

2방향 중공슬래브 구조시스템의 비선형 지진거동 평가

Evaluation of The Nonlinear Seismic Behavior of a Biaxial Hollow Slab

박용구¹⁾ · 김현수²⁾ · 고 현³⁾ · 박현재⁴⁾ · 이동근⁵⁾

Park, Yong Koo · Kim, Hyun Su · Ko, Hyun · Park, Hyun Jae · Lee, Dong Guen

국문 요약 >> 최근 들어 슬래브 차음성능에 대한 관심이 커지고 있으며 이에 대응하여 슬래브 두께 증가가 요구되고 있다. 또한 건축물의 효율적인 공간 활용을 위하여 장스팬의 바닥판 시스템이 많이 사용되고 있다. 이러한 요구를 만족하기 위해 개발된 바닥판 시스템 중의 하나가 2방향 중공슬래브이다. 2방향 중공슬래브의 구조적 성능을 확인하기 위해서는 지진이 발생하였을 때의 안전성에 대한 검토가 반드시 필요하다. 따라서 본 연구에서는 재료비선형 시간이력해석을 통하여 2방향 중공슬래브의 지진하중에 대한 거동을 평가하였다. 효율적인 시간이력해석을 위하여 기존에 제안된 등가플레이트 모델을 사용하였고, 또한 유효보폭법을 적용한 비선형 모델을 이용하여 2방향 중공슬래브를 적용한 예제구조물의 내진성능을 평가하였다. 이를 통하여 2방향 중공슬래브를 사용한 구조물이 동일한 슬래브 두께의 일반 플랫 플레이트 구조물에 비하여 내진성능이 저하되지 않음을 확인 할 수 있었다.

주요어 2방향 중공슬래브, 등가플레이트 모델, 유효보폭법, 비선형 시간이력해석, 내진성능

ABSTRACT >> Recently, there has been an increased interest in the noise isolation capacity of floor slabs, and thus an increase of slab thickness is required. In addition, long span floor systems are frequently used for efficient space use of building structures. In order to satisfy these requirements, a biaxial hollow slab system has been developed. To verify the structural capacity of a biaxial hollow slab system, safety verification against earthquake loads is essential. Therefore, the seismic behavior of a biaxial hollow slab system has been investigated using material nonlinear time history analyses. For efficient time history analyses, the equivalent plate element model previously proposed was used and the seismic capacity of the example structure having a biaxial hollow slab system has been evaluated using the nonlinear finite element model developed by the equivalent frame method. Based on analytical results, it has been shown that the seismic capacity of a biaxial hollow slab system is not worse than that of a flat plate slab system with the same thickness.

Key words Biaxial hollow slab, Equivalent plate model, Effective beam method, Nonlinear time history analysis, Seismic capacity

1. 서론

현대 사회는 도시의 인구집중으로 인하여 도심지에서 공동주택 및 오피스의 수요가 점차 증가추세에 있고 도심지의 지가의 상승으로 이러한 공동주택 및 오피스 건물은 점점 고층화가 요구되고 있다. 그리고 구조공학 기술의 발전 및 사회적, 경제적 요구에 의하여 건물의 장스팬화가 이루어지

므로 진동 및 소음문제 등이 많이 대두되고 있다. 이로 인하여 공동주택 바닥충격음 차단구조인정 및 관리기준(2005년), 공동주택 친환경건축물 인증기준(2005년), 내진기준 강화(2004년) 등과 같은 구조적, 환경적 측면에서 정부의 정책 및 기준이 강화되고 있다. 이러한 기준을 만족시키기 위하여 기존의 구조시스템에서 슬래브의 두께를 증가시키거나 새로운 구조상세를 적용하는 등의 변화가 있어왔다. 그러나 진동 및 소음문제를 완화시키고자 슬래브의 두께를 증가시키게 되면 슬래브 자중에 의한 질량의 증가로 지진하중이 증가하게 되므로 구조적인 문제를 유발할 수도 있다.

이러한 배경을 바탕으로 중공슬래브 시스템이 개발되어 사용되고 있다. 중공슬래브 시스템은 슬래브에 중공부를 두어 슬래브의 자중을 저감시키면서도 슬래브의 두께를 크게 하여 휨강성을 향상시킨 바닥판 시스템으로 같은 양의 재료

¹⁾ 정회원 · 성균관대학교 건설환경시스템공학과, 박사과정

²⁾ 정회원 · 선문대학교 건축학부, 조교수
(교신지자: hskim72@sunmoon.ac.kr)

³⁾ 정회원 · (주)아이스트 설계4본부, 공학박사

⁴⁾ 마이다스아이티(주) 건축개발팀, 사원

⁵⁾ 정회원 · 성균관대학교 건축공학과, 교수

본 논문에 대한 토의를 2011년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2010. 10. 8 / 수정일 : 2010. 9. 1 / 게재확정일 : 2010. 9. 2)

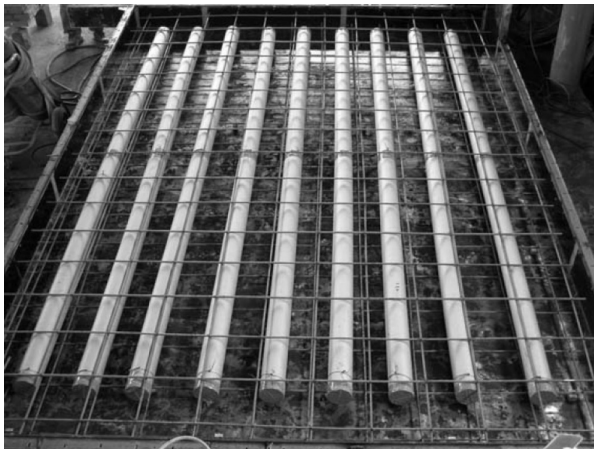
를 사용하였을 때 속이 짝 찬 슬래브보다 두께를 키울 수 있어서 바닥판의 차음성을 향상시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 근래에 많이 사용된 1방향 중공슬래브의 경우, 그림 1(a)와 같이 중공관이 삽입되어 한 방향으로만 휨에 저항하기 때문에, 2방향의 넓은 슬래브에 적용하기에는 구조적으로 무리가 있다. 반면 최근에 많은 연구가 이루어지는 2방향 중공슬래브 시스템은 그림 1(b)와 같이 양방향 모두 I형 단면을 가지도록 중공을 두어 양방향으로 휨 저항성을 가지는 것이 특징이다.

