

플랫플레이트 구조물의 효율적인 해석을 위한 슈퍼요소의 활용

Use of Super Elements for Efficient Analysis of Flat Plate Structures

김 현 수*

Kim, Hyun-Su

이 승 재**

Lee, Seung-Jae

이 동 근†

Lee, Dong-Guen

(논문접수일 : 2003년 8월 4일 ; 심사종료일 : 2003년 12월 13일)

요 지

근래에 들어서 경제적 및 계획적인 요구에 의하여 층고를 줄일 수 있는 이점을 가진 플랫플레이트 구조물이 많이 건설되고 있다. 구조기술자들은 실무에서 플랫플레이트 구조물을 해석하기 위하여 일반적으로 유효보폭모형을 사용한다. 그러나 유효보폭모형을 적용하기가 어려운 경우에는 유한요소법을 사용할 필요가 있으며, 이때 바닥판의 정확한 거동을 예측하기 위해서는 세분한 유한요소 모델을 사용하는 것이 필요하다. 전체 구조물을 수많은 유한요소로 세분하여 모형화하면 막대한 해석시간과 컴퓨터 메모리가 필요하게 된다. 따라서 본 연구에서는 상당히 정확한 해석결과를 쉽게 얻을 수 있는 효율적인 해석기법을 제안한다. 제안된 해석기법은 행렬응축기법을 통하여 생성된 슈퍼요소를 사용하며 슈퍼요소 경계부분의 변형적합조건을 만족시키기 위하여 슈퍼요소를 개발할 때 가상보를 도입한다. 본 연구에서는 슬래브의 탄성계수를 감소시킴으로써 유효보폭모형에서 사용되고 있는 강성저감을 고려하였다. 수많은 요소를 사용한 유한요소모델 및 유효보폭모형을 사용하여 여러 가지의 예제구조물에 대하여 정적해석과 동적해석을 수행하고 본 연구에서 제안된 해석방법에 의한 결과와 비교함으로써 제안된 방법의 효율성과 정확성을 검증하였다.

핵심용어 : 플랫플레이트 구조물, 슬래브의 강성, 강성저감, 행렬응축기법, 슈퍼요소, 가상보

Abstract

Flat plate system has been adopted in many buildings constructed recently because of the advantage of reduced floor heights to meet the economical and architectural demands. Structural engineers commonly use the effective beam width model(EBWM) in practical engineering for the analysis of flat plate structures. However, in many cases, when it is difficult to use the EBWM, it is necessary to use a refined finite element model for an accurate analysis. But it would take significant amount of computational time and memory if the entire building structure was subdivided with finer meshes. An efficient analytical method is proposed in this study to obtain accurate results in significantly reduced computational time. The proposed method employs super elements developed using the matrix condensation technique and fictitious beams are used in the development of super elements to enforce the compatibility at the interfaces of super elements. The stiffness degradation of flat plate system considered in the EBWM was taken into account by reducing the elastic modulus of floor slabs in this study. Static and dynamic analyses of example structures were performed and the efficiency and accuracy of the proposed method were verified by comparing the results with those of the refined finite element model and the EBWM.

Keywords : flat plate structure, stiffness of slab, stiffness degradation, matrix condensation, super element, fictitious stiff beam

1. 서 론

근래에 보가 없이 기둥이 슬래브를 직접 지지하는 구조

인 플랫플레이트 시스템이 많이 사용되고 있다. 이 구조는 보가 없으므로 건물의 층고를 낮출 수 있으며, 거푸집 및 철근공사가 간편하고, 채광 및 통풍성이 우수하며, 바닥판

† 책임저자, 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 교수
TEL: 031-290-7554; FAX: 031-290-7570
E-mail: dglee@skku.ac.kr,

* 정회원, 성균관대학교 건축공학과 BK21 박사 후 연구원

** 학생회원, 성균관대학교 건축공학과 석사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2004년 3월 31일까지 본 학회에 보내주 시면 2004년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

하부의 배관 및 배선이 쉽고, 거푸집 제작도 용이하여 공기를 단축시킬 수 있는 등의 장점을 가지고 있는 구조시스템이다. 반면에 슬래브의 변장비, 양방향 기둥간격비 등의 평면구성상의 제한이 있어 장스팬 구조가 불가능하고 대규모의 바닥판 개구부 설치가 어려운 단점이 있다. 특히 수평하중시에 강성저하가 현저하고 층간변형이 크게 되어 구조계획상 적절한 내력벽의 배치가 필요할 경우가 많다. 플랫플레이트 시스템은 중력하중에 저항하기 위하여 개발된 구조시스템으로 횡력에 대한 저항능력에 관해서는 최근에까지 여러 연구자들에 의하여 연구가 수행되고 있다.^{1)~3)}

현재 실무에서 구조기술자들이 이러한 플랫플레이트 구조물을 해석하기 위하여 일반적으로 유효보폭모델(Effective Beam Width Model)을 주로 사용하고 있다.^{4)~7)} 유효보폭모델은 플랫플레이트 구조시스템의 슬래브를 유효폭을 가진 보로 치환하여 모형화한 후에 탄성해석을 수행한다. 플랫플레이트에 횡방향 하중이 가하여 졌을 때 기둥 주위의 슬래브는 그림 2(a)와 같이 기둥의 휨과 함께 심하게 휘어진다. 그러나 기둥과 기둥 사이의 주간대 부분의 슬래브에서는 휨이 매우 작게 발생한다. 따라서 슬래브 중에서 일부분만이 휨에 저항한다고 생각하고 휨에 저항하는 슬래브의 폭을 유효폭으로 하여 그림 2(b)와 같이 모형화하는 것이 유효보폭모델의 기본 개념이다. 유효보폭모델에서는 그림 2(b)에 나타난 바와 같이 유효폭을 구하는 것이 가장 중요하며 슬래브의 두께를 보의 춤으로 하는 등가보를 사용하여 모형화한다.

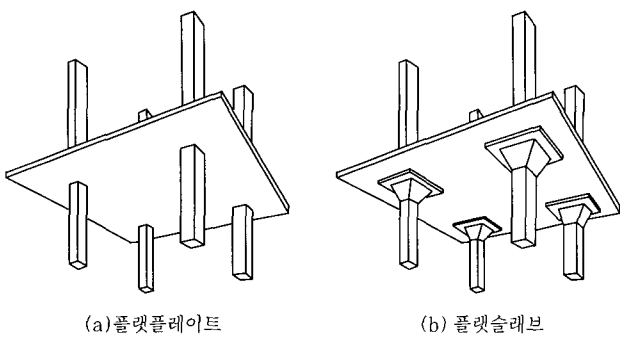


그림 1 플랫슬래브 시스템의 분류

그러나 유효보폭모델은 불규칙적인 평면을 가진 구조물에는 적용하기 어려울 뿐만 아니라 슬래브에서 발생하는 응력을 제대로 알아낼 수 없는 등의 제한점을 가지고 있다. 그러므로 중력하중에 대하여 플랫플레이트를 해석할 경우에, 전형적인 정방형의 슬래브인 경우에는 일반적으로 유효보폭모델이나 직접설계법을 사용하고, 평면의 형태가 불규칙적인 경우에는 SAFE나 MIDAS/SDS와 같은 상용프로그램을 사용하여 유한요소로 슬래브를 세분하여 해석한다. 그러나 횡하중에 대한 해석을 수행하고자 할 때는 현재 유효보폭모델 이외에는 별다른 대안이 없는 상황이다.

