

## 강성저감을 고려한 플랫슬래브 구조물의 지진해석 Seismic Analysis of Flat Slab Structures considering Stiffness Degradation

김 현 수\*  
Kim, Hyun-Su

이 승 재\*\*  
Lee, Seung-Jae

이 동 근\*\*\*  
Lee, Dong-Guen

---

### ABSTRACT

Flat slab 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 equivalent frame method(EFM) with equivalent beams proposed by Jacob S. Grossman in practical engineering for the analysis of flat slab structures. However, in many cases, when it is difficult to use the EFM, 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 were subdivided into a finer mesh. 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 slab system considered in the EFM 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 EFM.

---

### 1. 서 론

근래에 보가 없이 기둥이 슬래브를 직접 지지하는 구조인 플랫슬래브 시스템이 많이 사용되고 있다. 이 구조는 보가 없으므로 건물의 층고를 낮출 수 있으며 거푸집 및 철근공사가 간편하고 채광 및 통풍성이 우수하며 바닥판 하부의 배관 및 배선이 쉽고 거푸집 제작도 용이하여 공기를 단축시킬 수 있는 등의 장점을 가지고 있는 구조시스템이다. 반면에 슬래브의 변장비, 양방향 기둥 간격비 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. 플랫슬래브 시스템은 중력하중에 저항하기 위하여 개발된 구조시스템으로 횡력에 대한 저항능력에 관해서는 최근에 까지 여러 연구자들에 의하여 연구가 수행되고 있다.

---

\* 정 회 원 · 성균관대학교 건축공학과 박사 후 연구원

\*\* 학생회원 · 성균관대학교 건축공학과 석사 과정

\*\* 정 회 원 · 성균관대학교 건축공학과 교 수

## 2. 등가골조법을 사용한 플랫슬래브의 모형화

### 2.1 Grossman의 유효폭 산정식

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

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

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

여기서,  $\alpha$  : 유효폭 계수                       $\alpha l_2$  : 유효폭                       $K_d$  : 강성저감계수

$l_1$  : 모멘트가 산정되는 방향으로 측정된 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 유효춤                       $h$  : 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 거리이다. 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   |

### 2.2 등가골조법의 문제점

현재 실무에서 플랫슬래브 구조물을 해석하기 위해 주로 사용하고 있는 등가골조법은 슬래브를 등가보로 모형화하는 가정상의 문제점 때문에 적용성 및 정확성에 상당한 한계점을 가지고 있다. 그림 1(a)와 같이 직사각형의 평면을 가지는 구조물에 대해서는 등가골조법을 적용하는데 특별한 문제가 없다. 그러나 그림 1(b), 1(c), 1(d), 1(e)에서 보는 형태의 평면을 가진 플랫슬래브 구조물에 대해서는 등가골조법을 적용하기가 어렵다. 그림 1(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 등가골조법은 그림

1(c)에서 보는 바와 같이 슬래브에 개구부가 존재하는 평면에 대해서는 적용하기가 어려우나 플랫 슬래브 시스템을 적용하는 건물이 대부분 상업용 건물이고 상업용 건물에는 에스컬레이터의 설치나 설비 등의 이유로 다양한 개구부가 존재하게 되므로 등가골조법의 적용에는 상당한 제한이 따르게 된다. 뿐만 아니라 등가골조법을 사용하게 되면 슬래브의 설계시에 가장 중요한 해석 결과인 슬래브에서 발생하는 응력의 분포를 제대로 파악할 수 없다.

