

모서리가 둥근 직육면체 중공볼을 가지는 2방향 중공슬래브의 효율적인 진동해석

Efficient Vibration Analysis of a Biaxial Hollow Slab Having Hexahedron Balls with Rounded Corner

박 현 재* 김 민 균* 이 동 근** 박 용 구*** 김 현 수†
Park, Hyun-Jae Kim, Min-Gyun Lee, Dong-Guen Park, Yong-Koo Kim, Hyun-Su
(논문접수일 : 2009년 5월 20일 ; 심사종료일 : 2009년 9월 4일)

요 지

본 연구에서는 2방향 중공슬래브의 효율적인 진동해석을 위하여 등가의 플레이트 모델을 개발하였다. 이를 위하여 3차원 입체요소 중공슬래브 모델에 대응하는 플레이트 슬래브 모델의 등가 질량과 강성을 산출하였다. 개발된 등가 플레이트 모델의 정확성과 효율성을 검증하기 위하여 예제해석을 수행하였다. 해석결과 등가 플레이트모델의 고유진동수는 3차원 입체요소모델과 비교하여 매우 정확한 것을 확인하였다. 또한 보행하중이 가해지는 2방향 중공슬래브에 대해 등가플레이트 모델과 3차원 입체요소 모델을 사용하여 시간이력해석을 수행한 후 그 결과를 비교하였다. 해석결과 등가의 플레이트 모델이 해석시간을 상당히 줄이면서도 3차원 입체요소 모델과 거의 일치하는 결과를 나타내는 것을 확인하였다.

핵심어 : 2방향 중공슬래브, 등가플레이트요소, 바닥진동, 보행하중, 시간이력해석

Abstract

In this study, an equivalent plate element model has been developed for an efficient vibration analysis of a biaxial hollow slab. To this end, equivalent mass and stiffness of equivalent plate element models corresponding to solid element models of example biaxial hollow slabs were calculated. To verify the efficiency and accuracy of the equivalent plate element models, structural analyses of example structures were performed. Analytical results showed that the natural frequencies of the equivalent plate element models were very close to those of the solid element models. Time history analyses of example biaxial hollow slabs subjected to walking load were conducted using the equivalent plate element models and the solid element models, and the results were compared. It could be seen based on the analytical results that the equivalent plate element model could provide very accurate results compared to the solid element model with significantly reduced analysis time.

Keywords : biaxial hollow slab, equivalent plate element, floor vibration, walking load, time history analysis

1. 서 론

최근 국내에서는 층간소음 감소를 위하여 건설교통부에서 '바닥충격음 차단성능 기준'이 제정되어 슬래브 차음성능에 대한 관심이 더욱 커지고 있다(우운택 등, 2000; 박강근 등, 2006). 이에 대응하여 슬래브 두께 증가가 요구되고 있다. 그러나 이러한 슬래브의 두께 증가는 자중을 증가시키고 지

진하중이 증가하게 되므로 구조적인 문제를 유발할 수도 있다. 슬래브 진동의 문제는 장스팬 구조물에서 주로 발생하게 되는데, 근래에는 건축물의 효율적인 공간 활용을 위하여 장스팬의 바닥판 시스템이 많이 사용되고 있다. 장스팬 바닥판 시스템이 적용된 구조물의 경우에는 슬래브 자중이 크기 때문에 작은 보가 필요하고, 이로 인해 층고가 커지고 공사가 장기화되는 문제점이 있다(박칠림 등, 1995). 그래서 이러

† 책임저자, 정회원 · 선문대학교 건축학부 전임강사
Tel: 041-530-2315 ; Fax: 041-530-2839
E-mail: hskim72@sunmoon.ac.kr

* 성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정

** 종신회원 · 성균관대학교 건축공학과 교수

*** 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2009년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2010년 2월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

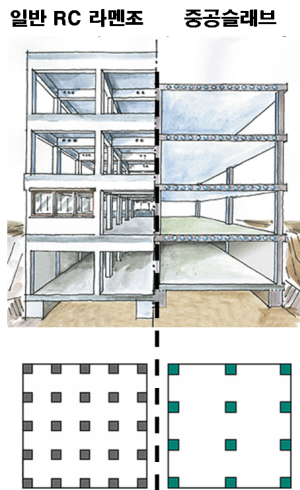


그림 1 일반 RC 라멘조와 중공슬래브 시스템의 비교

한 문제점들을 해결하기 위하여 다양한 바닥판 시스템의 개발이 진행되어 왔는데, 그림 1에 나타난 중공슬래브는 이러한 바닥판 시스템중의 하나이다.