2방향 중공슬래브의 사용이 증가함에 따라 보다 효율적이고 효과적인 2방향 중공슬래브의 해석과 설계가 필요하게 되었다. 2방향 중공슬래브의 정확한 해석을 위해서는 슬래브에 매입되는 중공의 효과를 고려할 수 있는 유한요소 해석모델을 사용해야 한다. 이를 위하여 일반적으로 3차원 입체요소(solid 요소)를 사용하여 모형화하는 방법이 적용되는데, 이 경우에는 절점수와 요소의 증가로 인하여 많은 시간과 노력이 요구되며 고충전물 전체를 이러한 방법으로 모형화할 때에는 컴퓨터 메모리의 제한으로 모델링 자체가 어려

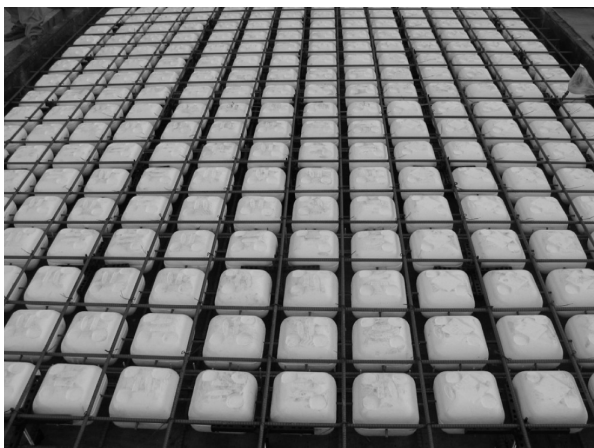
워질 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 2방향 중공슬래브 구조 시스템의 효율적인 해석을 위한 등가플레이트 모델이 개발되었고, 예제를 통하여 정확성과 효율성을 검증하였다.⁽¹⁾ 또한 보행하중에 의한 진동해석을 수행하여 2방향 중공슬래브의 바닥진동성능을 확인하였다.⁽²⁾

이러한 2방향 중공슬래브의 구조적 성능을 확인하고 보다 널리 사용될 수 있도록 하기 위해서는 바닥진동성능 뿐만 아니라 지진이 발생하였을 때의 안정성에 대한 검토가 반드시 필요하다. 따라서 본 연구에서는 지진이 발생하였을 때 어느 정도 위험한 수준인지 또는 지진응답에 있어 어떠한 장점을 가지고 있는가를 검토하여 2방향 중공슬래브의 내진 성능을 평가하고자 한다. 이를 위하여 기존에 제안된 등가플레이트 모델을 이용하여 2방향 중공슬래브가 사용된 전체 구조물을 모델링하고 이 모델에 다시 비선형 해석이 용이하도록 유효보폭법을 적용하여 등가모델을 구성하였다. 이러한 등가모델을 이용하여 비선형 정적해석(Pushover Analysis)과 비선형 시간이력해석(Nonlinear Time History Analysis)을 수행하였다.



(a) 1방향 중공슬래브



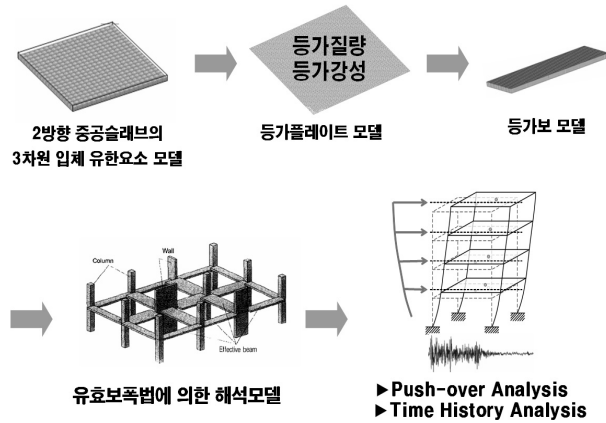
(b) 2방향 중공슬래브

〈그림 1〉 중공슬래브의 종류

2. 2방향 중공슬래브 시스템의 등가모델

2.1 3차원 입체요소를 사용한 상세 해석모델의 문제점

2방향 중공슬래브의 정확한 해석을 위해서는 중공의 형상을 얼마나 실제와 같이 모델링하느냐가 중요하다. 그래야만 중공형상에 의한 슬래브 동적거동 특성의 변화를 잘 반영할 수 있기 때문이다. 이를 위해서는 3차원 입체요소를 사용하여 중공슬래브를 모형화해야 한다. 이때 요소의 크기가 작을수록 중공볼의 형상을 정확하게 표현할 수 있으며 더욱 정확한 해석이 이루어진다. 요소의 크기가 작을수록 동적거동을 정확하게 표현할 수 있지만 해석모델의 절점 및 요소수의 증가로 해석에 많은 시간이 소요하게 된다. 게다가 일정 범위 이상에서는 컴퓨터 메모리의 제한에 부딪혀 모델링이 불가능해진다. 기존에 제안된 등가플레이트 모델은 3차원 입체요소 대신에 등가의 2차원 플레이트 요소를 사용함으로써 이러한 문제를 해결하였다. 그러나 현재까지 정확성이 검증된 적절한 무량관 구조물의 비선형 해석 프로그램이 개발되어 있지 않기 때문에 등가플레이트 모델을 이용하여 비선형 지진해석을 수행하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 2방향 중공슬래브 구조물의 지진해석을 위하여 등가플레이트 모델에 유효보폭법을 적용한 등가모델을 사용하였다.



〈그림 2〉 등가화 과정

2.2 2방향 중공슬래브 시스템의 등가모델 개발

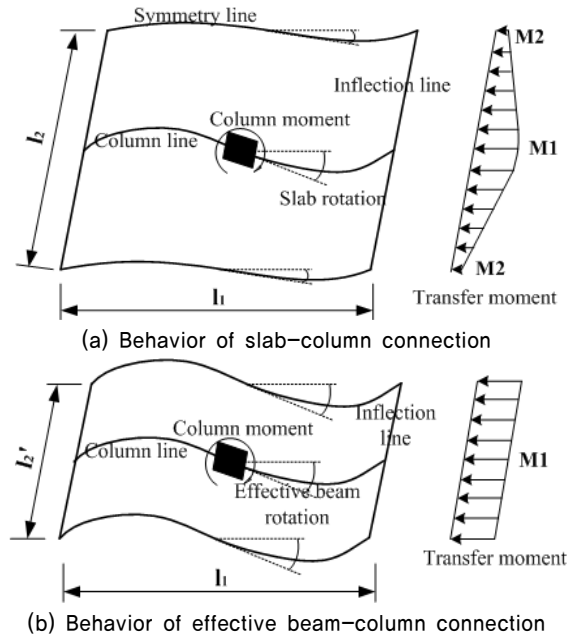
2방향 중공슬래브의 지진하중에 대한 해석을 위하여 본 연구에서는 2차원에 걸친 등가화 과정을 거치게 된다. 첫 번째가 3차원 입체요소를 이용한 유한요소 모델을 등가의 플레이트요소를 사용한 모델로 등가화하는 과정이다. 그리고 두 번째가 무량판 구조물의 횡하중에 대한 해석을 위하여 유효보폭법을 이용한 구조물 전체의 등가화 과정이다. 이러한 과정을 그림 2에 나타내었다.