유효보폭모델을 사용할 때에는 슬래브의 유효폭을 구하는 것이 가장 중요하며 여러 연구자들에 의하여 유효폭에 대한 연구가 수행되어 왔다.^{4)~7)} 그 중에 Grossman은 U.C. Berkeley에서 수행한 실험¹⁾에 근거한 저감계수를 사용하여 구조물의 층간변위에 따른 슬래브의 강성저감 효과를 비교적 정확하게 예측할 수 있도록 기존의 유효폭 산정식을 수정하였다.⁴⁾ 본 연구에서는 현재 실무에서 흔히 사용되고 있는 유효보폭모델의 한계점에 대하여 살펴보고 그것을 개선할 수 있는 해석기법을 제안하였다. 본 연구에서는 복잡한 평면이나 개구부가 있는 슬래브도 해석할 수 있도록 하기 위하여 많은 수의 유한요소를 사용하여 슬래브를 모형화하였다. 건물 전체의 슬래브를 다수의 유한요소로 세분하면 해석의 정확성은 높아지지만 실무에서 사용하기 어려울 정도로 막대한 해석시간과 컴퓨터 메모리가 소요된다. 따라서 본 연구에서는 수퍼요소와 가상보^{8)~10)}를 사용하여 해석시간을 대폭 줄이면서도 상당히 정확한 해석결과를 나타낼 수 있는 해석기법을 제안하였다. Grossman의 연구⁴⁾에서는 일반적인 유한요소법이 횡하중의 증가에 따라서 발생하는 슬래브의 강성저감을 고려하지 못한다고 하였다. 그러나 본 연구에서는 Grossman이 제안한 강성저감계수를 바탕으로 하여 층간변위에 따라서 슬래브의 탄성계수를 변화시키는 방법으로 강성저감효과를 고려할 수 있는 방법을 제시하였다. 플랫플레이트 구조물이 횡방향 하중을 받을 경우에는 슬래브 뿐만 아니라 기둥에서도 균열로 인하여 강성저감이 일어나게 된다. 그러나 본 연구는 Grossman이 제안한 슬래브의 강성저감을 고려한 유효보폭모델의 효과적인 대안을 제시하기 위한 것으로

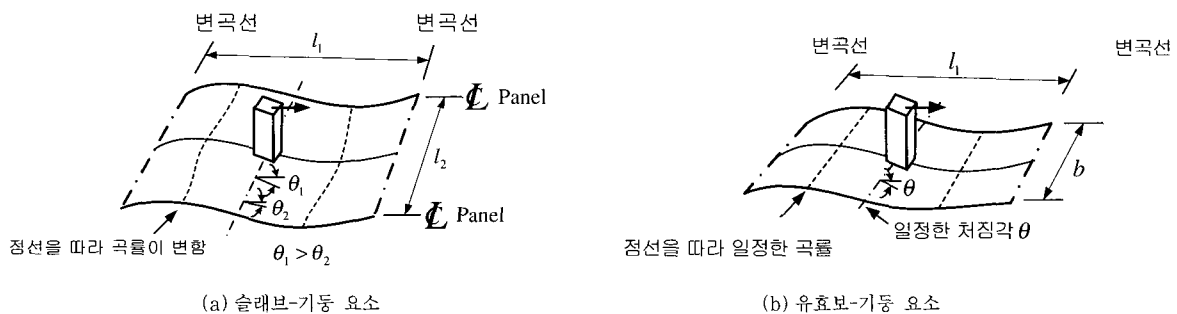


그림 2 유효보폭모델의 개념

Grossman의 연구결과와 비교하기 위해서 기둥의 강성저감은 고려하지 않았다. 마지막으로 다양한 평면형태를 가진 플랫폼레이트 예제구조물의 해석을 통하여 본 연구에서 제안된 해석방법의 효율성과 정확성을 검증하였다.

2. 유효보폭모형을 사용한 플랫폼레이트의 모형화

Grossman의 산정식은 건물의 기둥이 장방형의 규칙적인 배치를 가지는 것으로 가정하여 유도되었으므로 이 식을 적용할 수 있는 건물이 상당히 제한적이다. 본 장에서는 Grossman의 산정식의 내용과 문제점에 대하여 살펴본다.

2.1 Grossman의 유효폭 산정식

플랫폼레이트의 횡저항 능력에 대하여 이전 연구자들에 의하여 다양한 연구가 수행되었다. Grossman은 그의 연구⁵⁾에서 이전 연구자들의 연구내용을 정리하여 플랫폼레이트가 주두부분 보강과 적절한 배근 상세로 중력방향 하중뿐만 아니라 횡방향 하중에 대해서도 모멘트 분산능력이 크다고 결론을 내렸다. 또한 그는 기존에 사용되고 있는 유효보폭모형의 다양한 유효폭 산정식을 정리하고 수정 및 보완하여 식(1)과 같은 새로운 유효폭 계산식을 제안하였다.

$$a_2 = K_d [0.3l_1 + C_1(l_2/l_1) + (C_2 - C_1)/2] (d/0.9h)(K_{FP}) \quad (1)$$

$$\text{단, } (0.2)(K_d)(K_{FP})l_2 \leq a_2 \leq (0.5)(K_d)(K_{FP})l_2$$

여기서, a : 유효폭 계수

a_2 : 유효폭

K_d : 강성저감계수

l_1 : 모멘트가 산정되는 방향으로 측정한 기둥 중심간의 거리

l_2 : 모멘트가 산정되는 스패와 직각이 되는 방향의 기둥 중심간의 거리

C_1 : 모멘트가 산정되는 방향의 지주의 폭

C_2 : 모멘트가 산정되는 스패와 직각이 되는 방향의 지주의 폭

d : 슬래브의 유효길이

h : 슬래브의 두께

K_{FP} : 기둥의 위치 계수(내부기둥 : 1.0, 외부기둥 : 0.8, 모서리 기둥 : 0.6)

외부 기둥일 경우에는 식(1)에 의해서 산정된 유효폭에 $[l_3 + (l_2/2)]/l_2$ 를 곱하여 수정한 값을 사용하며 여기서 l_3 는 외곽기둥의 중심선과 슬래브 가장자리 사이의 거리이

다. 식(1)에서 K_d 는 강성저감계수로서 층간변위의 변화에 따라서 아래의 값들이 사용된다.

표 1 층간변위에 따른 강성저감계수

(h_s :층고)

층간변위	K_d
$h_s/800$	1.1
$h_s/400$	1.0
$h_s/200$	0.8
$h_s/100$	0.5

Grossman의 유효폭 산정식을 살펴보면 유한요소해석법에서 쉽게 고려할 수 있는 항과 그렇지 못한 항으로 나누어 생각할 수 있다. 대괄호로 묶여있는 부분 $[0.3l_1 + C_1(l_2/l_1) + (C_2 - C_1)/2]$ 과 기둥의 위치계수(K_{FP})는 기둥 단면의 치수, 슬래브의 길이, 기둥의 위치 등이 유효폭에 미치는 영향을 계산하기 위한 것으로 유한요소모형을 사용하면 자동적으로 고려될 수 있다. 그러나 층간변위에 따른 슬래브의 강성저감 효과와 철근의 배근위치에 따른 슬래브의 유효폭은 유한요소법에서 자동적으로 고려할 수 없다. 슬래브의 유효길이를 고려하는 항($d/0.9h$)은 일반적인 경우에는 1.0으로 생각하여도 큰 무리는 없다. 다만 슬래브의 두께가 매우 얇은 박판 슬래브일 경우에는 $d/h < 0.9$ 이므로 이 항을 고려하여 슬래브의 강성을 저감시킬 필요가 있다.

