되고, 구조물을 모형화 할 때에도 보 및 기둥 프레임과 전단벽의 모델격자를 다르게 취하게 됨으로 모형화 과정에 불편이 따르게 된다. 이러한 문제를 개선하기 위하여 본 논문에서는 행렬응축기법과 슈퍼요소를 이용하여 해석시간과 컴퓨터 메모리를 절약하면서 해석의 정확성을 유지할 수 있는 효율적인 해석 기법을 제안하였다.

3.1 개구부가 있는 전단벽의 해석을 위한 슈퍼요소의 개발

현재 국내에서 건설되고 있는 대부분의 고층아파트는 벽식구조물이고, 각 층마다 동일한 평면을 가진 단위세대가 반복되는 특징을 가지고 있다. 그림 9(a)는 매 층마다 동일한 크기의 개구부가 있는 벽식구조물을 단순화하여 표현한 것이다. 구조물을 평면응력요소를 사용하여 세분한 모델을 그림 9(b)에 나타내었다. 세분 모델을 구조형태가 동일한 부분으로 분리하면, 그림 9(c)와 같다. 이렇게 분리된 모델의 모서리 절점만 남기고 나머지 절점은 행렬응축기법을 통하여 소거함으로써 그림 9(d)와 같은 슈퍼요소를 만들 수 있다. 이렇게 생성한 슈퍼요소는 그림 9(e)와 같이 모서리의 두 절점만 공유함으로써 조합될 수 있다. 그림 9에서 보는 바와 같이 전체 구조물의 강성행렬은 한 개의 슈퍼요소 강성행렬을 구성한 후에 이를 조합하면 간단히 얻을 수

있다. 그리고 각 층의 전단벽 두께가 다르다 하더라도 개구부의 위치와 크기만 같으면 한 층의 강성행렬을 구한 후에 전단벽의 두께에 따른 비례상수만을 곱함으로써 다른 층의 전단벽에 대한 강성행렬을 쉽게 구할 수 있다.

슈퍼요소에서 많은 수의 절점을 고려하여 강성행렬을 구성하면 해석의 효율성 면에서 큰 효과가 없다. 그러므로 그림 9(d)와 같이 슈퍼요소 모서리 4 절점의 자유도만 고려하고 나머지 자유도는 행렬응축기법을 이용하여 소거하면 한 개의 평면응력요소를 사용하는 것과 같은 자유도 수를 유지할 수 있다. 식(2)와 식(3)은 이와 같은 관계를 행렬형태로 표현한 것이다.

$$\begin{bmatrix} S_{ii} & S_{ib} \\ S_{bi} & S_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_i \\ D_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_i \\ A_b \end{bmatrix} \quad (2)$$

식(2)는 한 개의 슈퍼요소에 대하여 모서리에 위치하는 자유도와 나머지 자유도로 정리한 식이다. 여기서 S 는 강성행렬, D 는 변위벡터, A 는 하중벡터를 나타내고, 첨자 i 는 슈퍼요소의 내부, b 는 모서리를 각각 의미한다. 정적응축기법에 의하여 슈퍼요소 내부의 자유도를 소거하고 모서리상의 자유도만 표시하면 식(3)과 같다. 행렬 $[S_{bb}]$ 는 전단벽의 모서리 절점만을 가지는 슈퍼요소의 강성행렬을 나타내고, 식(3)은 이 슈퍼요소의 평형방정식을 의미한다.

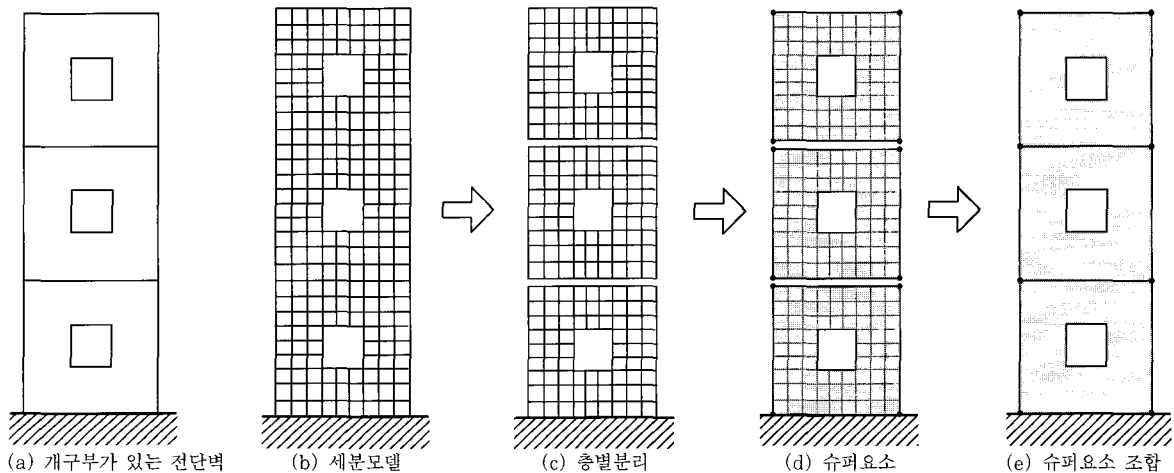


그림 9 슈퍼요소를 이용한 개구부가 있는 전단벽의 모형화

$$\begin{aligned}
 [S_{bb}]\{D_b\} &= \{A_b\} \\
 \{A_b\} &= \{A_b\} - [S_{bi}][S_{ii}]^{-1}\{A_i\} \\
 [S_{bb}] &= [S_{bb}] - [S_{bi}][S_{ii}]^{-1}[S_{ib}]
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