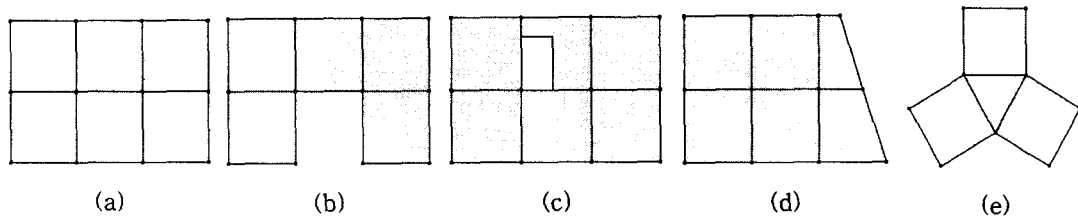


그림 1. 플랫슬래브 구조물의 여러 가지 평면형태

### 3. 유한요소를 사용한 플랫슬래브 구조물의 해석

#### 3.1 횡변위에 따른 슬래브의 강성저감효과

일반적으로 플랫슬래브 구조물은 수평하중이 채하될 경우에 슬래브의 강성저하가 현저하다. 따라서 Grossman은 그의 연구에서 1990년에 U.C. Berkeley의 Moehle 교수가 수행한 실험 결과에 근거하여 층간변위에 따라서 등가보의 유효폭을 줄일 수 있는 강성저감계수( $K_d$ )를 제안하였다. 그림 2는 Berkeley 대학의 시험체 구조물에 동서 및 남북 방향으로 하중을 가하였을 때 층간 변위에 따른 구조물의 횡방향 강성 변화를 나타낸 것이다. 실험결과(UCB)는 층간변위가 커질수록 구조물의 횡방향 강성이 작아지는 것을 알 수 있다. Grossman이 제안한 방법(EFM)으로 해석한 결과를 보면 층간변위가 커짐에 따라서 더 작은 강성저감계수를 사용하여 슬래브의 유효폭을 줄이기 때문에 실험결과와 비슷하게 층간 변위가 커짐에 따라서 구조물의 횡방향 강성이 작아진다.

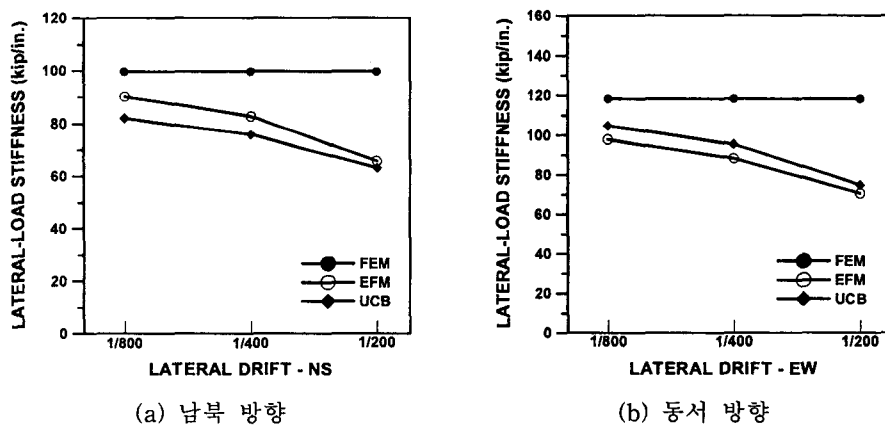


그림 2. 층간 변형에 따른 플랫슬래브 구조물의 횡방향 강성 변화

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

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

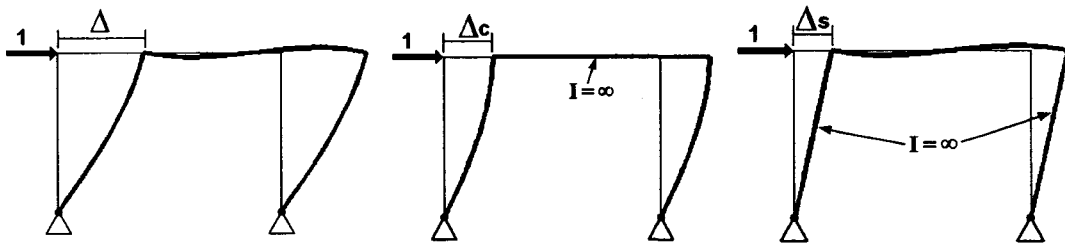
여기서,  $R$  : 구조물의 강성저감계수       $K_{EFM}$  : 등가골조모델의 강성  
 $K_{FEM}$  : 유한요소모델의 강성

### 3.2 슬래브의 강성저감효과를 고려한 유한요소해석

그림 3에서 보는 바와 같이 탄성거동을 하는 플랫폼슬래브 구조물의 수평변위( $\Delta$ )는 기둥의 변형에 의한 변위( $\Delta_c$ )와 슬래브의 변형에 의한 변위( $\Delta_s$ )로 나누어 질 수 있으며 이를 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

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

여기서,  $\Delta$  : 구조물 전체 변형에 의한 변위       $\Delta_c$  : 기둥의 변형에 의한 변위  
 $\Delta_s$  : 슬래브의 변형에 의한 변위