2.2 유효보폭모형의 문제점

현재 실무에서 플랫폼레이트 구조물을 해석하기 위해 주로 사용하고 있는 유효보폭모형은 슬래브를 유효폭을 가지는 보로 모형화하는 가정상의 문제점 때문에 적용성 및 정확성에 상당한 한계점을 가지고 있다. 그림 3(a)와 같이 직사각형의 평면을 가지는 구조물에 대해서는 유효보폭모형을 적용하는데 특별한 문제가 없다. 그러나 그림 3(b), 3(c), 3(d), 3(e)에서 볼 수 있는 형태의 평면을 가진 플랫폼레이트 구조물에 대해서는 유효보폭모형을 적용하기가 어렵다. 그림 3(b)의 경우에 가운데 있는 기둥은 주위의 세 개의 사분면에는 슬래브가 존재하지만, 하나의 사분면에는 슬래브가 없다. Grossman의 산정식에서는 이러한 경우의 기둥에 대한 위치계수(K_{FP})를 사용하지 않고 있다. 그리고 유효보폭모형은 그림 3(c)에서 보는 바와 같이 슬래브에 개구부가 존재하는 평면에 대해서는 적용하기가 어려우나, 플랫폼레이트 시스템을 적용하는 건물에는 에스컬레이터의 설치나 설비 등의 이유로 다양한 개구부가 존재하게 되므로 유효보폭모형의 적용에는 상당한 제한이 따르게 된다. 그림 3(d) 및 3(e)와 같은 평면을 가진 건물에

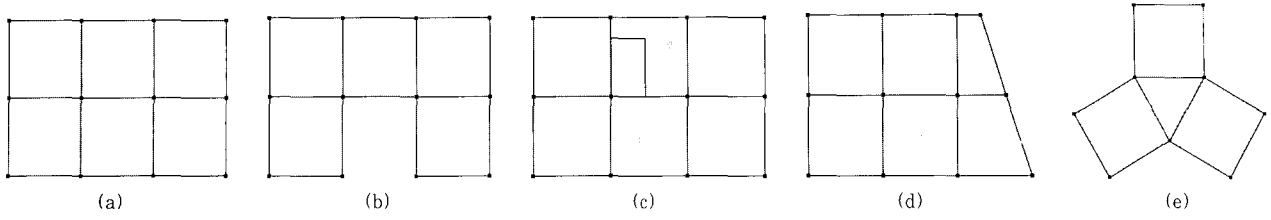


그림 3 플랫플레이트 구조물의 여러 가지 평면형태

대해서도 l_1, l_2 의 값이나 기둥의 위치계수를 명확히 규정하기가 어려우므로 유효보폭모델을 적용하기 어렵다.

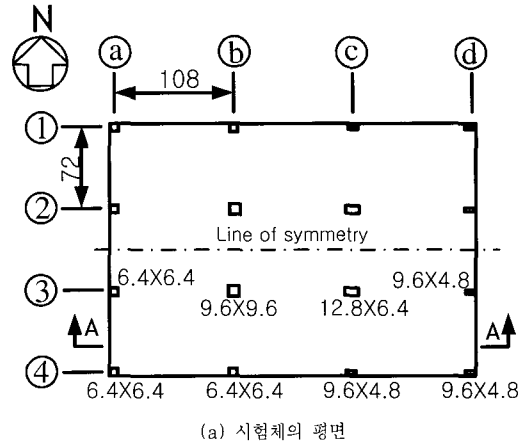
뿐만 아니라 유효보폭모델을 사용하게 되면 슬래브의 설계시에 가장 중요한 해석 결과인 슬래브에서 발생하는 응력의 분포를 제대로 파악할 수 없기 때문에 등가보에서 발생하는 모멘트를 이용하여 슬래브에 배근하게 된다. 그리고 등가보의 폭이 실제 슬래브의 치수와는 상당한 차이가 있으므로 동적해석을 수행할 경우에 질량을 산정하기 위하여 부재의 단면적과 재료의 단위질량을 이용하여 자동계산하면 오류를 범하게 된다. 따라서 유효보폭모델을 이용하여 동적해석을 수행할 때에는 적합한 등가질량을 산정하여야 한다. 유효보폭모델이 이러한 여러 가지의 문제점을 가지고 있음에도 불구하고 플랫플레이트 구조물의 해석을 위한 별다른 대안이 없기 때문에 현재 실무에서 이를 주로 사용하고 있다.

3. 유효요소를 사용한 플랫플레이트 구조물의 해석

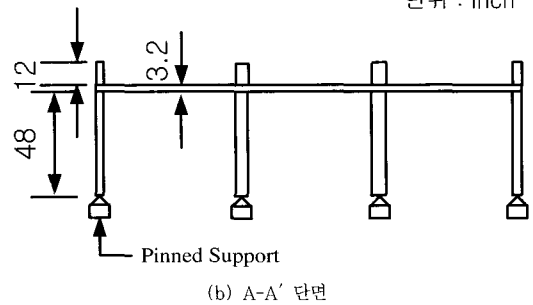
플랫플레이트 구조물을 유효요소법으로 해석할 경우에는 유효보폭모델과는 달리 다양한 형태의 평면을 가진 구조물도 쉽게 모형화할 수 있다. 이러한 장점에도 불구하고 Grossman은 그의 연구에서 일반적인 유효요소법을 사용하면 슬래브의 강성저감효과를 고려하기가 어렵다고 하였다. 그러나 본 연구에서는 Grossman이 제안한 강성저감계수를 바탕으로 유효요소해석에서 슬래브의 강성저감효과를 고려하여 해석하고 그 결과를 Grossman의 유효보폭모델에 의한 결과와 비교하여 보았다.

3.1 횡변위에 따른 슬래브의 강성저감효과

일반적으로 플랫플레이트 구조물은 수평하중이 재하될 경우에 슬래브의 강성저하가 현저하다. 따라서 Grossman은 그의 연구에서 1990년에 U.C. Berkeley의 Moehle 교수가 수행한 실험 결과¹⁾에 근거하여 층간변위에 따라서 등가보의 유효폭을 줄일 수 있는 강성저감계수(K_d)를 제안하였다. U.C. Berkeley에서 실험한 시험체는 그림 4에 나타낸 것과 같이 다양한 크기의 기둥을 가지는 단층의 플랫플레이트 구조물이다. Grossman은 층간변위가 증가함에 따라서 슬래브의 강성저하가 커지는 효과를 유효폭 산



(a) 시험체의 평면

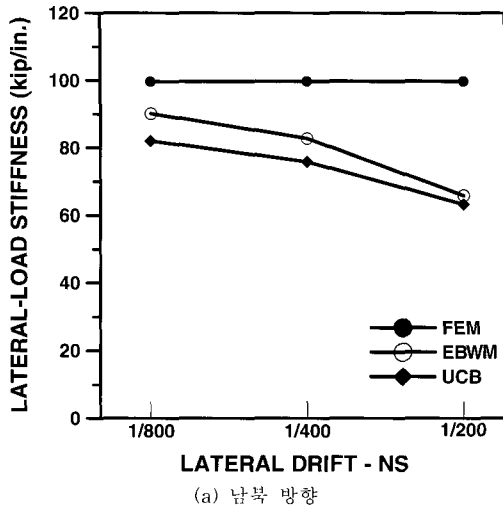


(b) A-A' 단면

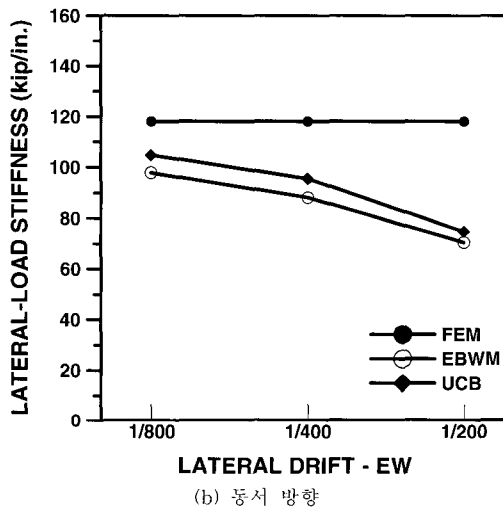
그림 4 플랫플레이트 시험체(U.C. Berkeley, 1990)

정식에 포함하기 위하여 표 1에서 제시한 바와 같이 층간 변위에 따른 강성저감계수를 제안하였다. 그의 연구에서 층간변위가 $h_s/400$ 인 경우에 구조물의 강성이 대략 50%정도 줄어든다고 가정하고, 그때의 강성저감계수(K_d)를 1.0으로 제안하였다. 따라서 층간변위가 $h_s/400$ 보다 큰 경우에는 강성저감계수가 1.0보다 작고 $h_s/400$ 보다 작은 경우에는 1.0보다 큰 값을 가진다.