3.2 슈퍼요소 경계부분의 적합조건

해석의 효율성을 위하여 슈퍼요소 간의 공유절점을 각 요소의 모서리 절점만으로 하였을 때의 자유도 수는 평면응력요소 한 개만을 사용한 경우와 같다. 그러나 슈퍼요소간에 모서리 절점만을 공유하는 경우에는 서로 만나는 경계부분에서 변형적합조건을 만족시키지 못하는 문제점이 있다. 그리고 이러한 모형화 방법은 경계상의 모든 절점을 공유하는 경우보다 건물의 횡방향 강성을 과소평가 하게된다. 그러므로 해석의 정확성을 높이기 위해서 슈퍼요소간의 경계부분에서 변형적합조건을 만족시켜야 한다. 이러한 변형적합조건을 만족시키기 위해서는 슈퍼요소 경계상의 모든 절점을 공유해야 하는데, 그렇게 되면 자유도의 수가 증가하게 되어 슈퍼요소 사용의 효율성이 떨어지게 된다. 그러므로 개구부가 없는 평면응력요소와 같은 수의 자유도를 가지는 개구부가 있는 슈퍼요소를 사용하여 효율성을 유지하면서 슈퍼요소 경계부분의 변형적합조건을 만족시킬 수 있는 해석기법이 요구된다.

4. 가상보의 사용

4.1 창문형 개구부가 있는 전단벽의 해석을 위한 가상보의 사용

본 논문에서는 슈퍼요소 경계부분의 변형적합조건을

만족시키기 위하여 가상보를 사용하였다. 창문이 있는 전단벽을 슈퍼요소로 변환하는 과정에서 가상보가 어떻게 사용되는가를 그림 10에 나타내었다. 그림 10(a)와 같이 창문이 있는 전단벽 세분모델의 경계부분에 가상보를 추가하고, 그림 10(b)와 같이 행렬응축을 하여 전단벽 모서리 절점의 자유도만을 남기고 나머지 자유도는 모두 소거한다. 이렇게 하면 그림 10(c)의 슈퍼요소에 대한 강성행렬을 구성할 수 있다. 그리고 슈퍼요소의 강성행렬 구성 최종단계에서 가상보에 의해서 추가된 강성을 제거하기 위하여 그림 10(d)와 같이 내부 절점이 없는 가상보의 강성을 빼주었다. 가상보만을 생각하여 볼 때, 추가되는 가상보의 강성과 제거되는 가상보의 강성은 같지만 추가되는 가상보는 그림 10(a)와 같이 전단벽의 분할된 격자와 일치하도록 분할되어 있는 것을 알 수 있다. 따라서, 그림 10(b)의 행렬응축과정을 통하여 만들어진 슈퍼요소의 상·하부 변은 추가된 가상보로 인하여 3차곡선의 변형형상을 가지게 된다. 이러한 효과는 그림 10(d)에서 가상보를 제거하더라도 슈퍼요소에 계속 남아있게 된다.

창문형 개구부가 있는 전단벽에 대한 가상의 보의 효율성을 검증하기 위하여 그림 11에 나타낸 예제구조물을 사용하였다. 그림 11(a)는 세분모델로서 가장 정확한 모델이라고 생각되는 경우이고, 그림 11(b)는 가상보를 사용하지 않고 슈퍼요소만 사용한 모델로서 슈퍼요소 경계부분에서 변형적합조건을 만족시키지 못하는 것을 볼 수 있다. 그림 11(c)는 앞에서 소개한 가상보 이론을 바탕으로 가상보를 슈퍼요소 경계부분에 사용한 경우로서 정확해진 그림 11(a)와 거의 동일한 변형형상을 보이고 있다.