중공슬래브 시스템은 슬래브에 중공부를 두어 슬래브의 자중을 저감시키면서도 슬래브의 두께를 크게하여 휨강성을 향상시킨 슬래브 시스템으로 토목구조물의 경우 교량 자중저감을 위하여 교량상판에 적용되고 건축구조물의 경우에는 장스팬의 바닥판이 요구되는 구조물에 적용되고 있다(손철수, 2000). 같은 양의 재료를 사용하였을 때 속이 꽉 찬 것보다 비어있는 것이 슬래브의 두께를 키울 수 있고, 그에 따라 바닥판의 차움성능을 향상시킬 수 있으며, 단면 2차모멘트를 크게하여 속이 꽉 찬 상태에 비하여 휨 강성의 증가(김상식, 2007)를 도모한다는 개념이다. 기존에는 한 방향으로 일직선상의 중공관을 매설하는 1방향 중공 슬래브(김기철 등, 2007)가 주로 사용되었다. 그러나 최근 2방향 중공슬래브의 구조적 이점이 검증되면서 2방향 중공 슬래브의 사용이 증가하고 있는 추세이다. 2방향 중공슬래브는 독립된 중공볼을 일정한 간격으로 매입하는 방법으로 자중을 충분히 줄일 수 있으면서 큰 내력(load capacity)과 연성(flexibility)을 가질 수 있으며 1방향 중공 슬래브와 달리 어느 방향으로도 효과적으로 하중 전달이 가능하다.

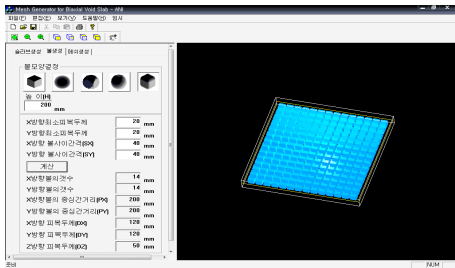
근래에 이러한 2방향 중공슬래브의 사용이 증가함에 따라 보다 효율적이고 효과적인 2방향 중공슬래브의 해석과 설계가 필요하게 되었다. 2방향 중공슬래브의 바닥진동해석을 정확하게 하기 위해서는 중공슬래브에 매입되는 중공볼의 형상이 슬래브의 동적 거동에 미치는 영향을 고려할 수 있는 유한요소 해석모델을 사용해야 한다. 이를 위해서는 일반적으로 3차원 입체요소(solid 요소)를 사용하여 모형화하는 방법이 적용되는데, 이 경우에는 절점수와 요소의 증가로 인하여

많은 시간과 노력이 요구되며, 어느 규모 이상에서는 컴퓨터 메모리의 제한으로 모델링 자체가 어려워질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 2방향 중공슬래브의 효율적인 진동해석을 위한 등가의 플레이트 모델을 개발하고자 한다. 슬래브의 등가 모델링에 관한 기존의 연구에서는 주로 황하중에 대한 건물의 거동에서 슬래브의 휨강성이 미치는 영향을 고려하기 위한 내용이 주를 이루었다(최정욱 등, 2002; 한상환 등, 2005). 본 연구에서는 주거용 건축물의 효율적인 바닥진동 해석(김태호 등, 2005)에 관한 기존의 연구를 바탕으로 2방향 중공슬래브의 진동해석을 위한 등가 플레이트 모델을 개발하였다. 이를 위하여 슬래브의 크기에 따른 등가의 강성비를 계산할 수 있는 공식을 유도하였다. 개발된 등가 플레이트 모델의 정확성을 검증하기 위하여 보행하중을 사용한 진동해석(최원호 등, 1999)을 수행하였고 해석결과를 3차원 입체요소를 사용한 유한요소 모델과 비교하여 보았다.