그림 5는 그림 4에 나타낸 시험체에 대하여 동서 및 남북 방향으로 하중을 가하였을 때 층간 변위에 따른 구조물의 횡방향 강성 변화를 나타낸 것이다. 유효요소해석(FEM) 결과는 층간변위에 관계없이 구조물의 강성이 일정하고 실험결과(UCB)는 층간변위가 커질수록 구조물의 횡방향 강성이 작아지는 것을 알 수 있다. Grossman이 제안한 방법(EBWM)으로 해석한 결과를 보면 층간변위가 커짐에 따라서 더 작은 강성저감계수를 사용하여 슬래브의 유효폭



(a) 남북 방향



(b) 동서 방향

그림 5 층간 변형에 따른 플랫플레이트 구조물의 횡방향 강성 변화

을 줄이기 때문에 실험결과와 비슷하게 층간 변위가 커짐에 따라서 구조물의 횡방향 강성이 작아지는 것을 알 수 있다. 남북방향에서는 EBWM의 강성이 UCB보다 크지만 동서방향에서는 UCB가 EBWM보다 큰 이유는 시험체는 각 방향별 기둥의 배치나 철근의 배근 등이 다르기 때문에 강성이 저감되는 경향이 서로 다르지만 EBWM는 방향에 관계없이 표 1에서 나타난 강성저감계수를 사용하기 때문이다.

Grossman이 제안한 층간변위에 따른 강성저감계수를 사용하여 유한요소 모델의 횡방향 강성을 조정한다면 유한요소법에서도 플랫플레이트의 강성저감을 같은 정도로 고려할 수 있을 것이다. 유효보폭모델의 횡방향 강성을 유한요소모델의 횡방향 강성으로 나누어서 강성저감계수를 구하면 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{K_{EBW}}{K_{FEM}} \quad (2)$$

여기서, R : 구조물의 강성저감계수

K_{EBW} : 유효보폭모델의 강성

K_{FEM} : 유한요소모델의 강성

이 계수를 이용하여 유한요소모델의 강성을 저감시킨다면 그림 5에서 FEM 그래프가 EBWM 그래프와 거의 겹쳐지는 결과를 얻을 수 있을 것이다.

3.2 슬래브의 강성저감효과를 고려한 유한요소해석

그림 6에서 보는 바와 같이 탄성거동을 하는 플랫플레이트 구조물의 수평변위(Δ)는 기둥의 변형에 의한 변위(Δ_c)와 슬래브의 변형에 의한 변위(Δ_s)로 나누어 질 수 있으며 이를 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta = \Delta_c + \Delta_s \quad (3)$$

여기서, Δ : 구조물 전체 변형에 의한 변위

Δ_c : 기둥의 변형에 의한 변위

Δ_s : 슬래브의 변형에 의한 변위

구조물 강성저감계수(R)를 적용하면 구조물의 변위는 Δ/R 이 되며, 슬래브의 강성저감을 고려하면 슬래브의 변형만에 의한 구조물의 변위는 Δ_s/R_s 가 되므로 기둥의 강성저감을 무시한다면 식(4)와 같은 관계를 얻을 수 있다.

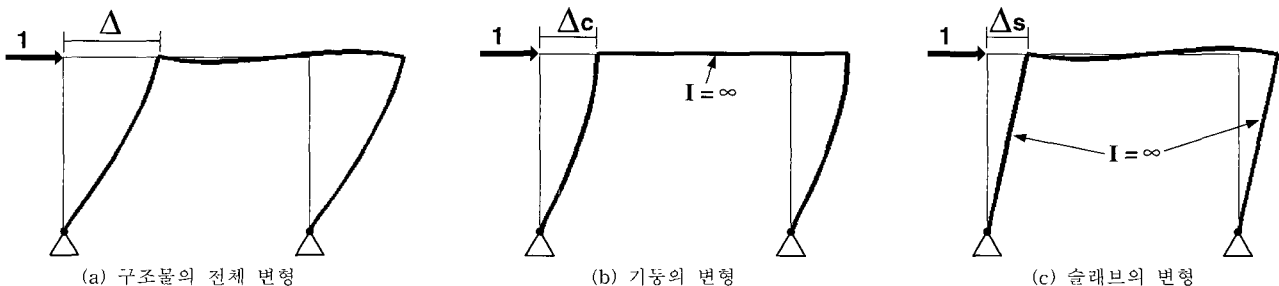


그림 6 간단한 플랫플레이트 구조물의 횡변형 성분

$$\frac{\Delta}{R} = \Delta c + \frac{\Delta s}{R_s} \quad (4)$$

여기서, R : 구조물의 강성저감계수

R_s : 슬래브의 강성저감계수

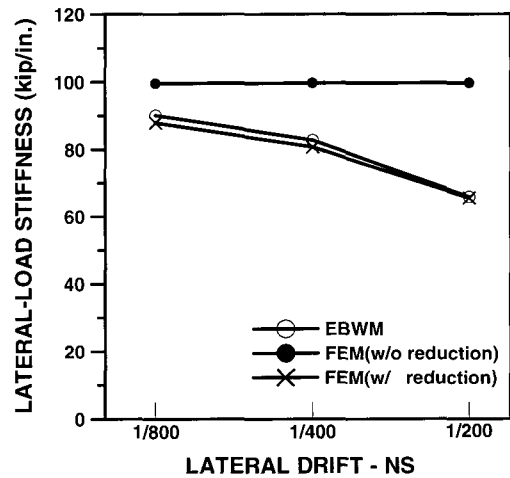
Grossman은 슬래브의 강성저감은 고려하였으나 기둥의 강성저감은 무시하였다. 여기서는 플랫플레이트 구조물에 대하여 유한요소법을 사용하는 경우에 슬래브의 강성을 적절히 저감시킬 수 있는 방법을 제시하는 것이 목적이므로 Grossman의 연구결과와 비교하기 위하여 기둥의 강성저감은 무시하였다. 식(4)를 다시 정리하면 슬래브의 강성저감계수(R_s)를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_s = \frac{\Delta s}{\frac{\Delta}{R} - \Delta c} \quad (5)$$

각 방향별 층간변위에 대하여 구조물 전체의 강성저감계수(R)와 슬래브와 기둥의 변형에 의해서 발생하는 변위를 구분하여 식(5)로 계산한 슬래브의 강성저감계수(R_s)를 표 2에 나타내었다. 이렇게 계산한 슬래브의 강성저감계수를 이용하여 유한요소법에서 슬래브의 탄성계수를 조정하면 층간변위에 따른 슬래브의 강성저감효과를 고려할 수

있다. 표 2에서 보면 남북방향의 강성저감계수와 동서방향의 강성저감계수가 조금씩 다른 것을 알 수 있는데, 이것은 각 방향별로 철근의 배근이나 기둥의 위치, 기둥 단면 등이 다르기 때문이다. 그러나 편의상 유한요소법에서 각 방향으로 동일한 강성저감계수를 사용하기 위하여 각 층간변위별로 두 방향의 슬래브 강성저감계수의 평균을 구하고, 이를 이용하여 층간변위와 강성저감의 관계를 나타내면 그림 7과 같다.

세 가지 층간변위에 대한 표 2의 강성저감계수를 사용하



(a) 남북 방향

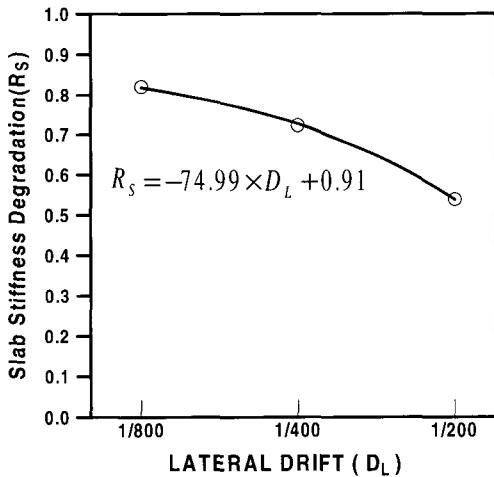
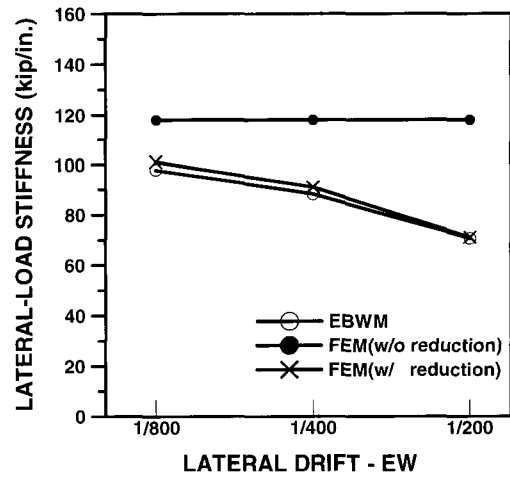