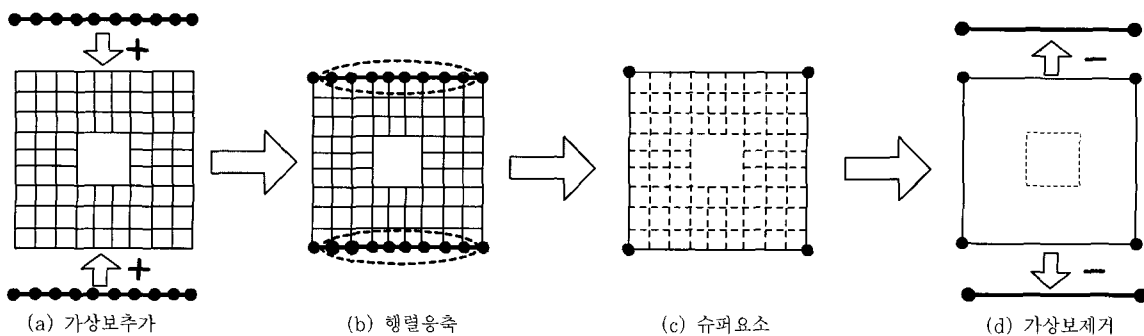


그림 10 창문이 있는 전단벽에 대한 가상보의 사용

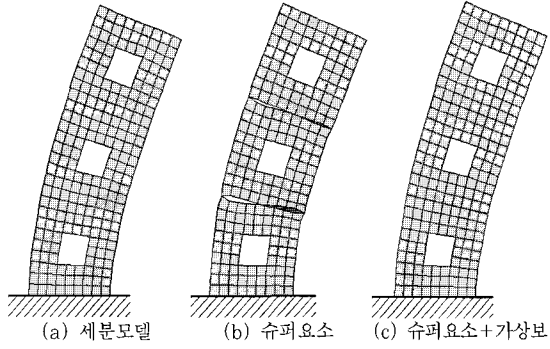


그림 11 횡하중에 의한 창문이 있는 전단벽의 변형형상

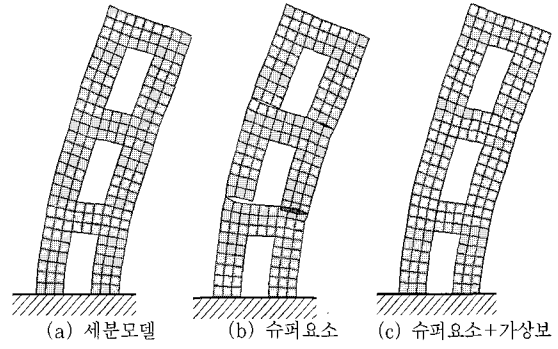


그림 13 횡하중에 의한 출입문이 있는 전단벽의 변형형상

4.2 출입문형 개구부가 있는 전단벽의 해석을 위한 가상보의 사용

출입문이 있는 전단벽에 대해서도 가상보 사용은 창문이 있는 경우와 동일한 과정을 거친다. 다만 그림 12(a)에서 보는 바와 같이 출입문 상단부분에서는 윗층과 연결되는 요소가 없기 때문에 변형적합조건의 문제가 발생하지 않으므로 가상보를 사용하지 않고, 그 외의 부분에서만 가상보를 사용하였다. 그림 12(b)와 같이 행렬응축 과정을 거쳐 내부 절점의 자유도를 소거하고 그림 12(c)의 검정색 점으로 표현된 절점의 자유도만 고려한다. 그림 12(d)와 같이 슈퍼요소 강성행렬 구성의 최종 단계에서 가상보에 의해 추가된 강성을 제거한다. 출입문이 있는 전단벽에 가상보를 사용한 경우에도 창문형 개구부와 마찬가지로 전단벽 연결부분의 변형적합조건이 만족되는 것을 그림 13을 통해서 확인할 수 있다.

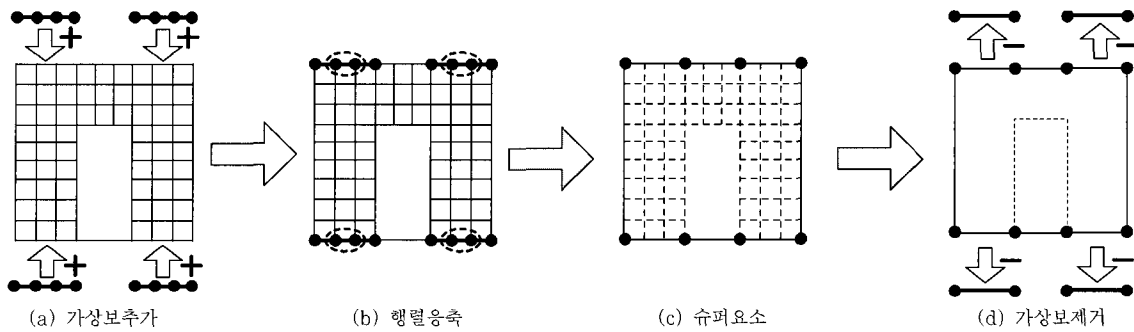


그림 12 출입문이 있는 전단벽에 대한 가상보의 사용

5. 정적해석

제안된 해석기법을 검증하기 위해 다양한 종류의 예제 구조물에 대해 정적해석을 수행하였다. 해석은 2차원 정적해석을 수행하였고 층변위와 요소응력을 비교하였다. 개구부의 유형은 창문, 출입문의 형태를 선택하였고 개구부의 크기와 위치 및 개수를 다양하게 변화시켜 결과를 비교하였다. 그리고 저층, 고층 건물, 프레임이 연결된 경우 등 다양한 예제 구조물을 사용하여 제안된 해석기법을 검증하였다.