(a) 구조물의 전체 변형

(b) 기둥의 변형

(c) 슬래브의 변형

그림 3. 간단한 플랫폼슬래브 구조물의 횡변형 성분

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

$$\frac{\Delta}{R} = \Delta_c + \frac{\Delta_s}{R_s} \quad (4)$$

여기서,  $R_s$  : 슬래브의 강성저감계수

식 (4)를 다시 정리하면 슬래브의 강성저감계수( $R_s$ )를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_s = \frac{\Delta_s}{\frac{\Delta}{R} - \Delta_c} \quad (5)$$

방향별 층간변위에 대하여 슬래브와 기둥의 변형에 의해서 발생하는 변위를 구분하여 식 (5)로 계산한 슬래브의 강성저감계수( $R_s$ )의 평균값을 그림 4에 나타내었다.

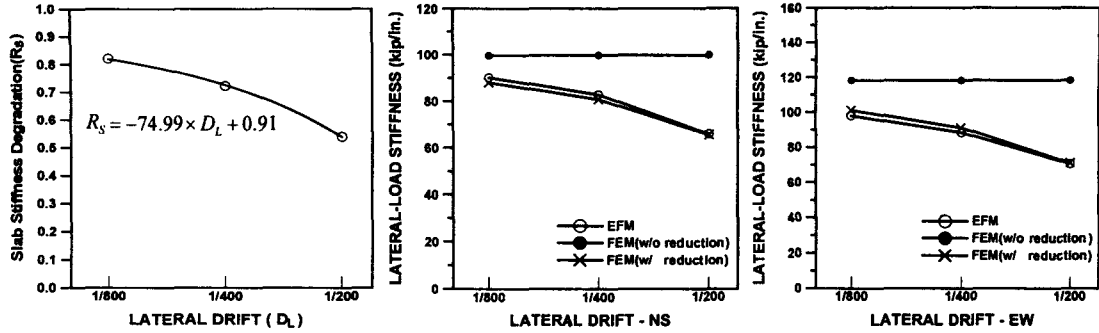


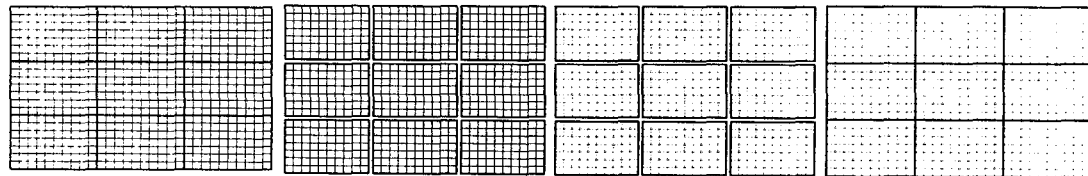
그림 4. 층간변위에 따른 슬래브의 강성저감계수

(a) 남북 방향 (b) 동서 방향  
그림 5. 슬래브의 강성저감효과를 고려한 유한요소해석 결과

강성저감계수를 사용하여 유한요소 모델의 슬래브 강성을 저감시켜서 해석한 결과와 등가골조법에 의한 결과를 그림 5에 나타내었다. 유한요소 모델의 슬래브 강성을 저감시키면 Grossman의 등가골조법에서와 같이 슬래브의 강성저감효과를 고려할 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 슈퍼요소를 사용한 플랫슬래브의 모형화

일반적으로 플랫슬래브 구조물에는 기둥이 규칙적으로 배열이 된다. 따라서 기둥에 의하여 구획되는 동일한 크기의 장방형 슬래브가 반복적으로 사용되는 특징을 가지고 있으므로 슈퍼요소를 적용하기가 용이하다. 플랫슬래브 예제구조물을 슈퍼요소를 사용해서 모형화하는 방법을 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a)는 정확한 해석을 위하여 플랫슬래브를 여러 개의 유한요소로 세분한 모델이다. 세분한 모델을 동일한 구조형태의 슬래브로 분리하면 그림 6(b)와 같다. 분리된 모델의 모서리 절점만 남기고 나머지 절점은 행렬응축기법을 통하여 소거함으로써 그림 6(c)와 같은 슈퍼요소를 생성할 수 있다. 생성된 슈퍼요소는 그림 6(d)와 같이 모서리의 절점만을 공유함으로써 한 층의 슬래브로 조합될 수 있다.