그림 7 층간변위에 따른 슬래브의 강성저감계수



(b) 동서 방향

그림 8 슬래브의 강성저감효과를 고려한 유한요소해석 결과

표 2 강성저감계수

층간변위	방향	R	Δ	Δc	Δs	R_s	R_s 평균
1/800	NS	0.9047	0.0546	0.0333	0.0213	0.8527	0.8210
	EW	0.8290	0.0642	0.0496	0.0146	0.7892	
1/400	NS	0.8298	0.1104	0.0673	0.0431	0.7482	0.7218
	EW	0.7471	0.1296	0.1001	0.0295	0.6953	
1/200	NS	0.6607	0.2304	0.1404	0.0900	0.5427	0.5386
	EW	0.5979	0.2544	0.1965	0.0579	0.5345	

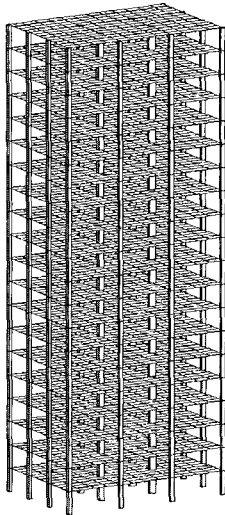
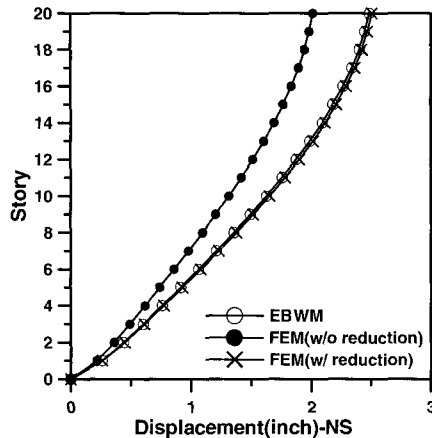
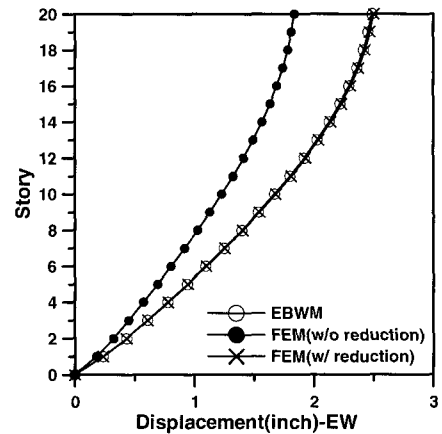


그림 9 예제구조물 투상도



(a) 남북 방향



(b) 동서 방향

그림 10 정적 횡변위

여 유한요소 모델의 슬래브 강성을 저감시켜서 해석한 결과와 유효보폭모델에 의한 결과를 그림 8에 나타내었다. 그림 8을 보면 강성저감계수를 이용하여 유한요소 모델의 슬래브 강성을 저감시키면 Grossman의 유효보폭모델에서와 같이 슬래브의 강성저감효과를 고려할 수 있음을 알 수 있다.

고층건물에서도 유한요소법으로 슬래브의 강성저감효과를 적절히 고려할 수 있는지 검토해보기 위하여 앞에서 소개한 그림 4의 평면을 가지는 20층 예제구조물의 정적해석을 수행하여 보았다. 실제 구조물에서는 아래층으로 갈수록 기둥의 크기가 커지지만 그것을 고려하면 유효보폭모델에서는 기둥의 크기에 따라서 유효폭이 달라지므로 기둥의 크기가 달라지는 층마다 유효폭을 다시 계산해야하는 번거로움이 있다. 이 예제는 고층건물에도 앞에서 유도한 강성저감식을 사용할 수 있는지에 대한 검토를 위한 것이므로 그림 9에서 보는 바와 같이 계산의 편의상 모든 층의 기둥 크기를 동일한 것으로 가정하였다.

예제구조물에는 최상층에 건물 높이의 1/400의 변위가 발생하도록 역삼각형의 하중을 가하였다. 그림 10에서 보는 바와 같이 강성저감을 시키기 전에는 유한요소해석에 의한 횡변위가 유효보폭모델보다 작게 발생하였으나, 슬래브의 강성을 저감시킨 후에는 고층건물에서도 유효보폭모델의 결과와 거의 비슷한 것을 알 수 있다.

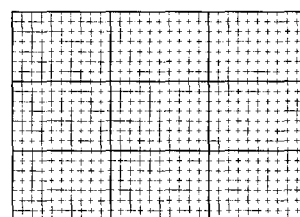
4. 수퍼요소를 사용한 플랫플레이트의 모형화

플랫플레이트 구조물에 대하여 횡변위에 따른 강성저감효과를 고려하여 유한요소법으로 해석하면 정확하게 구조물의 거동을 예측할 수 있다. 그러나 플랫플레이트 구조물을 정확하게 해석하기 위하여 슬래브를 다수의 유한요소로 세분하여 모형화한다면 막대한 해석시간과 기억용량이 필

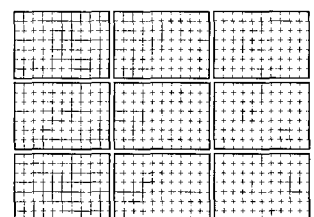
요할 것이다. 따라서 본 연구에서는 해석시간과 기억용량을 절약하고 해석의 정확성도 확보할 수 있는 수퍼요소를 이용한 새로운 모형화 기법을 제안한다.

4.1 플랫플레이트의 모형화를 위한 수퍼요소 이용

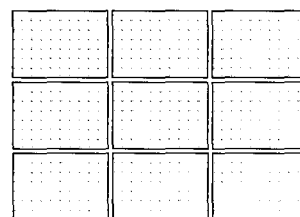
일반적으로 플랫플레이트 구조물에는 기둥이 규칙적으로 배열이 된다. 따라서 기둥에 의하여 구획되는 동일한 크기의 장방형 슬래브가 반복적으로 사용되는 특징을 가지고 있으므로 수퍼요소를 적용하기가 용이하다. 그림 4에서 나타난 예제구조물을 수퍼요소를 사용해서 모형화하는 방법을 그림 11에 나타내었다. 그림 11(a)는 정확한 해석을 위하여 플랫플레이트를 여러 개의 유한요소로 세분한 모델이다. 이렇게 세분한 모델을 동일한 구조형태의 장방향 슬



(a) 플랫플레이트 세분모델



(b) 수퍼요소 생성을 위한 분리



(c) 수퍼요소 생성



(d) 수퍼요소 조합

그림 11 수퍼요소를 이용한 플랫플레이트의 모형화 과정

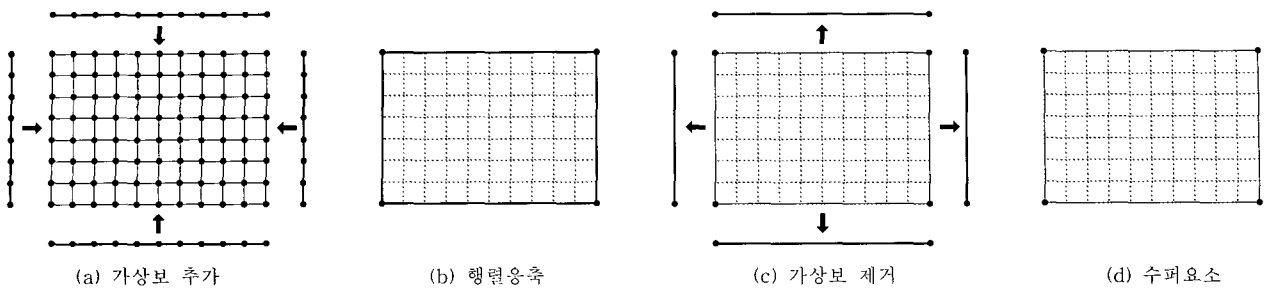


그림 12 가상보를 사용한 수퍼요소의 개발과정

래브로 분리하면 그림 11(b)와 같다. 분리된 모델의 모서리 절점만 남기고 나머지 절점은 행렬응축기법¹²⁾을 통하여 소거함으로써 그림 11(c)와 같은 수퍼요소를 생성할 수 있다. 생성된 수퍼요소는 그림 11(d)와 같이 모서리의 절점만을 공유함으로써 한 층의 슬래브로 조합될 수 있다. 매 층의 구조형태가 동일하다면, 생성된 수퍼요소의 조합을 반복적으로 사용할 수 있으므로 매우 효율적으로 플랫플레이트 구조물을 모형화할 수 있다.