5.1 해석모델의 개요

제안된 해석방법의 정확성을 검증하기 위하여 그림 14와 같은 모델들을 사용하여 해석을 수행하였다. 각 모델의 특징은 표 1에 나타내었다. 본 논문에서는 세분 모델인 Model A를 정확해로 가정하고 각 모델별 해석 결과를 비교하였다.

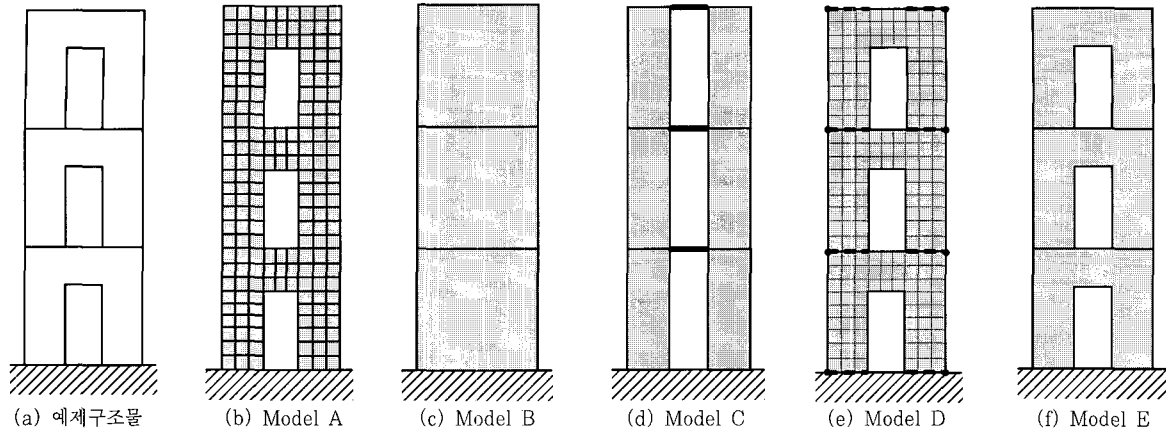


그림 14 예제 구조물의 모델유형

표 1 해석 모델의 특징

| Model | 특징 |
|---------|--------------------------------------|
| Model A | 세분 모델 |
| Model B | 개구부를 고려하지 않은 모델 |
| Model C | 개구부 상단부분을 연결보로 모형화한 모델 |
| Model D | 본 논문에서 제안한 모델 |
| Model E | 개구부가 있는 평면응력요소를 사용한 모델 ⁹⁾ |

5.2 창문이 있는 전단벽

첫 번째 예제구조물은 창문형 개구부가 있는 전단벽으로 개구부의 크기를 $a/b=0.1$, $a/b=0.3$, $a/b=0.5$ 로 변화시키며 해석을 수행하였다. 여기서 a 는 개구부의 폭과 높이를, b 는 전단벽의 폭과 높이를 나타낸다. 각각의 경우에 예제구조물의 횡변위를 그림 15(b), (c),

(d)에 나타내었다. $a/b=0.1$ 일 때의 횡변위는 모든 모델에 대하여 유사한 결과를 보이고 있다. $a/b=0.3$ 인 경우에는 Model C만 조금 큰 변위를 나타내고 나머지 모델은 거의 비슷한 횡변위를 나타내고 있다. 그러나 $a/b=0.5$ 인 경우에는 개구부의 영향이 커지게 되어 모델간의 해석결과에 큰 차이가 발생한다. 이때 개구부를 고려하지 않은 모델인 Model B의 변위가 가장 작고, 개구부 상단을 등가의 보로 치환한 Model C의 변위가 가장 크다. Model C의 경우에 개구부 상단부분과 등가의 강성을 가지는 연결보로 모형화가 되었지만 Model A보다 상당히 큰 횡변위를 나타내었다. 이것은 Model A에서는 연결보에 의해서 구속되는 전단벽 윗부분이 Model C에서는 추가적인 변형을 일으키기 때문이다. 개구부가 있는 평면응력요소를 사용하여 모형화한 Model E도 Model A 보다 작은 변위를 나타