2.2.1 등가플레이트 모델

기존연구에서는 효율적이면서도 비교적 정확한 2방향 중공슬래브의 응답을 구하기 위하여 2방향 중공슬래브의 강성과 질량을 고려한 플레이트 요소 모델링 기법을 제안하였다. 등가 플레이트 모델의 개발에서 가장 중요한 것은 등가의 강성과 등가의 질량을 구하는 것이다. 선행 연구⁽¹⁾에서는 일반 슬래브 플레이트 모델과 2방향 중공슬래브의 3차원 입체 유한요소 모델의 등분포 하중에 대한 휨강성의 비교를 통하여 등가탄성계수를 구한 이후에, 등가탄성계수를 플레이트 요소에 적용함으로써 2방향 중공슬래브와 동일한 등가의 강성을 가지는 플레이트 요소를 생성하였다. 질량 역시 중공부에 의한 질량감소를 고려한 등가질량을 적용함으로써 2방향 중공슬래브와 동일한 동적특성을 가지는 플레이트 요소 모델을 구성하였다. 이에 대한 자세한 내용은 참고문헌⁽¹⁾을 통해서 확인할 수 있다.

2.2.2 유효보폭법

철근콘크리트 슬래브의 모델링은 면내의 강막효과만을 고려하고 면의 휨강성에 의한 영향은 무시하는 것이 일반적이다. 이로 인한 건물거동의 예측 결과는 횡변위를 과대평가하고 밀면전단력을 과소평가하여 안전측의 밀면전단력을



〈그림 3〉 유효보폭법 개념도

제공하지 못한다는 결점을 가지고 있다. 특히 보가 없는 무량판 구조의 슬래브는 프리스트레스트 슬래브 또는 보가 있는 슬래브에 비하여 슬래브의 휨 강성이 전체 건물의 거동에 미치는 영향이 매우 크므로 이에 대한 충분한 고려가 있어야 한다.⁽³⁾ 본 연구에서는 횡하중에 대한 해석 시 슬래브의 모델링 방법 중 비교적 정확하고 실용적인 유효보폭법을 적용하였다. 유효보폭 모델에 관한 대부분의 연구는 유효보폭의 폭을 식 (1)과 같이 정의하고 유효보폭 계수 a 에 관한 연구를 집중적으로 수행하였다.

$$l'_2 = a \times l_2 \quad (1)$$

식 (1)에서 a 는 유효보폭 계수이고, l'_2 와 l_2 는 각각 유효보폭과 슬래브의 폭이다. 유효보폭 모델은 기둥의 불균형 모멘트가 슬래브에 직접 전달된다고 가정하고 슬래브를 유효폭을 갖는 보 요소로 모델링한 것이다. 유효보폭 계수 a 의 개념은 슬래브를 구성하는 콘크리트가 완전히 선형 거동한다는 가정에 기초하고 있다. 접합부에서 실제 슬래브의 회전은 기둥 근처에서 가장 크고 기둥에서 멀어질수록 점점 작아지는 현상을 보인다. 이러한 슬래브의 거동을 전체 폭에 대하여 접합부 중심과 동일한 회전각을 가지며 실제 슬래브 모멘트와 등가의 모멘트를 전달하는 것으로 가정한 가상의 부재를 유효보라 하며 이때 유효보의 폭을 유효보폭이라 한다. 그림 3에 유효보폭법의 개념도를 나타내었다.

슬래브를 하나의 유효보로 모델링할 때, 유효보의 깊이는 슬래브의 두께를 그대로 사용하므로 유효보의 폭을 결정하

〈표 1〉 유효보폭 계수에 대한 기존의 연구

| Investigator | Date | Type of study | Geometrical parameter | | |
|-----------------------------|-------------|-----------------------|-----------------------|----------|----------|
| | | | Connection | Column | Slab |
| Aalami | 1972 | Finite difference | INT | S | R |
| Mehrain & Aalami | 1974 | Finite element | INT | S | R |
| Pecknold | 1975 | Levy analysis | INT | R | R |
| Allen & Darvall | 1977 | Levy analysis | INT | R | R |
| Fraser | 1983 | Finite element | ALL | R | R |
| Milija & Steven | 1985 | Levy analysis | INT | R | R |
| Banchik | 1987 | Finite element | ALL | S | R |
| Fariborz & Rainer & Mehrdad | 1991 | Finite element | PER | S | R |
| Luo & Durrani | 1995 | Modified equation | INT PER | R | R |
| Choi & Song | 2001 | Finite element | ALL | R | R |

S/R: Square/Rectangle

PER: Edge connection with bending perpendicular to the edge

INT: Interior connection

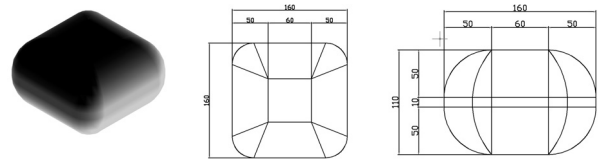
ALL: All connection

는 계수가 해석모델의 정확도를 결정하는 중요한 요소가 된다. 표 1은 유효보폭 계수에 관한 기존연구를 나타내며 본 연구에서는 유효보폭 계수 결정에 있어 표 1에 제시된 기존의 제안식 중 Choi & Song⁽⁴⁾이 제안한 식을 사용하였다. 이러한 유효보폭법은 등가의 강도에 초점을 맞추어 등가모델을 개발하기 때문에 원래의 중공슬래브 모델과 동적특성이 달라질 수 있을 것이다. 그러나 현실적으로 중공슬래브를 간편하게 비선형해석할 수 있는 방법이 없으므로 실무에서도 널리 사용되는 유효보폭법을 사용하여 등가모델을 개발하였다.

3. 유효보폭법을 이용한 등가모델 개발

3.1 예제구조물의 개요

본 연구에서는 2방향 중공슬래브가 사용된 건물의 내진 성능을 평가하기 위하여 그림 4와 같은 중공불을 포함한 중공슬래브를 사용하는 5층의 철근콘크리트 모델을 예제구조물로 선정하였고 이를 그림 5에 나타내었다. 슬래브의 두께는 210mm이고 콘크리트의 강도는 24MPa, 철근의 강도는 400MPa를 사용하였다. 경간 길이는 6m이고 층고는 3m로 설정하였다. 구조물의 용도는 사무실로 가정하여 고정하중은 7.9kN/m²로 활하중은 2.5kN/m²로 설정하였으며 이때, 고정하중에는 경량칸막이의 하중이 포함되어 있다. 예제 구조물은 건설교통부 고시 건축구조설계기준(KBC 2005)⁽⁵⁾으로 설계하였으며 설계시 프로그램은 MIDAS/Gen을 사용하였다. 모든 층에서 같은 슬래브를 사용하였으며 기둥은 내외부를 구별하여 설계하였다.