(a) 플랫슬래브 유한요소세분모델 (b) 슈퍼요소 생성을 위한 분리 (c) 슈퍼요소 생성 (d) 슈퍼요소 조합

그림 6. 슈퍼요소를 이용한 플랫슬래브의 모형화 과정

슈퍼요소간에 모서리 절점만을 공유하는 경우에는 슈퍼요소간의 경계부분에서 변형적합조건을 만족시키지 못하는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 슈퍼요소 경계부분의 변형적합조건을 만족시키기 위하여 가상보를 사용하였다. 플랫슬래브 구조물의 모형화과정에서 가상보를 사용하는 방법을 그림 7에 나타내었다. 그림 7(a)와 같이 슬래브 유한요소세분모델의 경계부분에 가상보를 추가하고 그림 7(b)와 같이 행렬응축을 하여 슬래브 모서리 절점의 자유도만 남기고 나머지 자유도는 모두 소거한다. 가상보에 의하여 추가된 강성을 제거하기 위하여 그림 7(c)와 같이 내부 절점이 없는 가상보의 강성을 빼주었다.

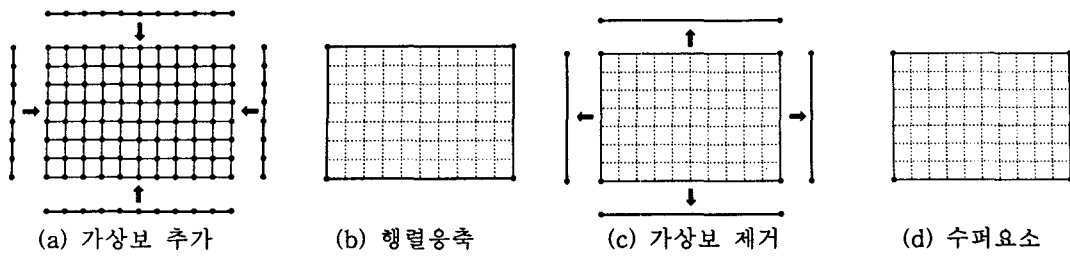


그림 7. 가상보를 사용한 수퍼요소의 개발과정

### 5. 예제 해석

그림 8과 같이 장방형의 평면을 가진 20층의 전형적인 플랫폼라브 구조물에 대하여 등가골조법 및 유한요소법으로 해석을 수행하였다. 유한요소세분모델을 사용한 해석과 본 연구에서 제안한 해석방법에는 앞에서 구한 강성저감식을 이용하여 슬래브의 강성을 저감시켜서 해석하였다. 이 때 발생하는 정적 횡변위를 그림 9에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 등가골조법과 강성저감을 고려한 유한요소세분모델 그리고 본 연구에서 제안된 해석방법의 결과가 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 그림 10에 나타낸 구조물의 고유진동주기 역시 각 모델별로 별다른 차이가 없는 것을 알 수 있다. 정적횡변위와 고유진동주기는 등가골조모델과 유한요소모델의 결과의 차이가 크지 않았다. 그러나 플랫폼라브 설계시 가장 중요한 해석 결과중에 하나인 슬래브에서 발생하는 응력을 예측할 때 그림 11에서 보는 바와 같이 등가골조법으로는 슬래브의 응력 분포나 최대응력값 등을 정확하게 계산해낼 수 없다. 반면에 본 연구에서 제안된 모델은 유한요소세분모델과 거의 비슷한 응력분포와 최대 응력값을 나타내는 것을 알 수 있다.