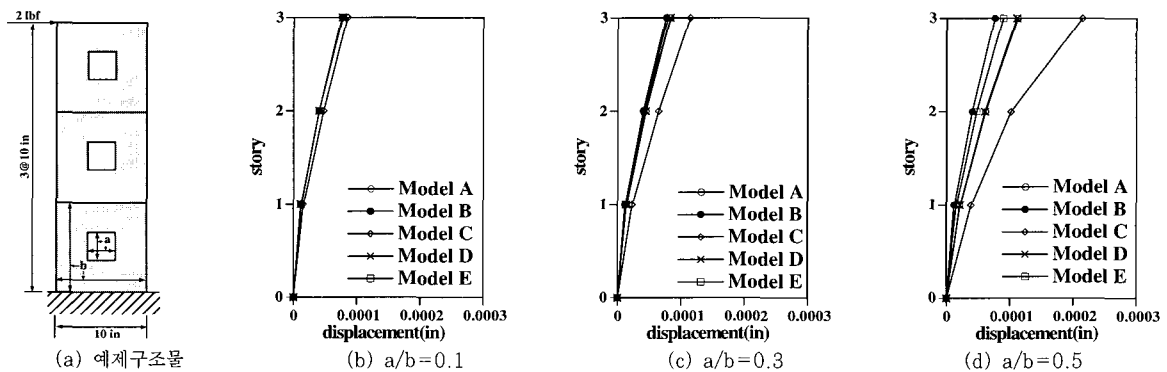


그림 15 창문이 있는 전단벽의 층변위 비교

내었다. 본 논문에서 제안한 슈퍼요소와 가상보를 사용한 모형인 Model D는 개구부의 크기와 관계없이 정확해와 거의 유사한 결과를 보이고 있다.

5.3 출입문이 있는 전단벽

출입문이 있는 전단벽 예제구조물에 대하여 그림 17과 같이 개구부의 폭은 일정하게 고정하고 높이를 변화시킨 경우와 그림 18과 같이 개구부의 높이를 일정하게 하고 폭을 변화시킨 경우로 나누어 해석하였다. Model E는 앞 절을 통하여 개구부의 크기가 커지면 정확성이 낮아진다는 것을 확인하였고, 발표된 논문에서 다양한 예제에 대한 해석이 이루어지지 않아서 비교가 불가능하므로 본 절의 예제부터는 제외하였다. 개구부의 높이를 변화시키면서 해석을 수행한 결과 중 횡변위를 그림 17(b), (c), (d)에 나타내었다. 그림을 보면 Model B는 개구부를 고려하지 않은 모델이므로 어

는 경우애나 같은 횡변위를 나타내는 것을 알 수 있고, 개구부가 커지면서 Model A와의 오차가 커지는 것을 확인할 수 있다. 등가의 연결보를 사용한 Model C는 개구부의 높이가 작은 경우에는 세분 모델보다 강성을 과소평가하여 변위가 크게 발생하는 것을 볼 수 있지만, 개구부의 크기가 커질수록 정확해와 유사한 결과를 보이고 있다. 이는 개구부의 높이가 커질수록 개구부 상단 부분의 춤이 작아져서 이 부분을 보로 생각하고 모형화하는 것이 어느 정도 합리적이기 때문이라고 생각된다. 본 논문에서 제안한 Model D는 개구부의 크기와 상관없이 정확해와 거의 일치하는 결과를 보여준다.

5.4 프레임과 연결된 개구부가 있는 전단벽

최근에 고층건물의 구조형식으로 전단벽 코어를 가진 프레임 형식이 많이 사용되고 있다. 따라서 본 절에서는 그림 18, 19와 같이 개구부가 있는 전단벽에 프