4.2 가상보를 사용한 수퍼요소의 개발

해석의 효율성을 높이기 위하여 행렬응축을 통하여 모서리에만 절점을 가진 수퍼요소의 자유도 수는 하나의 큰 셀요소를 사용하는 경우와 같다. 그러나 수퍼요소간에 모서리 절점만을 공유하는 경우에는 수퍼요소간의 경계부분에서 변형적합조건을 만족시키지 못하는 문제점이 있다. 따라서 이러한 모형화방법은 경계상의 모든 절점을 공유하는 경우보다 건물의 횡방향 강성을 과소평가 하게된다. 그러므로 해석의 정확성을 높이기 위해서 수퍼요소간의 경계부분에서 변형적합조건을 만족시켜야 한다. 변형적합조건을 만족시키기 위해서는 수퍼요소 경계상의 모든 절점을 공유해야 하는데, 그렇게 되면 자유도의 수가 증가하게 되어 수퍼요소 사용의 효율성이 떨어지게 된다. 따라서 본 연구에서는 수퍼요소 경계부분의 변형적합조건을 만족시키기 위하여 가상보^{8)~10)}를 사용하였다. 플랫플레이트 구조물을 수퍼요소로 모형화하는 과정에서 가상보를 사용하는 방법을 그림 12에 나타내었다. 그림 12(a)와 같이 슬래브 유한요소세분모델의 경계부분에 가상보를 추가하고 그림 12(b)와 같이 행렬응축을 하여 슬래브 모서리 절점의 자유도만 남기고 나머지 자유도는 모두 소거한다. 가상보에 의하여 추가된 강성을 제거하기 위하여 그림 12(c)와 같이 내부 절점이 없는 가상보의 강성을 빼주었다. 가상보의 휨강성은 수치오류가 일어나지 않을 정도로 크게 해주면 유한요소 세분모델의 해석결과와 거의 비슷한 결과를 나타낸다.⁹⁾

그림 12(b)의 행렬응축과정을 통하여 만들어진 수퍼요소의 네 변은 추가된 가상보로 인하여 3차곡선의 변형형상

을 가지게 된다. 이러한 효과는 그림 12(c)에서 가상보를 제거하더라도 수퍼요소에 계속 남아있게 된다. 이러한 방법을 사용하여 최종적으로 그림 12(d)의 수퍼요소를 생성할 수 있다. 이러한 방법으로 생성된 수퍼요소를 사용하면 수퍼요소의 모서리 절점만 공유한다고 하더라도 수퍼요소 사이의 변형적합조건을 상당히 만족시킬 수 있다.^{13)~14)}

5. 예제해석

제안된 해석기법의 효율성과 정확성을 검증하기 위하여 다양한 평면의 플랫플레이트 구조물에 대하여 정적해석, 고유치해석 및 시간이력 해석을 수행하였다. 모든 해석모델에 대하여 슬래브의 강성저감 효과를 고려하였으며 유한요소모형과 유한요소세분모델 그리고 본 연구에서 제안된 수퍼요소를 사용하는 해석기법의 결과를 비교하여 보았다.

5.1 정형의 플랫플레이트 구조물

그림 13과 같이 장방형의 평면을 가진 20층의 전형적인 플랫플레이트 구조물에 대하여 유한요소모형 및 유한요소모형으로 해석을 수행하였다. 유한요소모형에서 유한요소는 Grossman이 제안한 방법으로 구하여 해석하였으므로 층간변위에 따른 슬래브의 강성저감이 자동적으로 고려된다. 유한요소세분모델을 사용한 해석과 본 연구에서 제안한 해석 방법에는 앞에서 구한 강성저감식을 이용하여 슬래브의 강성을 저감시켜서 해석하였다. 건물 최상층의 층간변위가 1/400이 발생하도록 역삼각형의 정적하중을 Y축 방향으로 가하여 해석을 수행하였다. 이 때 발생하는 정적 횡변위를 그림 14에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 유한요소모형과 강성저감을 고려한 유한요소세분모델 그리고 본 연구에서 제안된 해석방법의 결과가 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 그림 15에 나타낸 구조물의 고유진동주기 역시 각 모델별로 별다른 차이가 없는 것을 알 수 있다. 이 때 유한요소모형의 슬래브 질량은 슬래브를 4등분하여 등가의 질량을 계산한 후 기둥과 슬래브가 만나는 절점에 집중질량으로 고려하였다. 정적횡변위와 고유진동주기는 유한요소모형과 유한요소모형의 결과의 차이가 크지 않았다.

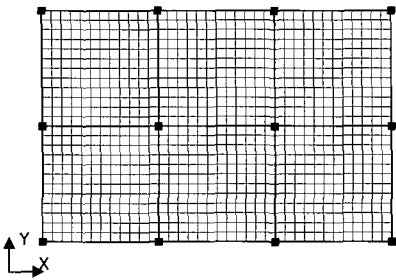


그림 13 예제구조물 평면

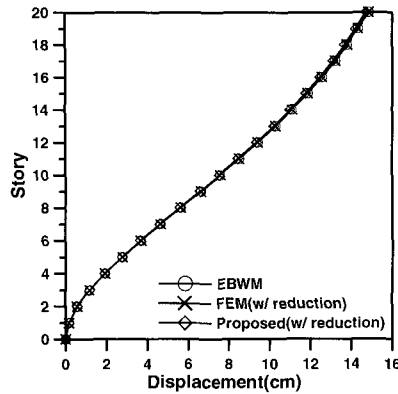


그림 14 정적하중변위

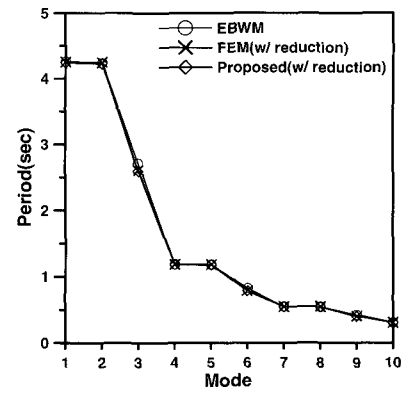
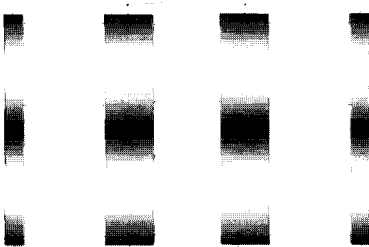
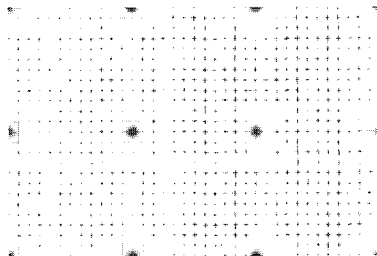


그림 15 고유진동주기



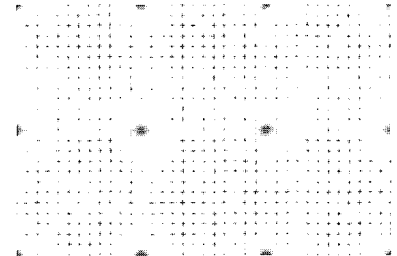
$$\sigma_{\max} = 2.09 \times 10^{-2} \text{ tonf / cm}^2$$

(a) 유효보폭모델



$$\sigma_{\max} = 4.53 \times 10^{-2} \text{ tonf / cm}^2$$

(b) 유한요소세분모델



$$\sigma_{\max} = 4.46 \times 10^{-2} \text{ tonf / cm}^2$$

(c) 제안된 모델

그림 16 Von-Mises 응력 비교

그러나 플랫플레이트 설계시 가장 중요한 해석 결과중에 하나인 슬래브에서 발생하는 응력을 예측할 때 그림 16에서 보는 바와 같이 유효보폭모델로는 슬래브의 응력 분포나 최대응력 값 등을 정확하게 계산해낼 수 없다. 반면에 본 연구에서 제안된 모델은 유한요소세분모델과 거의 비슷한 응력분포와 최대 응력값을 나타내는 것을 알 수 있다.