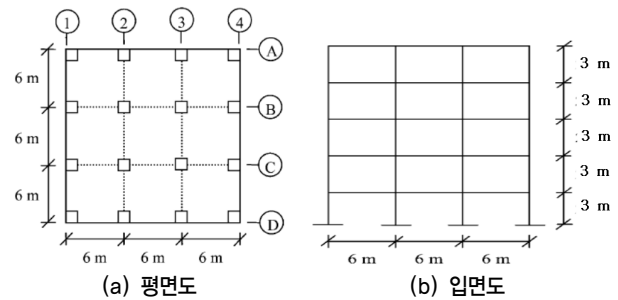


(a) 3차원형상

(b) 평면

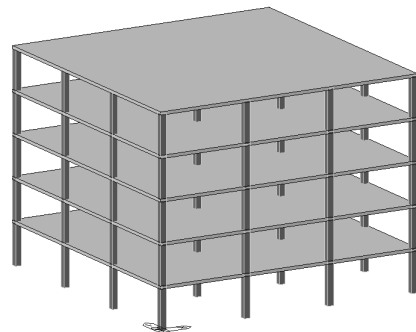
(c) 입면

〈그림 4〉 중공불 형상



(a) 평면도

(b) 입면도

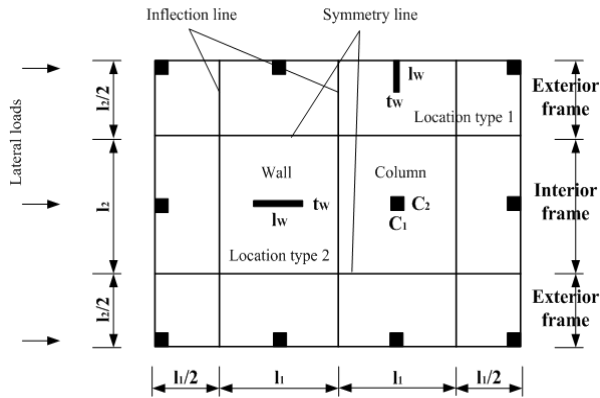


(c) 3차원형상

〈그림 5〉 예제구조물

3.2 유효보폭법을 이용한 예제구조물의 등가모델 개발

예제구조물을 위한 등가강성과 질량을 가진 등가플레이



〈그림 6〉 슬래브의 분할

트모델의 개발과정은 기존연구⁽¹⁾에 상세히 기술되었으므로 본 논문에서는 지면관계상 생략을 하고 등가플레이트모델에서 등가 골조해석 모델을 개발하는 과정에 대하여 설명한다. 본 연구에서는 기존의 여러 제안식 중 가장 최근에 제안된 Choi & Song⁽⁴⁾의 연구에서 제시된 방법을 채택하여 등가플레이트 모델의 등가골조모델을 작성하였다.

이를 위하여 우선 그림 6과 같이 대칭선(Symmetry Line)을 따라 무량판 슬래브를 분할하고 슬래브 중심간 거리를 슬래브 폭 l_2 로 정의한다. 분할된 내·외부골조의 변곡선(Inflection Line)을 따라 슬래브를 재분할하여 슬래브의 길이 l_1 을 결정한다. 분할된 l_1, l_2 를 이용한 유효보폭 계수 α 를 산정하는 제안식을 식 (2)-(5)에 나타내었다.

$$\text{내부} : \alpha = \frac{\gamma_i}{l_2} (4.5c_1 + 0.14l_1 + 0.12l_2) \quad (2)$$

$$(\gamma_i = 0.85 + 0.15c_2/c_1)$$

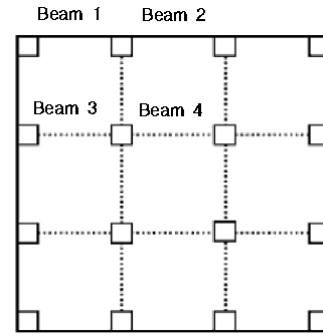
$$\text{외부} : \alpha = \frac{\gamma_e}{l_2} (3.0c_1 + 0.07l_1 + 0.06l_2) \quad (3)$$

$$(\gamma_e = 0.70 + 0.30c_2/c_1)$$

$$l_{2(\text{span})}' = \frac{l_{2(\text{left})}' + l_{2(\text{right})}'}{2} \quad (4)$$

$$l_{2(\text{span})}' = \frac{3l_{2(\text{cor})}' + 2l_{2(\text{par})}'}{5} \quad (5)$$

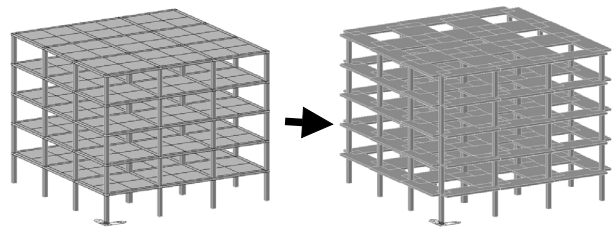
식 (2), (3)에서 c_1, c_2, l_1, l_2 는 기둥, 슬래브의 기하학적 형상을 나타내는 변수이고, γ_i, γ_e 는 기둥의 변장비에 따른 보정계수이다. 이러한 접합부의 유효보폭은 대부분 하나의 경간에 있어 일정한 강성을 갖지 않기 때문에 이를 범용 프로그램에 그대로 적용하는 것은 매우 번거로운 일이다. 그래서 접합부 유효보폭을 경간의 유효보폭으로 변환이 필요하다. 여기서 코너 접합부와 연결되지 않은 경간의 유효보폭은 식 (4)와 같이 경간을 이루는 각 접합부 유효보폭을 산



〈그림 7〉 유효보 구분

〈표 2〉 유효보 크기

| 유효보 | 크기 (cm) |
|--------|----------|
| Beam 1 | 210 × 21 |
| Beam 2 | 228 × 21 |
| Beam 3 | 354 × 21 |
| Beam 4 | 381 × 21 |



(a) 등가 플레이트 원형모델

(b) 유효보폭법 등가모델

〈그림 8〉 등가모델 생성

술 평균하고, 코너 접합부와 연결되는 경간의 유효보폭은 식 (5)와 같이 코너 접합부 유효보폭의 60% 그리고 하중방향과 수평인 단부 접합부 유효보폭의 40%를 취하여 구하였다. 여기서, $l_{2(\text{left})}', l_{2(\text{right})}'$ 는 경간 양쪽의 접합부 유효보폭이고 $l_{2(\text{cor})}', l_{2(\text{par})}'$ 은 코너 접합부와 하중방향과 수평인 단부 접합부의 유효보폭이며, $l_{2(\text{span})}'$ 은 경간의 유효보폭이다.

위에 설명한 유효보폭법을 본 연구에서 선정한 예제 구조물에 직접 적용하여 유효보폭 계수를 구하고, 각 계수에 의한 경간의 유효보폭을 산정하여 예제 구조물 전체의 등가모델을 모델링하였다. 평면이 대칭형이므로 구조물 전체에서 모두 4가지 크기의 유효보를 가지며 이를 그림 7에 나타내었다. 그리고 산정한 유효보의 크기는 표 2에 정리하였다.

모델링시 실제 기둥강성과 유효보의 강성을 이용하여 3차원 모델링을 수행한다. 중공슬래브의 경우는 앞서 구한 등가강성을 유효보의 속성에 부여하고 유효보의 크기는 표 2를 따른다. 3차원 골조 모델에 슬래브의 강막효과를 부여하고 범용 구조해석프로그램을 이용하여 해석을 수행하였다. 생성된 등가모델을 그림 8에 나타내었다.