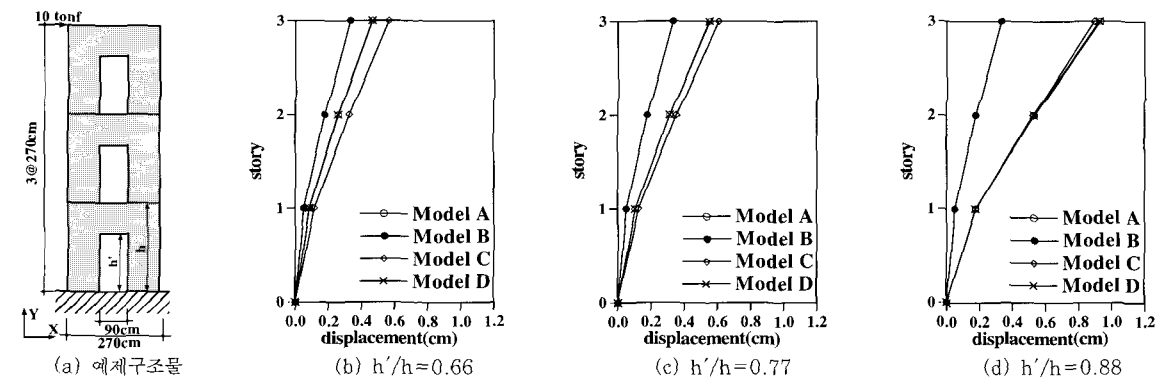


그림 17 출입문의 높이를 변화시킨 전단벽의 층변위 비교

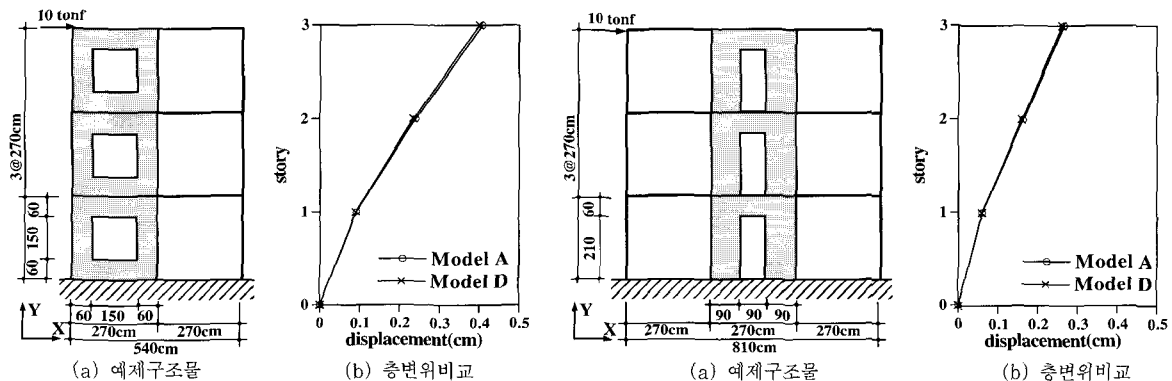


그림 18 프레임이 연결된 창문이 있는 전단벽

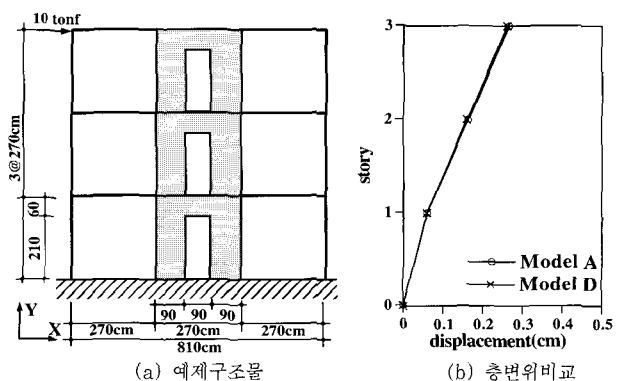


그림 19 프레임이 연결된 출입문이 있는 전단벽

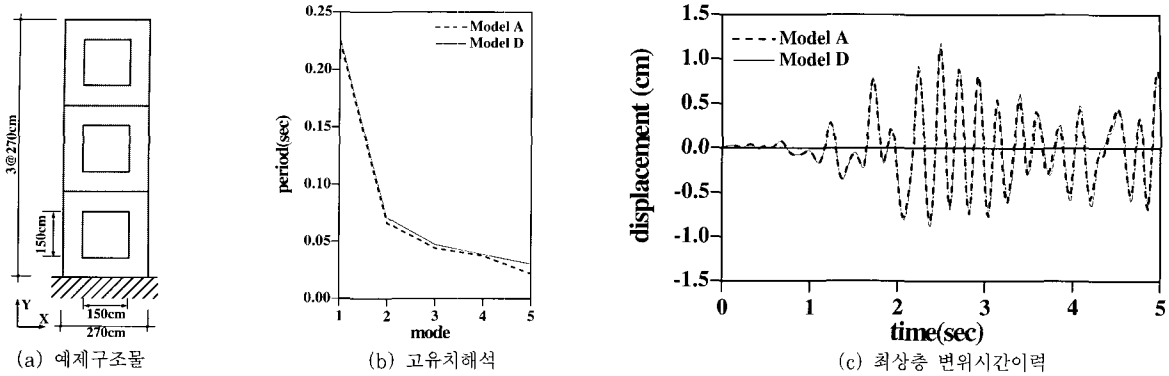


그림 20 창문이 있는 전단벽의 동적해석

레이미 연결된 예제구조물을 선택하여 해석을 수행하여 보았다. 창문이 있는 전단벽의 한 쪽에만 프레임이 연결된 예제구조물을 해석한 결과 중 횡변위를 그림 18(b)에 나타내었다. 그림을 보면, 본 논문에서 제안한 방법인 Model D와 세분모델인 Model A가 거의 일치하는 결과를 나타내는 것을 알 수 있다. 출입문이 있는 전단벽 양쪽에 프레임이 연결된 예제구조물을 그림 19에 나타내었다. 이 때에도 슈퍼요소와 가상보를 사용한 제안된 해석기법이 세분모델과 유사한 결과를 보이고 있는 것을 확인할 수 있다. 본 논문에서 전단벽을 모형화하기 위하여 사용하고 있는 Lee 요소가 면내회전자유도를 가지고 있으므로 Lee 요소를 사용하여 구성된 슈퍼요소 역시 면내회전자유도를 가지고 있게된다. 따라서 프레임과의 연결된 개구부가 있는 전단벽을 해석하는 데에도 본 논문에서 제안된 방법이 쉽게 적용될 수 있다.