세 가지 모델에 대하여 그림 17의 El Centro(NS, 1940) 지진하중을 Y방향으로 가하여 시간이력 해석을 수행하였다. 시간이력 해석결과 모델별 최상층 Y방향의 변위시간이력을 그림 18에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 세 가지 모델의 해석결과가 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 그러나 표 3을 보면 자유도수 및 해석시간이 많은 차이가 나는 것을 알 수 있다. 유한요소세분모델은 다른 모델에 비하여 자유도수가 상당히 많기 때문에, 해석시간이 다른 모델에 비하여 약 600배 이상이 되었다. 제안된 모델과 유효보폭모델은 슬래브와 기둥이 만나는 점에만 절점이 존재한다. 표 3을 보면 제안된 모델에서 수퍼요소를 만들고 가상보를 추가하는 작업을 하기 때문에 강성 및 질량행렬을 구하는 과정에서 유효보폭모델보다 시간이 조금 더 걸리지만 나머지 해석시간은 제안된 모델의 자유도수와 유효보폭모델의 자유도 수가 같으므로 정적해석 및 동적해석에 걸리는 시간은 거의 비슷하다. 따라서 슬래브에서 발생하는 응력 이외에 정적변위나 고유진동주기, 시간이력해석 등을

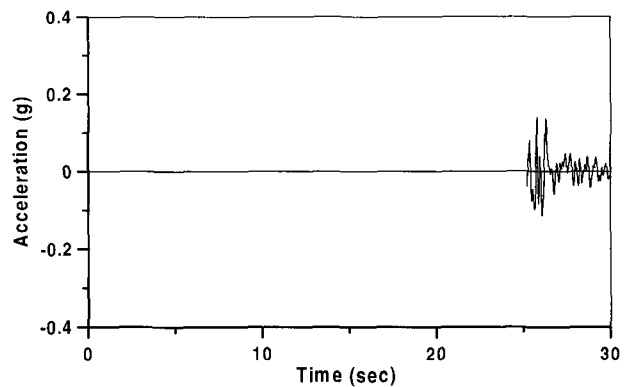


그림 17 El Centro(NS, 1940) 지진하중

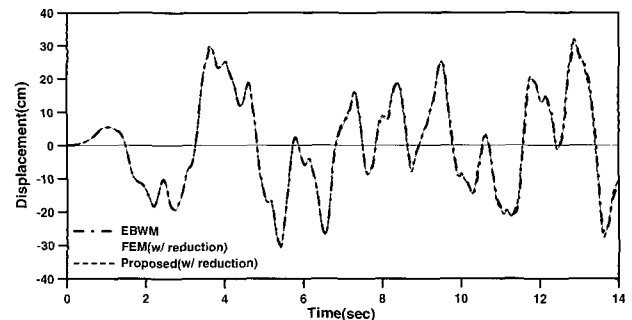


그림 18 최상층 변위시간 이력

수행할 경우에는 유효보폭모델이나 제안된 해석기법 중

표 3 자유도수 및 해석시간의 비교

모델	자유도수	소요시간(초)				
		강성·질량 행렬구성	정적해석	고유치해석	시간이력해석	전체
EBWM	780	2.13	0.13	5.77	3.35	11.38
Proposed	780	13.70	0.12	5.75	3.36	22.93
FEM	55500	230.22	394.38	17406.66	281.58	18312.84

어느 것을 사용해도 좋은 결과를 얻을 수 있으리라고 판단된다. 본 연구에서는 펜티엄 III 750Mhz의 CPU와 1.25 GB의 메모리를 탑재한 컴퓨터를 사용하였다.

5.2 개구부가 있는 플랫플레이트 구조물

실제로 건물을 이용하기 위해서 설치되는 에스컬레이터나 여러 설비배관 등을 위하여 그림 20에서 보는 바와 같이 플랫플레이트에 개구부가 발생하게 된다. 개구부가 있는 플랫플레이트를 모형화하기 위해서는 그림 19와 같이 개구부가 존재하는 슬래브와 개구부와 만나게 되는 슬래브에 대하여 앞에서 사용했던 수퍼요소와는 다른 형태의 수퍼요소를 생성해야 한다. 이전의 예제구조물에서는 수퍼요소의 모서리 절점만을 남겨서 수퍼요소간의 연결을 하였고 한 가지 형태의 수퍼요소를 만들면 모든 부분에 반복해서 사용할 수 있었다. 그러나 그림 19와 같이 개구부가 존재

하는 경우에는 기둥이 있는 곳 이외에 개구부에 의해서 발생하는 모서리의 절점도 이웃한 슬래브와의 연결을 위해서 남겨져야 하고 개구부가 있는 수퍼요소와 연결이 되는 수퍼요소에도 같은 위치에 절점이 필요하다. 개구부가 수퍼요소의 내부에 존재할 경우에는 그림 12(d)에서 보는 수퍼요소처럼 수퍼요소 모서리의 절점만 남기고 행렬응축을 하여서 수퍼요소간의 연결을 더욱 쉽게 할 수 있다.

개구부가 있는 20층 플랫플레이트 예제구조물을 유한요소세분모델과 제안된 해석기법으로 해석하여 응력분포 및 정적형변위와 고유진동주기를 그림 21, 22, 23에 각각 나타내었다. 세 가지 해석결과 모두 제안된 해석기법의 결과가 유한요소세분모델의 해석결과와 매우 비슷한 것을 알 수 있다. 반면에 해석시간은 표 4에서 보는 바와 같이 유한