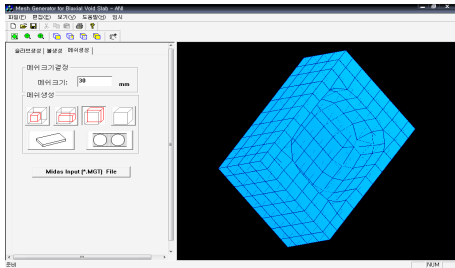
2. Solid 요소를 이용한 2방향 중공슬래브의 해석

2방향 중공슬래브의 정확한 해석을 위해서는 중공볼의 형상을 얼마나 실제와 같이 모델링하느냐가 중요하다. 그래야만 중공형상에 의한 슬래브의 동적 거동 특성의 변화를 잘 반영할 수 있기 때문이다. 이를 위하여 3차원 입체요소를 사용하여 중공슬래브를 모형화하였다. 이 때 메쉬의 크기가 작을수록 중공볼의 형상을 정확하게 표현할 수 있으며 더욱 정확한 해석이 이루어진다. 본 연구에서는 자체적으로 개발한 '메쉬 제너레이터' 프로그램을 사용하여 중공슬래브를 모델링하였고 해석은 MIDAS-GEN을 사용하여 수행하였다. 메쉬 제너레이터 프로그램을 사용하여, 그림 2와같이 슬래브 크기와 중공볼의 형상 및 배치간격 등을 입력하면 슬래브 내 중공볼의 배치형상을 확인할 수 있다. 그 이후 생성할 유한요소모델의 메쉬크기를 설정하면 생성된 유한요소모델의 형상을 자체 그래픽 뷰어로 확인할 수 있으며, 해석모델은 MIDAS 입력파일로 출력이 가능하다. 그림 3은 메쉬의 크기에 따른 중공볼의 단면 형상을 보여준다. 그림 3에서 보듯이 메쉬의 크기에 따라 중공볼 형상 표현의 정밀성에 차이가 나타난다. 이러한 차이는 해석에 있어 영향을 미치게 된다.

메쉬의 크기가 작을수록 동적거동을 정확하게 표현할 수 있지만 해석모델의 절점 및 요소수의 증가로 해석에 많은 시간이 소요되게 된다. 게다가 일정 범위 이상에서는 컴퓨터 메모리의 제한에 부딪혀 모델링이 불가능해진다. 본 연구에서는 펜티엄4 CPU@2.4GHz와 2GB 램 메모리를 가진 컴퓨터를 사용해서 해석을 수행하였는데, 이 컴퓨터로는 40mm의 메쉬크기로 두께 300mm의 중공 슬래브를 4m×4m 크기

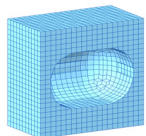


(a) 중공재 형상 및 배치방법 설정

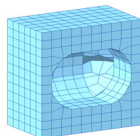


(b) 메쉬생성 확인 및 입력파일 생성

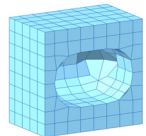
그림 2 메쉬 제너레이터 프로그램



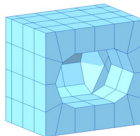
(a) 메쉬크기 10mm



(b) 메쉬크기 20mm



(c) 메쉬크기 30mm

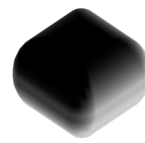


(d) 메쉬크기 40mm

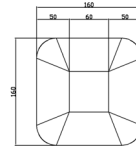
그림 3 메쉬 크기에 따른 중공볼 단면 형상

까지 해석이 가능했다. 해석모델의 크기가 4m×4m인 경우에 대칭경계조건을 사용하면 가로·세로 각 2배인 8m×8m 크기의 슬래브 해석이 가능하다. 중공슬래브 바닥판 자체만의 해석에도 이러한 제한이 있기 때문에 실제 중공슬래브가 사용된 구조물 전체의 해석은 일반적인 컴퓨터를 사용해서는 불가능하다. 그러므로 중공슬래브의 동적특성을 표현할 수 있는 등가의 플레이트 슬래브 모델의 개발이 필요하다. 3차원 입체요소 대신에 등가의 플레이트 모델을 사용하여 2방향 중공슬래브의 동적거동을 정확하게 표현할 수 있다면, 2방향 중공슬래브가 사용된 구조물 전체의 해석이 가능하고 해석시간도 확연히 줄일 수 있다. 2방향 중공슬래브의 진동해석을 위한 등가 플레이트 모델의 개발과정은 등가질량 및 등가강성을 유도하는 것이 핵심인데 이를 다음 절에서 상세히 설명한다.

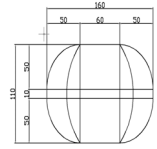
3. 등가 플레이트 모델의 개발



(a) 3d형상



(b) 평면



(c) (입면)