4. 등기모델을 이용한 2방향 중공슬래브의 비선형 지진해석

4.1 비선형 정적해석

동일한 슬래브 두께를 가지는 2방향 중공슬래브 구조물과 일반 플랫 플레이트 구조물을 각각 전술한 등가화 과정을 거쳐서 해석모델을 생성한 후 비선형 정적해석(Pushover Analysis)을 수행하였다. 해석시 P-Δ효과를 고려하였고 하중의 형태는 1차 모드형상에 비례하도록 하였으며 최대 25cm까지 횡변위가 발생하도록 하였다. 각 부재의 비선형 이력특성은 그림 9에 나타낸 FEMA-356⁽⁶⁾의 제안식을 따랐다.

구조물의 지진응답은 1차 진동모드에 의하여 주로 좌우된다. 특히 본 연구에서 선정한 예제구조물과 같은 중저층 구조물에서는 더욱 그러하다. 따라서 두 구조물의 1차모드 고유주기를 비교하여 표 3에 나타내었다. 표를 보면 중공슬래브를 사용한 모델이 플랫 플레이트 구조물에 비하여 고유주기가 짧게 나타나는데 이는 중공볼에 의한 슬래브 휨강성의 저감보다 자중의 저감이 더 크기 때문인 것으로 판단된다. 실제로 스패인 6m인 경우에 2방향 중공슬래브 구조물을 일반 플랫 플레이트 구조물과 비교한 결과, 휨강성은 92% 수준이고 전체 구조물의 자중은 11%가 감소하였다.

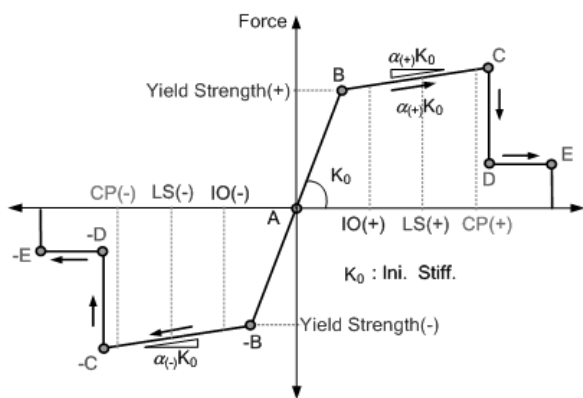
예제구조물과 같은 다자유도 구조물은 자유도의 수가 많으므로 다자유도 구조물의 거동에서 하나의 힘-변위 관계를 정의하기가 어려우며 따라서 능력곡선을 구하기도 쉽지 않은 문제가 있다. 그러므로 다자유도 구조물에 대한 비탄성 정적해석을 수행하여 얻은 결과로부터 하나의 힘과 하나의 변위를 도출하는 것이 가장 중요한 일이다. 다자유도 구조물의 거동을 나타내기 위하여 가장 흔히 사용하는 방법은

비탄성 정적해석을 통하여 얻게 되는 최상층의 변위와 밀면 전단력을 사용하여 힘-변위 관계를 사용하여 능력곡선을 결정하는 방법이다.⁽⁷⁾

구조물이 탄성거동을 하는 경우에는 정적거동에서 하중의 분포가 일정하면 하중의 크기가 증가하더라도 변형형상이 항상 일정한 형태를 가지게 되므로 이 방법을 큰 문제점을 가지고 있지 않지만 비탄성 거동을 하게 되면 하중이 증가함에 따라서 소성거동으로 인하여 구조물의 변형형상이 수시로 변하게 되므로 이 방법이 상당한 문제점을 가지게 된다. 그러나 다자유도 구조물의 거동으로부터 하나의 힘-변위 관계를 정확하게 도출하는 것이 이론적으로 불가능하며 이 방법으로 매우 쉽게 힘-변위 관계를 근사적으로 구할 수 있으므로 많은 경우에 현실적으로 이 방법이 흔히 사용되고 있다.

그러므로 단조증가하중에 대한 비탄성 정적해석을 수행한 결과로서 최상층의 변위와 밀면전단력을 이용하여 비탄성 힘-변위 곡선을 구하였다. 그림 10에서 볼 수 있듯이 일반 플랫 플레이트 구조물과 2방향 중공슬래브 구조물이 거의 비슷한 수준의 힘-변위 관계를 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 한계변위는 20cm내외, 최대 밀면전단력은 2500kN 수준으로 두 구조물이 비슷한 값을 나타내었다.

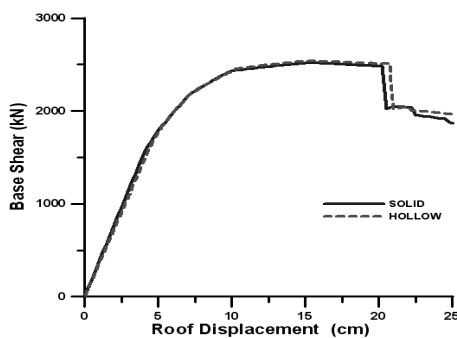
힘-변위 관계를 1차 모드형상벡터와 모두참여계수, 유효 질량을 고려하여 능력곡선으로 변환하였고 이를 그림 11에



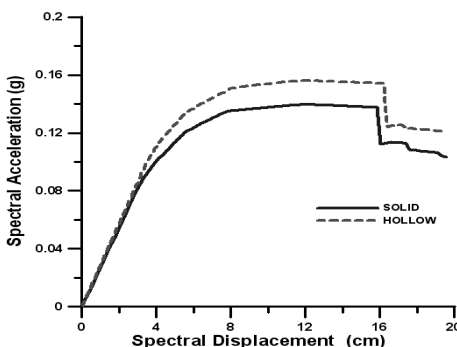
〈그림 9〉 FEMA-356의 부재 비선형 이력골조

〈표 3〉 1차모드 고유주기 비교

| | |
|----------------|---------------|
| 일반 플랫 플레이트 구조물 | 2방향 중공슬래브 구조물 |
| 1.1860 (sec) | 1.1584 (sec) |



〈그림 10〉 힘-변위 관계



〈그림 11〉 능력곡선 비교

나타내었다. 능력곡선 비교결과, 2방향 중공슬래브 구조물이 일반 플랫 플레이트 구조물에 비해 동일한 스펙트럴 변위에서 더 큰 스펙트럴 가속도 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 중공부에 의한 자중의 감소와 휨강성의 저하로 인한 복합적인 영향 때문인 것으로 판단된다.