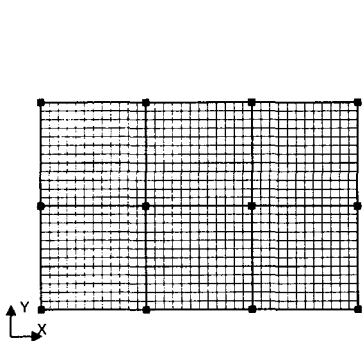


그림 8. 예제구조물 평면

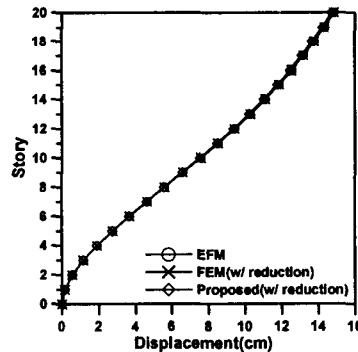


그림 9. 정적횡변위

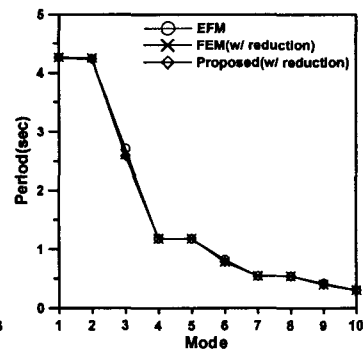
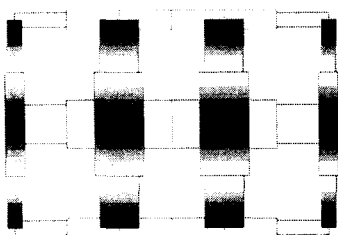
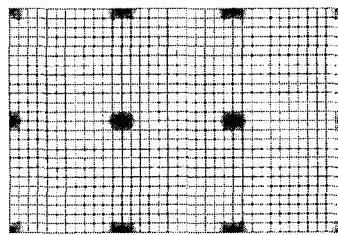


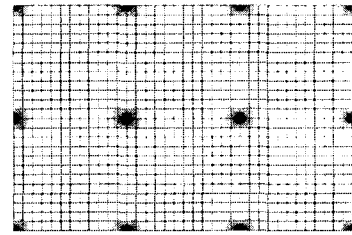
그림 10. 고유진동주기



$\sigma_{\max} = 2.22 \times 10^{-2} \text{ tonf / cm}^2$   
(a) 등가골조모델



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



$\sigma_{\max} = 4.46 \times 10^{-2} \text{ tonf / cm}^2$   
(c) 제안된 모델

그림 11. Von-Mises 응력 비교

세 가지 모델에 대하여 그림 12의 El Centro(NS, 1940) 지진하중을 Y방향으로 가하여 시간이력 해석을 수행하였다. 그림 13에서 볼 수 있는 것처럼 세 가지 모델의 해석결과가 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 그러나 표 2를 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. 표 3을 보면 제안된 모델에서 수퍼요소를 만들고 가상보를 추가하는 작업을 하기 때문에 강성 및 질량행렬을 구하는 과정에서 등가결조법보다 시간이 조금 더 걸리지만 나머지 해석시간은 제안된 모델의 자유도수가 더 적기 때문에 조금 덜 걸리는 것을 알 수 있다.

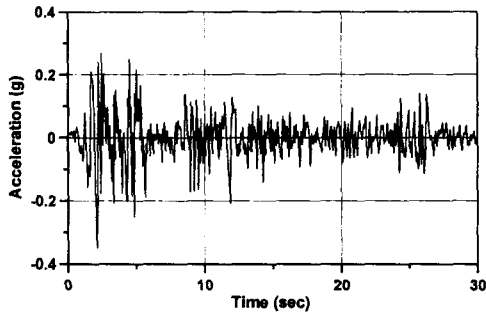


그림 12. El Centro(NS, 1940) 지진하중

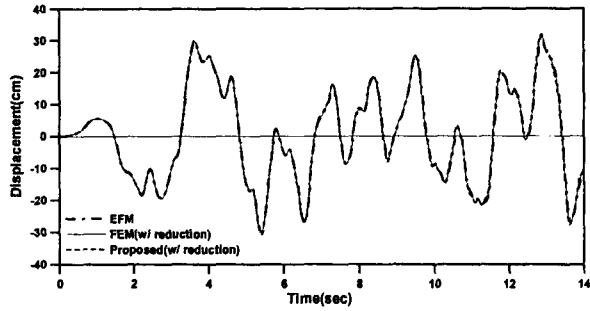


그림 13. 최상층 변위시간 이력

표 2. 자유도수 및 해석시간의 비교

| 모델       | 자유도수  | 소요시간(초)       |        |          |        |          |
|----------|-------|---------------|--------|----------|--------|----------|
|          |       | 강성·질량<br>행렬구성 | 정적해석   | 고유치해석    | 시간이력해석 | 전체       |
| EFM      | 1740  | 2.61          | 0.36   | 19.69    | 7.67   | 30.33    |
| Proposed | 780   | 13.70         | 0.12   | 5.75     | 3.36   | 22.93    |
| FEM      | 55500 | 230.22        | 394.38 | 17406.66 | 281.58 | 18312.84 |

백화점과 같은 상업용 건물에 에스컬레이터 등을 설치하기 위해서는 그림 14에서 보는 바와 같이 플랫폼층에 개구부가 발생하게 된다. 개구부가 있는 20층 플랫폼층 예제구조물을 유한요소세분모델과 제안된 해석기법으로 해석하여 응력분포 및 정적변위와 고유진동주기를 그림 15, 16, 17에 각각 나타내었다. 세 가지 해석결과 모두 제안된 해석기법의 결과가 유한요소세분모델의 해석결과와 매우 비슷한 것을 알 수 있다.