그림 4 모서리가 둥근 직육면체 중공볼 형상

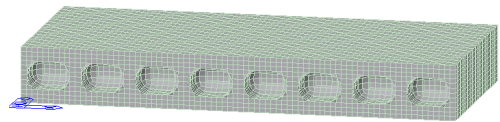


그림 5 3차원 입체요소를 사용한 중공슬래브 해석모델

3.1 예제 2방향 중공슬래브의 개요

본 연구진의 선행연구를 통하여 다양한 형상의 중공볼에 대해 그 특성을 검토하였다. 보통의 2방향 중공슬래브의 경우 구 형태를 가장 많이 사용하지만 이 경우보다 육면체 형상이 더 큰 중공부를 가질 수 있어 콘크리트의 물량을 더 많이 줄일 수 있다. 그러나 육면체의 형태에서는 각 모서리부에서 응력집중현상 및 상하면의 계면파괴가 발생하기 때문에 모서리 부분을 곡선화한 형태의 중공 형상을 선정하였다. 따라서 최종적으로 그림 4에 나타난 중공볼을 사용하여 예제 중공슬래브를 구성하였으며, 본 연구에 사용한 중공볼 형상이 일반적인 2방향 중공슬래브를 대표하지 않는다. 그림에 나타난 중공볼의 규격은 두께 210mm의 슬래브에 사용하기 위한 것이다. 슬래브에 사용한 콘크리트의 강도는 24Mpa로 하였으며 슬래브는 4번 단순지지된 것으로 가정하였고 슬래브의 크기는 1m~12m범위에서 변화시켜가면서 모형화하였다. 3차원 입체요소의 메쉬 크기는 중공볼의 형상을 비교적 잘 반영하면서 해석범위 내에서 모델링이 가능한 30mm로 하였으며, 중공볼 외단 사이의 간격은 40mm으로 하였다. 그림 5는 메쉬 제너레이터에 의해 모델링 된 2방향 중공슬래브의 단면을 나타낸다.

3.2. 등가질량의 유도

중공슬래브의 등가 질량 산출은 적용한 중공볼의 부피와 중공볼 하나가 들어가는 단위 슬래브의 부피를 이용한다. 단위 슬래브의 부피에서 중공볼의 부피가 차지하는 중공비를 구하고, 이 중공비를 이용하여 슬리트 슬래브의 밀도에 대응하는 중공슬래브의 밀도를 구한다. 이 과정을 그림 6에 나타내었다. 중공볼 외단 사이의 간격이 40mm이고, 중공볼 하나의 가로, 세로 길이가 각각 160mm이므로 200mm×200mm×210mm의 직육면체를 단위 슬래브로 설정하고 이에 대응하

표 1 2방향 중공슬래브의 밀도 산출

단위슬래브부피	중공볼의 부피	단위 중공슬래브의 부피	중공비	중공슬래브의 밀도
8400000mm ³	2083156.8mm ³	6316843.2mm ³	24.80%	1.8×10 ⁻³ kg/cm ²

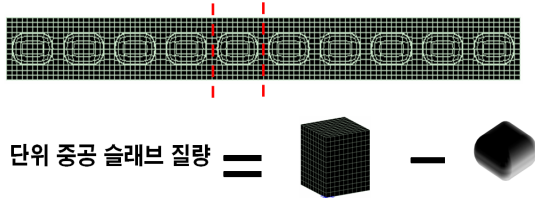
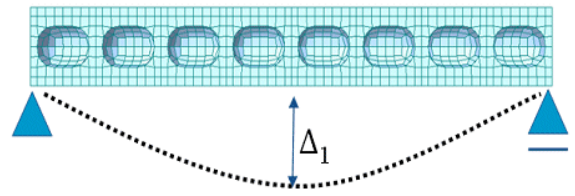
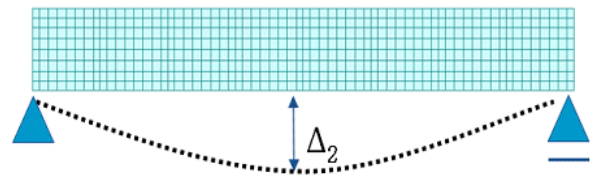


그림 6 등가질량 유도 과정

는 중공볼의 부피 비를 이용한다. 중공슬래브의 밀도 산출에 대한 내용은 표 1에 정리되어 있다. 본 논문에서 사용한 중공 슬래브의 경우 중공비가 약 25%임을 알 수 있다.



(a) 중공슬래브의 3차원 입체요소 모델



(b) 솔리드 슬래브의 3차원 입체요소 모델

3.3. 등가강성의 유도

슬래브의 경우 면외 하중에 대한 휨강성이 바닥진동에 가장 큰 영향을 미친다(김상식, 2007). 본 연구에서 대상으로 하는 중공슬래브는 중공부의 영향으로 인해 솔리드 슬래브에 비해 휨강성이 줄어들게 된다. 따라서 중공슬래브가 같은 규모의 솔리드 슬래브에 비해 어느 정도의 휨강성을 나타내는지를 평가하는 것이 중요하다. 이를 위하여 그림 7과 같이 솔리드 슬래브 모델과 중공슬래브 모델을 똑같은 크기의 메쉬로 모델링하고 두 슬래브에 동일한 등분포 하중을 가한 후 슬래브 중앙 하단부의 변위를 구한다. 이 때 슬래브는 단순 지지로 가정하였다. 정적하중을 받는 슬래브의 변위 및 강성과의 관계를 식 (1)에 나타내었다.