이러한 능력 곡선의 차이가 지진거동에 있어 어떤 차이가 있는지 성능점 산정과 부재력 비교 등을 통하여 확인하였다. 요구스펙트럼으로는 설계에서 사용한 KBC 2005의 내진설계 기준에서 제시하는 설계스펙트럼을 사용하였다. 기준에서 제시하는 설계스펙트럼은 2400년 재현주기 지진의 2/3 수준을 사용하므로 발생 가능한 최대 크기의 지진을 고려하기 위하여 내진설계 기준에서 제시하는 수준(DE: Design Earthquake)과 2400년 재현주기에 해당하는 수준(MCE : Maximum Considered Earthquake), 두 가지로 조정된 스펙트럼을 요구스펙트럼으로 사용하였다. 비선형 정적해석의 결과로 구한 능력곡선을 이산화하고 앞서 제시한 두 가지 요구스펙트럼을 이용하여 성능점을 구하였다. 이때, 성능점 산정방법은 변위-연성비 관계에 의한 방법을 사용하였고 이를 그림 12에 나타내었다. 2방향 중공슬래브 사용유무에 따

〈표 4〉 요구연성도 비교

| 슬래브 시스템 | 항복점 | | 성능점 | | | 요구 연성도 (Du/Dy) |
|----------------|---------|--------|--------|---------|--------|----------------|
| | Dy (cm) | Ay (g) | 요구스펙트럼 | Du (cm) | Au (g) | |
| 일반 플랫 플레이트 구조물 | 4.43 | 0.1279 | DE | 5.07 | 0.1297 | 1.14 |
| | | | MCE | 7.49 | 0.1311 | 1.73 |
| 2방향 중공슬래브 구조물 | 4.72 | 0.1418 | DE | 4.98 | 0.1428 | 1.06 |
| | | | MCE | 7.50 | 0.1452 | 1.59 |

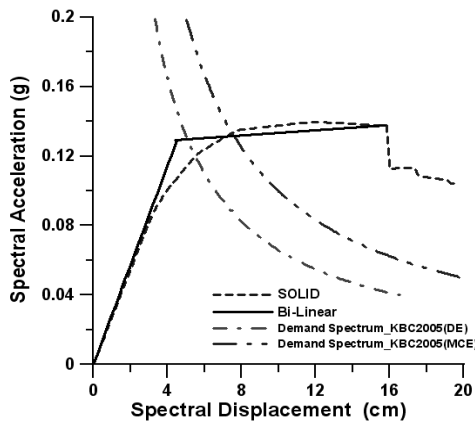
른 두 구조물의 연성능력을 비교하기 위해 성능점을 이용하여 요구연성도(ductility demand)를 구하여 비교하였고 이를 표 4에 나타내었다. 성능점은 지진이 발생하였을 경우에 구조물의 최대응답을 나타낸다고 볼 수 있으므로 성능점을 구조물의 극한점으로 하고 이 극한점과 이산화한 능력곡선에서의 항복점을 이용하여 요구연성도를 산정하였다.

4.2 비선형 동적해석

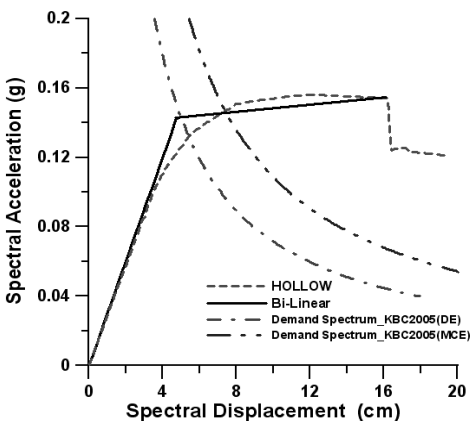
지진에 의한 구조물의 비탄성 거동을 파악하기 위하여 여러 가지의 지진해석방법이 사용되고 있는데 그 중에서 가장 정확한 응답을 주는 것은 직접적분법에 의한 비선형 시간이력해석(Nonlinear Time History Analysis)이라고 알려져 있다. 본 연구에서는 등가모델을 이용하여 직접적분법(Newmark 법)에 의한 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 요소의 파괴는 보 부재일 경우 오직 휨파괴만을 고려하고 기둥부재일 경우 좌굴과 휨파괴를 함께 고려하였으며, 구조물의 감쇠비는 5%로 가정하였다.

비선형 시간이력해석을 위한 입력지진으로는 El Centro 지진(1940)을 사용하였으며, KBC 2005의 내진설계 기준에서 제시하는 설계응답스펙트럼을 바탕으로 크기를 조정하였다. 이때, 성능점 산정에 사용했던 요구스펙트럼과 같이 내진설계 수준(DE)과 2400년 재현주기 수준(MCE) 두 가지로 조정하였다. 두 구조물의 1차 고유진동주기를 고려하여 구조물의 동적거동에 가장 큰 영향을 주는 진동수대역에서 설계응답스펙트럼의 특성이 잘 나타날 수 있도록 지진하중을 조정하였다.

2방향 중공슬래브의 내진성능을 검토하기 위하여 비선형 시간이력해석을 수행한 후 최상층의 변위, 속도, 가속도 그리고 밀면전단력에 대한 시간이력을 일반 플랫 플레이트 구조물과 비교하여 그림 13-16에 나타내었다. 그리고 최상층의 변위와 밀면전단력 관계를 그래프로 나타내어 구조물의 비선형 거동을 확인하고 시간이력의 결과에서 최대값과 RMS(Root Mean Square)값을 표 5와 6에 나타내었다.