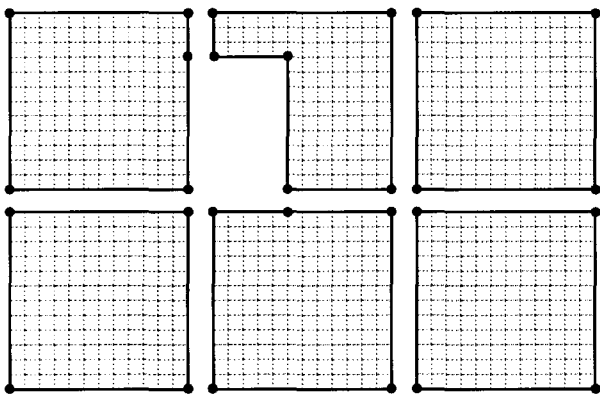


그림 19 개구부가 있는 슬래브의 수퍼요소

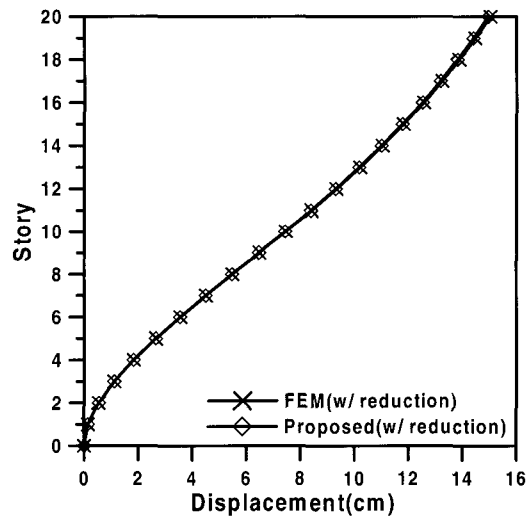


그림 22 정적형변위

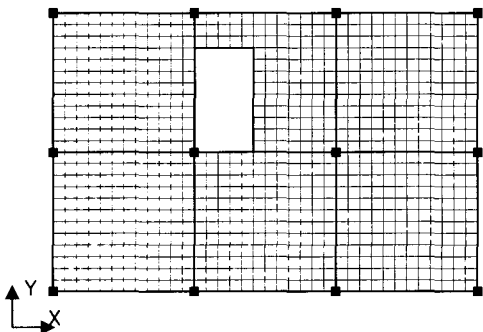
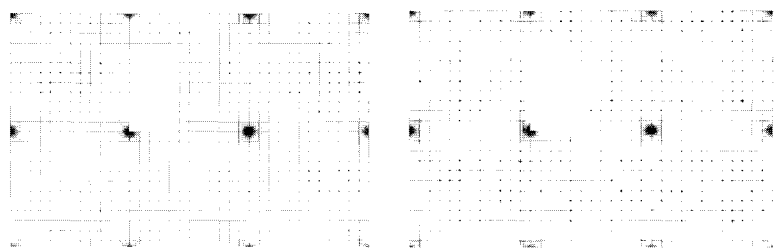


그림 20 개구부가 있는 예제구조물 평면



(a) 유한요소세분모델 (b) 제안된 모델

그림 21 Von-Mises 응력 비교

표 4 자유도수 및 해석시간의 비교

모델	자유도수	소요시간(초)				
		강성·질량 행렬구성	정적해석	고유치해석	시간이력해석	전체
Proposed	900	44.98	0.14	7.22	3.83	56.17
FEM	53580	214.13	447.98	16126.36	269.72	17058.19

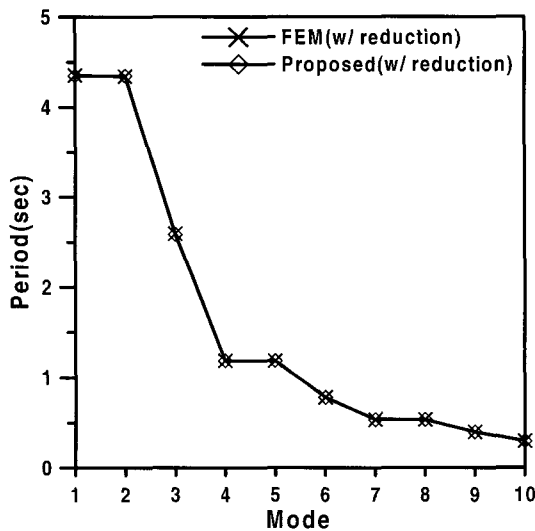


그림 23 고유진동주기

요소세분모델은 약 5시간 가량의 해석시간이 소요되는데 반하여 제안된 해석기법은 약 1분 정도 밖에 소요되지 않았다. 제안된 해석기법으로 생성한 모델의 자유도 수가 이전의 두 예제에 비하여 증가한 것은 기둥이 위치하는 수퍼 요소 모서리 절점 뿐만 아니라 개구부의 모서리 절점도 행렬응축 후 남겨지기 때문이다.

6. 결 론

본 연구에서는 플랫플레이트 구조물의 정확한 해석을 위하여 유한요소법에서 횡변위에 따른 슬래브의 강성저감효과를 고려하여 해석할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 플랫플레이트 구조물의 효율적인 해석을 위하여 수퍼요소와 가상보를 사용한 해석기법을 제안하였고 예제구조물의 해석을 통하여 제안된 해석기법의 정확성과 효용성에 대하여 검토하였다. 본 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 바둑판형의 일반적인 플랫플레이트 구조물에 대해서는 유효보폭모델을 사용해서 해석을 하여도 구조물의 거동을 비교적 정확하게 예측할 수 있다. 그러나 슬래브에 개구부가 있거나 비정형의 평면을 가진 플랫플레이트 구조물의 경우에는 유효보폭모델을 사용하기가 어렵다.
- 2) 유효보폭모델을 사용하면 슬래브에서 발생하는 응력을

제대로 표현할 수 없고, 고층 건물에서 기둥의 단면이 변할 때마다 등가보의 유효폭을 새로 산정해야 하므로 사용하기가 번거롭다.

- 3) 유한요소해석에서도 슬래브의 탄성계수를 조절하여 횡변위에 따른 플랫플레이트의 강성저감 효과를 고려할 수 있다. Grossman이 제안한 강성저감계수를 이용하여 슬래브의 강성저감계수를 유도할 수 있고, 이를 이용하여 슬래브의 강성을 저감시켜서 해석하면 플랫플레이트 구조물의 정적 및 동적 거동을 상당히 정확하게 예측할 수 있다.
- 4) 본 연구에서 제안한 해석기법을 이용하면 정적 및 동적 해석에서 유한요소세분모델과 거의 일치하는 해석결과를 얻을 수 있다. 또한, 수퍼요소를 이용하여 모형화하면 행렬응축과정을 통하여 자유도수가 크게 줄어들기 때문에 해석시간 및 컴퓨터 메모리를 상당히 절약할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 두뇌한국 21사업 핵심분야 사업비와 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단의 지원에 의하여 수행되었음을 밝히며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. Hwan, S. J. and Moehle, J. P., "An experimental study of flat-plate structures under vertical and lateral loads", *Report No. UCB/SEMM-90/11, Department of Civil Engineering University of California, Berkeley*, 1990, p.271
2. Moehle, J. P., "Strength of Slab-Column Edge Connections", *ACI Structural Journal*, Vol.85, No.1, 1988, pp.89~98
3. Mulcahy, J. F., and Rotter, J. M., "Moment Rotation Characteristics of Flat Plate and Column Systems", *ACI Structural Journal*, Vol.80, No.2, 1983, pp.85~92
4. Grossman, J. S., "Verification of Proposed Design Methodologies for Effective Width of Slabs in Slab-Column Frames", *ACI Structural Journal*

- rnal*, Vol.94, No.2, 1997, pp.181~196
5. Vanderbilt, D. M., "Equivalent Frame Analysis of Unbraced Reinforced Concrete Buildings for Static Lateral Loads", *Structural Research Report*, No.36, Civil Engineering Department, Colorado State University, 1981
 6. Pecknold, D. A., "Slab Effective Width for Equivalent Frame Analysis", *ACI Structural Journal*, Vol.72, No.4, 1975, pp.135~137
 7. Allen, F., and Darvall, P., "Lateral Load Equivalent Frame", *ACI Structural Journal*, Vol.74, No.7, 1977, pp.294~299
 8. Lee, D. G., Kim, H. S. and Chun, M. H., "Efficient Seismic Analysis of High-Rise Shear Wall Buildings considering the Flexural Stiffness of Floor Slabs", *Engineering Structures*, Vol.24, No.5, 2002, pp.613~623
 9. Kim, H. S. and Lee, D. G., "Efficient Analysis of Shear Walls with Openings", *Engineering Structures*, Vol.25, No.8, 2003, pp.981~991
 10. Lee, D. G. and Kim, H. S., "Analysis of Shear Wall with Openings using Super Elements", *Proceeding of EASEC-8*, Singapore, December, 2001, p.1378
 11. Nawy, E., G., *Reinforced concrete 4th ed.*, Prentice Hall, New Jersey, pp.777~780, 2000
 12. Weaver, W., Jr., Johnston, Paul R., *Structural Dynamics by Finite Elements*, Prentice Hall, 1987, pp.282~290
 13. 김현수, 이동근, "바닥판의 휨강성을 고려한 전단벽식 건물의 효율적인 지진해석", 한국전산구조공학회 논문집, 제14권, 제3호, 2001, pp.193~202
 14. 김현수, 남궁계홍, 이동근, "개구부가 있는 고층 벽식 구조물의 효율적인 3차원 해석", 한국전산구조공학회 논문집, 제15권, 제3호, 2001, pp.351~365