$$P = k \cdot \delta \tag{1}$$

식 (1)에서 P는 하중을 k는 강성을 δ는 변위를 의미한다. 동일한 힘이 가해질 때 변위는 강성에 반비례하므로 위에서 구한 변위의 비를 이용해 중공슬래브의 강성을 구할 수 있다. 솔리드 슬래브 모델은 탄성계수와 단면 2차모멘트가 정해져 있고 변위비를 알고 있으므로 중공슬래브의 솔리드 슬래브에 대한 등가강성비 및 등가강성을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_{equ} = \frac{\Delta_2}{\Delta_1} \tag{2}$$

$$(EI)_{equ} = R_{equ} (EI) \tag{3}$$

그림 7 등가강성 유도 과정

표 2 2방향 중공슬래브의 크기에 따른 등가강성비(두께 210mm)

가로 세로	1m	2m	3m	4m	5m	6m	7m	8m	9m	10m	11m	12m
1m	0.7973	0.8293	0.8444	0.8458	0.8505	0.8480	0.8511	0.8481	0.8511	0.8481	0.8511	0.8481
2m	0.8293	0.8755	0.8907	0.8992	0.9042	0.9076	0.9123	0.9137	0.9140	0.9147	0.9147	0.9151
3m	0.8444	0.8907	0.9031	0.9088	0.9143	0.9172	0.9217	0.9229	0.9246	0.9251	0.9262	0.9264
4m	0.8458	0.8992	0.9088	0.9130	0.9166	0.9196	0.9230	0.9248	0.9261	0.9273	0.9281	0.9289
5m	0.8505	0.9042	0.9143	0.9166	0.9194	0.9212	0.9243	0.9257	0.9271	0.9280	0.9291	0.9298
6m	0.8480	0.9076	0.9172	0.9196	0.9212	0.9235	0.9248	0.9260	0.9271	0.9281	0.9290	0.9298
7m	0.8511	0.9123	0.9217	0.9230	0.9243	0.9248	0.9258	0.9265	0.9275	0.9283	0.9292	0.9298
8m	0.8481	0.9137	0.9229	0.9248	0.9257	0.9260	0.9265	0.9271	0.9277	0.9284	0.9291	0.9297
9m	0.8511	0.9140	0.9246	0.9261	0.9271	0.9271	0.9275	0.9277	0.9283	0.9287	0.9293	0.9294
10m	0.8481	0.9147	0.9251	0.9273	0.9280	0.9281	0.9283	0.9284	0.9287	0.9290	0.9294	0.9298
11m	0.8511	0.9147	0.9262	0.9281	0.9291	0.9290	0.9292	0.9291	0.9293	0.9294	0.9298	0.9300
12m	0.8481	0.9151	0.9264	0.9289	0.9298	0.9298	0.9298	0.9297	0.9294	0.9298	0.9300	0.9300

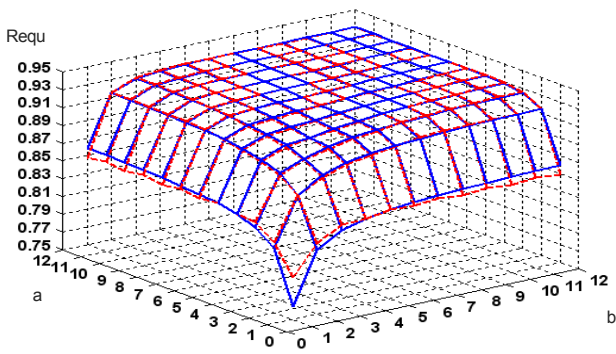


그림 8 해석결과와 수식결과 그래프
(- - - : 해석결과, — : 수식결과)

식에서 R_{equ} 는 등가강성비, $(EI)_{equ}$ 는 2방향 중공슬래브의 등가강성, (EI) 는 솔리드 슬래브의 강성을 의미한다. 등가의 강성비는 슬래브의 스패에 따라서 조금씩 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 슬래브 가로·세로 길이를 1m~12m 범위에서 변화시키면서 등가강성비를 구하였다. 이렇게 구한 등가강성비를 표 2에 나타내었다. 이 해석결과를 이용하여 더욱 일반적인 상황에서 등가강성비를 구하기 위하여 회귀분석법을 이용해 수식 (4)를 유도하였다.