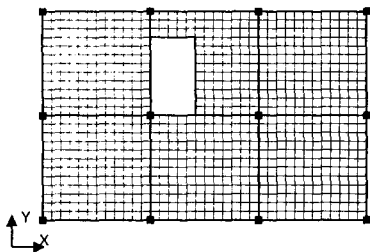
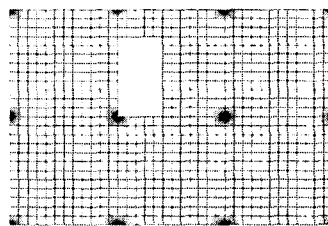
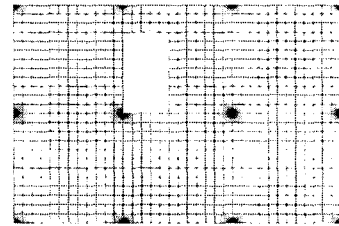


그림 14. 개구부가 있는 예제구조물 평면



$\sigma_{\max} = 4.48 \times 10^{-2} \text{tonf/cm}^2$   
(a) 유한요소세분모델



$\sigma_{\max} = 4.47 \times 10^{-2} \text{tonf/cm}^2$   
(b) 제안된 모델

그림 15. Von-Mises 응력 비교

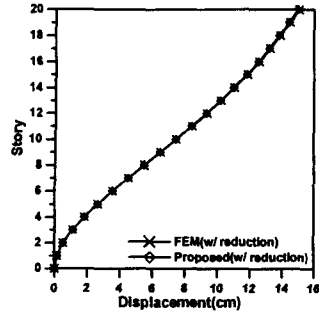


그림 16. 정적형변위

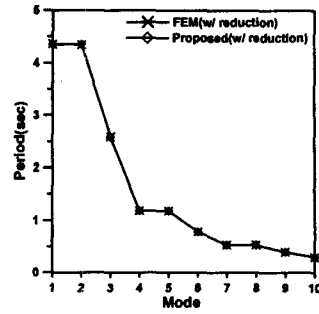


그림 17. 고유진동주기

## 6. 결론

본 연구에서는 플랫슬래브 구조물의 정확한 해석을 위하여 유한요소법에서 횡변위에 따른 슬래브의 강성저감효과를 고려하여 해석할 수 있는 방법을 제시하였다. 본 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 바둑판형의 일반적인 플랫슬래브 구조물에 대해서는 등가골조법을 사용해서 해석을 하여도 구조물의 거동을 비교적 정확하게 예측할 수 있다. 그러나 슬래브에 개구부가 있거나 비정형의 평면을 가진 플랫슬래브 구조물의 경우에는 등가골조법을 사용하기가 어렵다.
- 2) 유한요소해석에서도 슬래브의 탄성계수를 조절하여 횡변위에 따른 플랫슬래브의 강성저감효과를 고려할 수 있다. Grossman이 제안한 강성저감계수를 이용하여 슬래브의 강성저감계수를 유도할 수 있고 이를 이용하여 슬래브의 강성을 저감시켜서 해석하면 플랫슬래브 구조물의 정적 및 동적 거동을 상당히 정확하게 예측할 수 있다.
- 3) 본 연구에서 제안한 해석기법을 이용하면 정적 및 동적해석에서 유한요소세분모델과 거의 일치하는 해석결과를 얻을 수 있다. 또한 수피요소를 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.

## 참고문헌

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, pp.271.
2. Moehle, J. P., "Strength of Slab-Column Edge Connections," *ACI Structural Journal*, Vol.85, No.1, 1988, pp.89~98.
3. Grossman, J. S., "Verification of Proposed Design Methodologies for Effective Width of Slabs in Slab-Column Frames," *ACI Structural Journal*, Vol.94, No.2, 1997, pp.181~196.
4. 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.