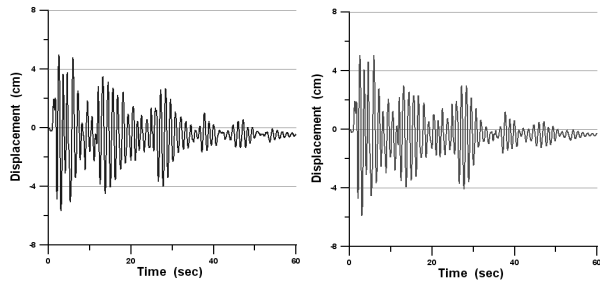


(a) 일반 플랫 플레이트 구조물

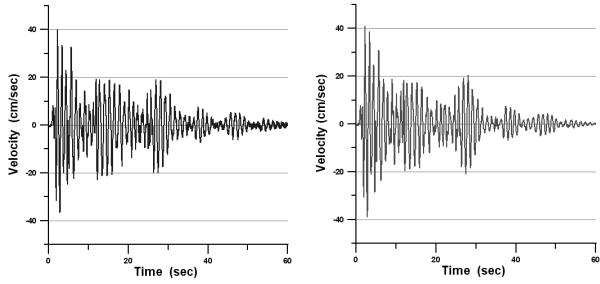


(b) 2방향 중공슬래브 구조물

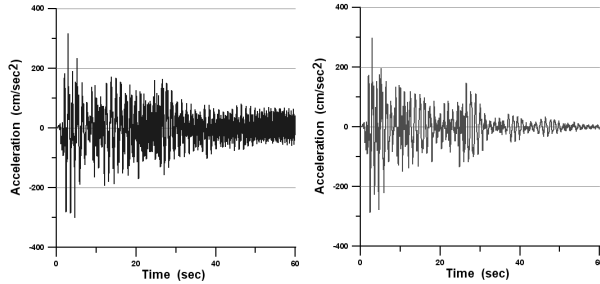
〈그림 12〉 성능점 산정



(i) 일반 플랫 플레이트 구조물 (ii) 2방향 중공슬래브 구조물
(a) 변위 시간이력

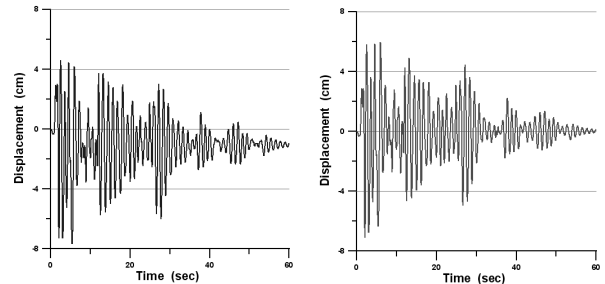


(i) 일반 플랫 플레이트 구조물 (ii) 2방향 중공슬래브 구조물
(b) 속도 시간이력

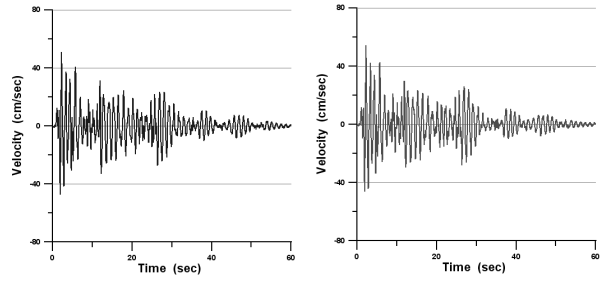


(i) 일반 플랫 플레이트 구조물 (ii) 2방향 중공슬래브 구조물
(c) 가속도 시간이력

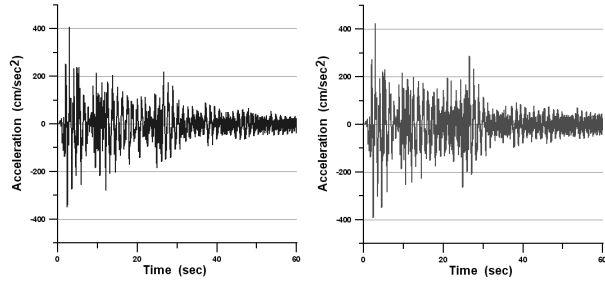
〈그림 13〉 El Centro_DE 입력하중에 의한 시간이력



(i) 일반 플랫 플레이트 구조물 (ii) 2방향 중공슬래브 구조물
(a) 변위 시간이력



(i) 일반 플랫 플레이트 구조물 (ii) 2방향 중공슬래브 구조물
(b) 속도 시간이력

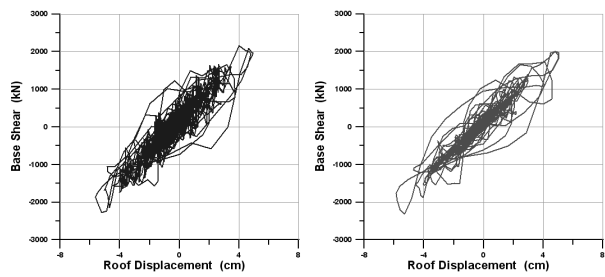


(i) 일반 플랫 플레이트 구조물 (ii) 2방향 중공슬래브 구조물
(c) 가속도 시간이력

〈그림 14〉 El Centro_MCE 입력하중에 의한 시간이력

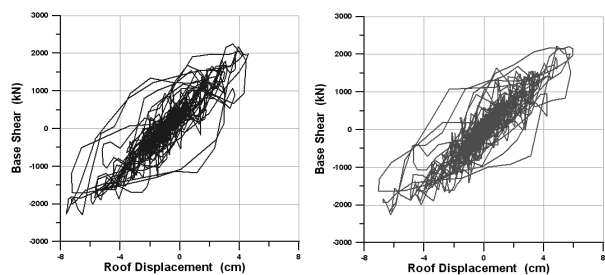
해석의 결과에서 2방향 중공슬래브 구조물의 변위, 속도, 가속도 응답이 일반플랫플레이트 구조물과 비교하였을 때, 입력지진하중에 따라 약간 커지거나 작아지는 등 다소 차이가 있으나 그 차이가 극히 작아 2방향 중공슬래브 구조물이 일반 플랫 플레이트 구조물과 비슷한 수준의 지진거동을 하는 것을 확인할 수 있었다. 즉 2방향 중공슬래브의 사용이 지진이 발생하였을 때 구조물 전체의 붕괴에 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인하였다.

비선형 시간이력해석의 결과로서 최상층 변위와 밀면전단력의 최대값을 이용해 비선형 정적해석에서와 같이 성능점을 산정하였다. 물론 비선형 정적해석에서와는 달리 최상층 변위의 최대값과 밀면전단력의 최대값이 같은 해석시간에서 발생하지는 않는다. 그러나 해석시간별로 검토해본 결과 거의 비슷한 시간에서 발생하는 것을 확인하였다. 이 최상층 변위의 최대값과 밀면전단력의 최대값을 비선형 정적해석에서와 같이 능력곡선으로 변환하여 성능점을 찾았다.



(a) 일반 플랫 플레이트 구조물 (b) 2방향 중공슬래브 구조물

〈그림 15〉 El Centro_DE 입력하중에 의한 힘-변위 관계



(a) 일반 플랫 플레이트 구조물 (b) 2방향 중공슬래브 구조물

〈그림 16〉 El Centro_MCE 입력하중에 의한 힘-변위 관계

〈표 5〉 EI Centro_DE 입력하중에 의한 시간이력결과 비교

| | | 일반플랫플레이트 구조물(a) | 2방향중공슬래브 구조물(b) | (b)/(a) |
|----------------------------|------|-----------------|-----------------|---------|
| 변위 (cm) | Peak | 5.6284 | 5.8558 | 1.04 |
| | RMS | 1.5220 | 1.4789 | 0.97 |
| 속도 (cm/sec) | Peak | 40.05 | 40.94 | 1.02 |
| | RMS | 8.24 | 8.27 | 1.00 |
| 가속도 (cm/sec ²) | Peak | 317.20 | 296.90 | 0.94 |
| | RMS | 61.26 | 51.36 | 0.84 |
| 밀면전단력 (kN) | Peak | 2275 | 2281 | 1.00 |
| | RMS | 612 | 545 | 0.89 |

〈표 6〉 EI Centro_MCE 입력하중에 의한 시간이력결과 비교

| | | 일반플랫플레이트 구조물(a) | 2방향중공슬래브 구조물(b) | (b)/(a) |
|----------------------------|------|-----------------|-----------------|---------|
| 변위 (cm) | Peak | 7.6402 | 7.0650 | 0.92 |
| | RMS | 2.0870 | 1.8235 | 0.87 |
| 속도 (cm/sec) | Peak | 50.83 | 54.26 | 1.07 |
| | RMS | 10.32 | 10.52 | 1.02 |
| 가속도 (cm/sec ²) | Peak | 408.03 | 424.34 | 1.04 |
| | RMS | 66.83 | 73.87 | 1.11 |
| 밀면전단력 (kN) | Peak | 2310 | 2266 | 0.98 |
| | RMS | 713 | 690 | 0.97 |

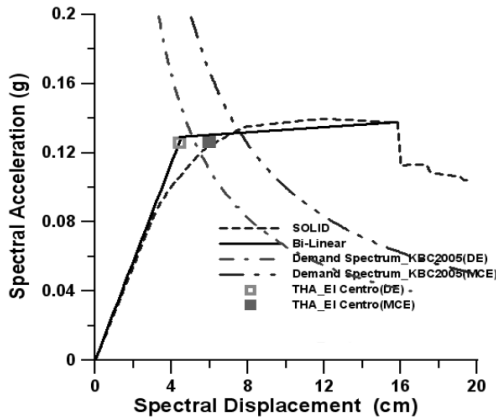
그리고 이 성능점을 비선형 정적해석에서 산정한 성능점과 함께 그림 17에 나타내었다.