표 2를 보면 특정한 한 변의 길이에 대해서 다른 변의 길이가 증가함에 따라 등가강성비의 증가량이 줄어들어 특정한 값(0.93)에 수렴하는 양상을 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서, 이 해석결과를 그래프로 나타내고 그래프에서의 곡선이 점근선($R_{equ} = 0.93$)에 수렴해 가는 것으로 가정하고 각 슬래브 길이 변화에 따른 등가강성비의 값을 점근선과의 차의 값으로 나타낸다. 이렇게 하여 구한 곡선을 양변에 자연 로그를 취하여 직선화한 후 직선의 식을 유도하고 다시 자연 로그를 소거하여 곡선의 식을 구하였다. 구한 곡선의 식에 의한 값은 점근선과 각 슬래브 길이에 따른 등가강성비의 값과의 차이므로 점근선에서 곡선의 식을 빼주어 각 슬래브 길이에 따른 등가강성비를 구하는 식을 유도하였다. 등가강성

비의 변화는 장방향 슬래브의 가로, 세로 방향에 대해서 동일하게 나타나므로 유도식을 슬래브의 가로, 세로길이를 변수로 하여 서로 곱하여 식 (4)를 유도하였다. 마지막으로 슬래브의 길이에 따른 등가강성비의 변화를 보정하기 위하여 계수 Q를 도입해서 수식의 정확성을 높였다.

$$R_{equ} = Q \times \left(0.93 - \frac{0.0948}{a^{0.7982}}\right) \times \left(0.93 - \frac{0.0948}{b^{0.7982}}\right)$$

$$\left(Q = \frac{1.1538}{l^{0.0169}}, l = \min(a, b)\right) \quad (4)$$

수식 (4)에서 R_{equ} 는 등가강성비이고 a와 b는 각각 슬래브의 가로, 세로 길이이다. 유도한 수식의 정확성을 검증하기 위하여 해석결과를 통해서 얻은 등가강성비와 수식에 의해서 계산된 등가강성비를 비교하여 그림 8에 나타내었다. 그림을 통해서 알 수 있듯이 일반적으로 사용되는 슬래브 크기 범위 내에서는 수식의 결과와 해석의 결과가 거의 일치함을 확인할 수 있다. 슬래브의 한 변이 1m이하일 때는 해석의 결과와 수식의 결과가 다소 차이를 나타내지만 중공슬래브가 사용되는 스패가 주로 3m이상이므로 본 연구에서 제안하는 수식의 사용성에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

4. 2방향 중공슬래브 등가모델의 고유치해석

본 절에서는 앞 절에서 유도한 등가강성비를 이용하여 등가 플레이트 모델을 개발하고 그 정확성을 검증하기 위하여 3차원 입체요소를 사용한 해석 모델과 고유치해석 결과(Chopra, 2000)를 비교해 보았다. 이를 위하여 사변 단순 지지인 8m×8m 크기의 예제 슬래브를 사용하였다. 등가 플레이트 슬래브 모델은 일반적인 4절점 플레이트 요소를 사용하여 예제 슬래브를 모형화한 후 앞 절에서 구한 등가질량과 등가강성을 재료의 특성치로 사용하였다. 3차원 입체요소 모델은 해석의 효율성을 위하여 4m×4m 크기로 모델링한 후

표 3 모드형상과 고유진동수의 비교

	3차원 입체요소 모델	등가 플레이트 모델
1차 모드형상		
Frequency	10.4502(Hz)	10.4706(Hz)
4차 모드형상		
Frequency	38.2268(Hz)	38.8690(Hz)

대칭경계 조건과 역대칭 경계 조건을 적용하였다. 슬래브의 동적 거동 특성상 4m×4m 크기의 슬래브 모델에 대칭경계를 부여하면 8m×8m 크기 슬래브의 1차 모드 형상과 같은 형상을 나타내고, 4m×4m 크기의 슬래브 모델에 역대칭 경계를 부여하면 8m×8m 크기 슬래브의 4차 모드 형상과 같은 형상을 나타낼 수 있다. 이것은 뒤에 소개할 슬래브의 모드형상을 통해서 확인할 수 있다. 해석모델에서 메쉬 크기는 30mm로 하였다. 두 가지 해석모델을 이용하여 고유치해석을 수행한 후 4m×4m 크기의 슬래브로 검증이 가능한 1차 및 4차 모드의 고유진동수와 모드형상을 표 3에 비교하였다. 해석결과를 보면 1차 모드 및 4차 모드의 진동수차이가 각각 0.1%와 1.6%로 매우 작은 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발한 등가의 플레이트 모델을 사용하면 2방향 중공슬래브의 동적거동을 비교적 정확하게 표현할 수 있을 것으로 기대할 수 있다. 또한 정확해라고 볼 수 있는 3차원 입체요소를 사용한 해석모델은 8m×8m 크기 전체 슬래브를 해석하기 위해서 5,224,536개의 자유도가 필요하지만 등가의 플레이트 모델의 경우에는 427,734개의 자유도만 필요하므로 해석에 소요되는 시간 및 컴퓨터 메모리를 크게 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