6. 동적해석

본 논문에서 제안된 해석 방법이 구조물의 동적거동도 정확히 나타낼 수 있는 지를 검토하기 위하여 다양한 예제구조물을 대상으로 고유치해석 및 시간이력해석을 수행하였다. 시간이력해석에서는 El Centro(NS, 1940) 지진하중을 이용하였고 본 논문에서 제안된 방법의 효율성을 검증하기 위하여 해석시간 및 자유도 수를 세분모델과 비교하였다.

6.1 창문이 있는 전단벽의 동적해석

창문이 있는 전단벽 예제구조물은 그림 20(a)에서 보는 바와 같이 중앙에 150cm×150cm 크기의 개구

부를 갖는 벽식구조물이다. 그림 20(b)에 고유치 해석 결과를 나타내었다. 정확해라고 생각되는 Model A와 본 논문에서 제안한 슈퍼요소와 가상보를 사용한 Model D가 비슷한 결과를 나타내는 것을 볼 수 있다. 최상층 변위시간이력을 나타내는 그림 20(c)에서도 동일한 결과를 보이고 있다.

6.2 출입문이 있는 전단벽의 동적해석

출입문이 있는 벽식구조물은 그림 21(a)와 같다. 개구부의 크기는 90cm×240cm이다. 고유치해석 결과와 최상층 변위시간이력을 비교한 결과를 보면 창문이 있는 벽식구조물과 마찬가지로 Model A와 Model D 사이에 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

6.3 프레임이 연결된 전단벽의 동적해석

보다 다양한 예제 구조물에 대해 해석기법을 검증하기 위하여 그림 22(a)에서 보는 바와 같이 10층 전단벽 구조물 오른쪽에 프레임이 연결되어 있고, 창문과 출입문 형태의 개구부를 갖는 예제 구조물을 선택하였다. 구조형식은 앞의 예제보다 약간 복잡한 형태이지만, 해석결과 정확해라 생각되는 Model A와 Model D 사이에 고유치 및 변위시간이력에서 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 표 1에서는 Model A와 Model D의 자유도 수 및 해석시간을 비교하였다. 본 논문에서 제안한 방법으로 해석을 수행하는 시간은 세분모델에 비해 약 5% 정도 밖에 소요되지 않는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 건물이 커지고 복잡해져서 자유도 수가 증가하면 더욱 커지리라고 예상된다.