그림 17에서 속이 비어있는 점이 내진설계 수준의 입력 지진에 의한 결과를 나타내고 속이 찬 점이 2400년 재현주기 수준의 입력지진에 의한 결과를 나타낸다. 결과에서 확인할 수 있듯이 비선형 정적해석에 의한 성능점과 비선형 시간이력해석에 의한 성능점이 다소 차이를 나타내고 있다. 스펙트럴 가속도의 값은 거의 일치하지만 스펙트럴 변위의 값이 많은 차이를 나타내고 있다.

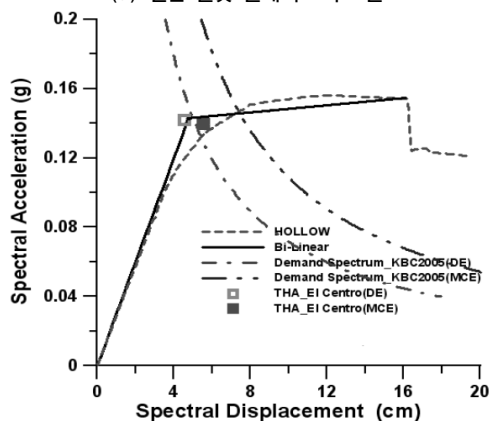
5. 결론 및 추후연구과제

본 논문에서는 고층 공동주택의 바닥판 소음, 진동 문제의 해결과 건물의 효율적인 평면 공간 활용을 위하여 점점 더 그 사용성이 증가 추세인 2방향 중공슬래브 구조시스템의 내진성능을 검토해보았다. 이를 위하여 기존에 제안된 등가플레이트 모델과 유효보폭법을 이용한 비선형 해석모델을 구성하였다. 그리고 비선형 정적해석과 비선형 동적해석을 수행하여 지진이 발생하였을 때 2방향 중공슬래브 구조시스템이 얼마나 위험한 수준인지 또는 지진응답에 있어 어떤 장점을 가지는가를 검토하였다. 그로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 고유치 해석 결과 중공볼의 영향으로 인한 슬래브 휨강성 저하보다 자중의 감소가 크기 때문에 2방향 중공슬래브 구조물이 일반 플랫 플레이트 구조물보다 다소 짧은 1차 모드 고유주기를 가진다.
2. 두 구조물의 비선형 정적해석 결과를 통해서 최상층의 변위와 밀면전단력 관계에 의한 능력곡선은 중공볼의 사용 유무에 상관없이 비슷한 수준을 나타냄을 확인하였다. 그러나 이를 등가 단자유도의 스펙트럴 변위와 스펙트럴 가속도로 변환하였을 때 2방향 중공슬래브 구조물이 동일한 스펙트럴 변위에서 일반 플랫 플레이트 구조물에 비해 더 큰 스펙트럴 가속도 값을 가지는 것을 확인하였다.
3. KBC 2500 내진설계 수준과 2400년 재현주기 수준의 두 요구스펙트럼을 이용한 성능점 산정을 통한 요구연성도 비교를 통해 2방향 중공슬래브 구조물이 일반 플랫 플레이트 구조물에 비해 연성도가 낮지 않음을 확인하였다. 또한 성능점에서의 축력을 비교해본 결과, 2방향 중공슬래브 구조물이 자중의 감소 영향으로 인해 기둥의 축력 부담을 줄이는 효과를 나타내었다.



(a) 일반 플랫 플레이트 구조물



(b) 2방향 중공슬래브 구조물

〈그림 17〉 성능점 비교

4. 두 입력지진을 이용한 비선형 시간이력 해석을 수행하여 두 구조물의 변위, 속도, 가속도, 밀면전단력 이력을 비교한 결과 두 구조물이 비슷한 수준의 이력을 나타내는 것을 확인하였다. 이로써 지진이 발생하였을 때 2방향 중공슬래브를 사용한 구조물이 동일한 슬래브 두께의 일반 플랫 플레이트 구조물에 비하여 위험하지 않음을 확인할 수 있었다.

본 연구는 특정형태의 중공볼을 가지는 2방향 중공슬래브에 대하여 수행되었기 때문에 일반적인 2방향 중공슬래브를 대표하지는 못한다. 구조물의 지진거동 평가 시 중공볼에 따라서 2방향 중공슬래브 구조물의 강성과 질량이 변하여 그에 따른 구조물의 지진거동이 달라질 것이기 때문에 다양한 중공볼의 형상과 중공률을 고려한 연구가 필요할 것이다. 또한 다양한 입력지진 이용한 비선형 시간이력 해석과 취약도 해석을 통하여 지진 발생시 위험수준을 더욱 정확히 검토하는 것이 필요하겠다.

감사의 글

이 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2010-0010426)을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 박현재, 김민균, 이동근, 박용구, 김현수, “모서리가 둥근 직육면체 중공볼을 가지는 2방향 중공슬래브의 효율적인 진동해석,” 한국전산구조공학회 논문집, 제22권 제5호, pp.421-428, 2009.
2. 김민균, 박현재, 이동근, 황현식, 김현수, “보행하중에 대한 2방향 중공슬래브의 진동성능 평가,” 한국지진공학회 논문집, 제13권 제5호, 11-21, 2010.
3. 한상환, 박영미, “수평하중을 받는 플랫 플레이트 슬래브 해석을 위한 수정된 등가골조모델,” 한국콘크리트학회 논문집, 제17권 제3호, 419-426, 2005.
4. Choi, J.W., Song, J.G., and Lee, S.G., “Effective Beam Width Coefficient for Flat-Plate Structure under Lateral loads,” Architectural Institute of Korea, Vol. 17, No. 6, 77-86, 2001.
5. 대한건축학회, 건축구조설계기준(KBC 2005), 2005.
6. FEMA, Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of Buildings(FEMA-356), Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 2000.
7. 최원호, 이동근, “대표응답을 이용한 건축구조물의 비선형 지진응답 분석 및 내진성능평가,” 한국지진공학회 논문집, 제5권 제6호, 65-76, 2001.