5. 예제해석

본 연구에서 개발한 등가 플레이트 모델의 정확성을 검증하기 위해서 보행하중을 사용한 시간이력해석을 수행하여 3

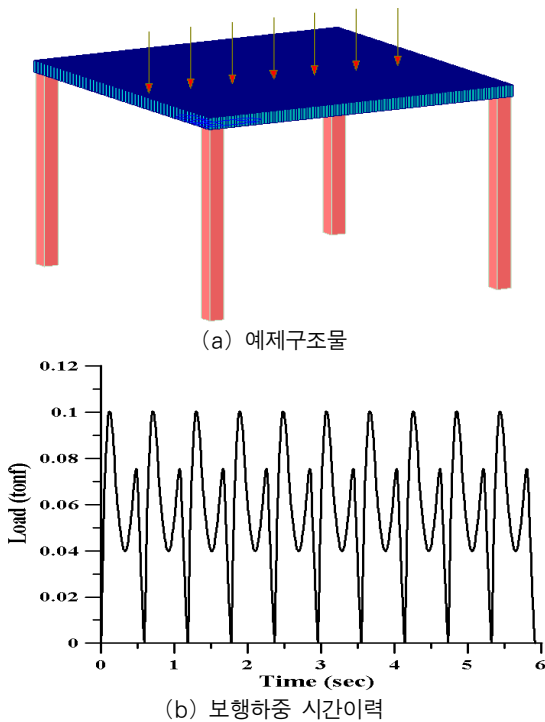


그림 9 예제구조물과 보행하중

차원 입체요소를 사용한 슬래브 모델의 진동응답과 비교 검토하였다.

5.1 예제구조물과 보행하중

앞에서 설명한 바와 같이 3차원 입체요소를 사용하면 해석모델의 자유도 수가 매우 커져서 컴퓨터 용량의 한계로 인하여 슬래브를 포함한 전체 구조물을 해석하는 것이 불가능하다. 따라서 본 절에서 사용한 예제구조물은 3차원 입체요소를 사용한 상세모델의 해석가능여부를 고려하여 그림 9에 나타난 바와 같이 두께 210mm의 4m×4m 중공 슬래브가 사용된 단층의 구조물로 선택하였다. 해석에 사용한 보행하중은 75kgf의 일반인이 보폭 60cm로 슬래브 중앙부를 가로 질러가는 하중으로 하였다. 여기서 하중의 최대 크기는 동적계수를 고려하여 100kgf으로 하였다. 그림 8에 보행하중이 가해지는 위치와 하중의 시간이력을 나타내었다.

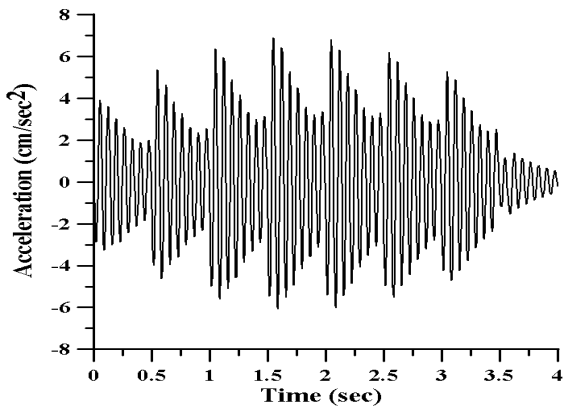
5.2. 시간이력해석 결과

2방향 중공슬래브를 모형화할 때 3차원 입체요소 대신에 본 연구에서 개발한 등가의 플레이트 모델로 모형화하면 자유도수를 대폭 줄일 수 있기 때문에 해석의 효율성을 크게 증가시킬 수 있다. 중공 슬래브 3차원 입체요소 모델은 시간이력해석에 4893초가 소요되는 반면에 등가 플레이트 슬래브 모델은 268초가 소요되었다. 즉 등가 플레이트 모델을 사용하면 3차원 입체요소를 사용했을 때 비하여 약 5%의 해석시간만으로 해석결과를 얻을 수 있었다. 3차원 입체모델과 등가 플레이트 슬래브 모델의 1차~5차의 고유진동수를 표 4에 나타냈다. 해석결과를 보면 두 모델의 고유진동수의 차이가 1%내외로 매우 잘 일치함을 확인할 수 있다.