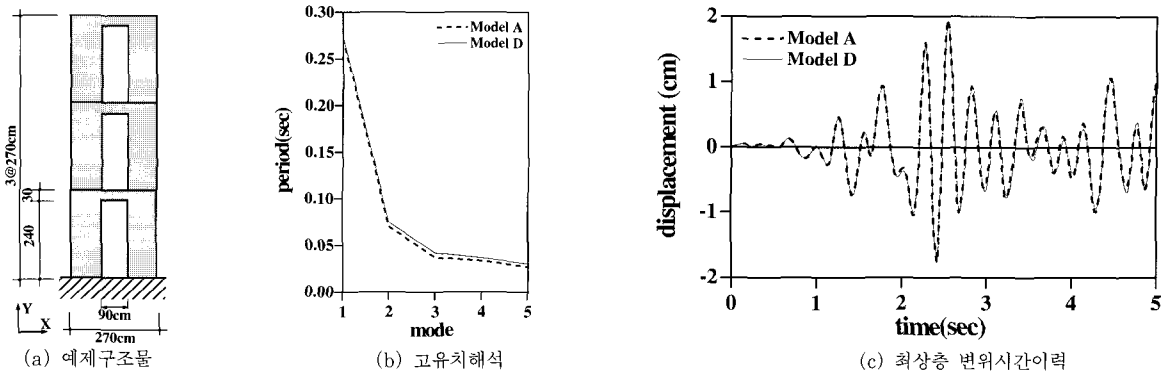


그림 21 출입문이 있는 전단벽의 동적해석

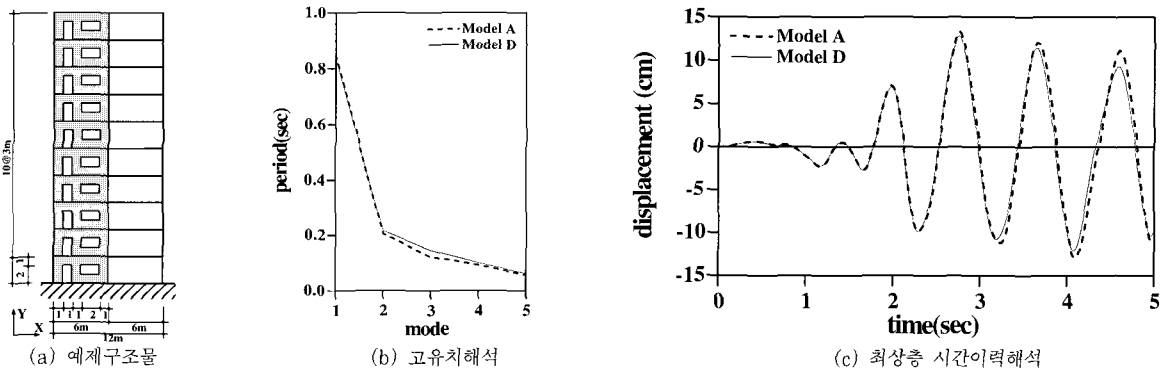


그림 22 프레임이 연결된 전단벽의 동적해석

표 2 자유도수 및 해석시간의 비교

| Model | 자유도수 | 해석시간(sec) | | | | |
|---------|------|------------|-------|--------|---------|-------|
| | | 강성·질량행렬 구성 | 평형방정식 | 고유치 해석 | 시간이력 해석 | 전체 |
| Model A | 4380 | 3.2 | 3.5 | 106.4 | 30.8 | 143.9 |
| Model D | 288 | 2.8 | 1.1 | 1.3 | 2.2 | 7.4 |

7. 결론 및 추후 연구과제

본 논문에서는 개구부가 있는 전단벽의 효율적인 해석을 위하여 슈퍼요소와 가상보를 사용한 해석기법을 제안하였고 다양한 예제구조물의 해석을 통하여 제안된 해석기법의 정확성과 효율성에 대하여 검토하였다. 본 논문을 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 개구부가 있는 평면응력요소를 사용하여 해석을 수행한 결과는 개구부의 크기가 전단벽에 비하여 작을 때에는 세분모델과 해석결과가 비슷하였으나 개

구부의 크기가 커지면 오차가 크게 발생하였다. 그리고 개구부 주위의 응력집중현상을 제대로 표현하지 못하는 문제점이 있었다.

- 2) 개구부 상단부분을 등가의 보로 치환하는 모형화 방법의 경우에는 개구부 상단부의 춤이 작은 경우에는 세분 모델과 비슷한 해석결과를 얻을 수 있었으나 개구부 상단부의 춤이 커지는 경우에는 구조물의 횡방향 강성을 과소평가하게 되어 세분모델보다 상당히 큰 횡변위를 나타내었다.
- 3) 본 논문에서 제안한 방법을 사용하면 개구부의 개수, 크기, 위치에 관계없이 세분모델과 정적 및 동적해

석결과가 매우 비슷하였다. 또한 개구부 주위 응력집중현상을 비교적 정확하게 표현할 수 있었고 소요되는 해석시간 및 컴퓨터 메모리를 대폭 줄일 수 있었다.

- 4) 본 논문은 2차원 구조물의 정적 및 동적해석에만 국한하여 제안된 방법의 정확성과 효율성을 검토하였다. 따라서 추후에 3차원 구조물의 적용성에 관한 연구가 수행되어야 한다고 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2001년도 두뇌한국21사업 핵심분야 사업비와 서울대학교 지진공학연구센터(KEERC)를 통한 한국과학재단 우수연구센터에 의하여 지원되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

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
9. Edward L. Wilson and Asharf Habibullah, *SAP2000-Intergrated Finite Element Analysis and Design of Structures*, Computers & Structures Inc., Berkeley, California, 1997
10. Klaus-Jurgen Bathe, *Finite Element Procedures*, Prentice-Hall Interantional Inc., 1996
11. Clough, R. W. and Penzien, J., *Dynamics of Structures*, Second Edintion, McGraw-Hill, 1993
12. Weaver, W., Jr., Gere, James M., *Matrix Analysis of Framed Structures*, Van Nostrand Reinhold, Third Edition, 1990
13. Weaver, W., Jr., Johnson, Paul R., *Structural Dynamics by Finite Elements*, Prentice Hall, 1987
14. Weaver, W., Jr., Johnsonston, *Finite Elements for Structural Analysis*, Prentice Hall, 1984
15. 김호수, 홍성목, "변환요소 및 부분구조법에 의한 병렬전단벽의 해석에 관한 연구," 대한건축학회 논문집, 제8권, 제4호, 1992, pp.97~108
16. 김호수, 홍성목, "골조 전단벽의 상호작용이 고려된 구조물의 효율적인 해석에 관한 연구," 대한건축학회 논문집, 제7권, 제3호, 1991, pp.319~331
17. 변지석, 유승균, 박복만, "유한요소법에 의한 개구부를 갖는 전단벽과 기둥의 접합부에 관한 연구," 대한건축학회 추계 학술발표대회 논문집, 제10권, 제2호, 1990, pp.439~442
18. 이동근, 강석봉, "전단벽을 가진 프레임의 구조해석에 관한 연구," 대한토목학회 논문집, 제6권, 제2호, 1986, pp.77~83

19. 최창근, "개구부를 갖는 평판요소에 의한 고층건물의 Core해석," 대한건축학회 논문집, 제1권, 제1호, 1985, pp.93~98
20. 이동근, 김현수, "바닥판의 휨강성을 고려한 전단벽식 건물의 효율적인 지진해석," 한국전산구조공학회 논문집, 제14권, 제12호, 2001, pp.193~202