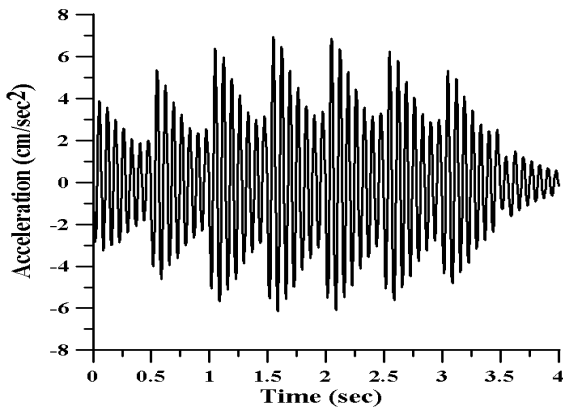
바닥판의 진동에 대한 사용성 평가에 있어 중요한 척도가 되는 것이 슬래브의 연직방향 가속도(Taranath, 2005)이므로 두 모델의 가속도 응답을 비교하여 그림 9에 나타내었다. 그림 10에 나타난 가속도 시간이력은 두 모델의 슬래브 중앙 하단부의 값이다. 두 모델의 해석결과가 매우 잘 일치하여 그래프상으로는 그 차이를 확인할 수 없을 정도로 매우 잘 일치한다. 3차원 입체요소를 사용한 모델의 가속도 응답 최

표 4 모드별 고유진동수의 비교

모드	3차원 입체요소 모델(Hz)	등가 플레이트 모델(Hz)	오차(%)
1차	2.8607	2.8989	1.33
2차	2.8607	2.8989	1.33
3차	4.3737	4.4290	1.26
4차	14.2259	14.2434	0.12
5차	29.7911	29.8638	0.24



(a) 3차원 입체요소 모델



(b) 등가 플레이트 모델

그림 10 보행하중에 대한 가속도 응답

대치는 6.947cm/sec^2 으로 1.548초의 시간에서 발생하였고 등가 플레이트 모델은 동일한 시간에 6.907cm/sec^2 의 가속도를 나타내었다. 최대 가속도 응답의 오차는 0.58%로서 두 모델의 해석결과가 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안된 등가 플레이트 모델을 사용하여 2방향 중공슬래브 구조물을 해석하면 해석에 소요되는 시간을 대폭 줄이면서도 3차원 입체요소를 사용한 결과와 거의 비슷한 해석결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 2방향 중공슬래브의 효율적이고도 정확한 진동해석을 위하여 등가의 플레이트 모델을 개발하였다. 이를 위하여 3차원 입체요소 중공슬래브 모델에 대응하는 플레이트 슬래브 모델의 등가 질량과 강성을 산출하였다. 2방향 중공슬래브의 길이에 관계없이 등가 플레이트 모델을 용이하게 개발하기 위하여 슬래브의 가로, 세로 길이를 고려한 등가강성비 계산식을 유도하였다. 유도한 등가강성비 계산식은 일반적으로 사용하는 슬래브 길이에 대해서 매우 정확한 결과를 나타내었다. 등가 플레이트 모델의 정확성과 효율성을

검증하기 위하여 예제해석을 수행한 결과 2방향 중공슬래브의 고유치해석은 3차원 입체요소와 비교하여 1%내외의 오차만을 포함하는 매우 정확한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 또한 두 개의 해석모델을 사용하여 보행하중이 가해질 때의 시간이력해석을 수행한 결과 등가 플레이트 모델을 사용하면 5분 이내의 해석시간만을 소요하면서도 1시간 20분을 소요하여 얻은 3차원 입체요소 모델의 해석결과와 거의 같은 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제안된 등가의 플레이트 모델을 사용한다면 2방향 중공슬래브가 사용된 구조물의 전체 모델에 대해서도 해석이 어렵지 않게 이루어 질 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 『삼성중공업(주)』의 지원으로 이루어졌으며, 지원 기관에 깊은 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

- 김기철, 김광만 (2007) 중공슬래브 바닥판의 진동 및 충격음 특성에 관한 실험연구, 대한건축학회 논문집, 23(4), pp.59~69.
- 김상식 (2007) 철근콘크리트 구조설계, 문운당, 대한민국, p.593.
- 김태호, 이동근 (2005) 주거용 건축물의 효율적인 바닥진동 해석, 한국지진공학회 2005 학술발표회 논문집, pp.228~235.
- 박강근, 김용태, 최영화, 김한철 (2006) 공동주택 바닥판의 진동해석 및 평가, 한국셀공간구조학회 춘계학술발표대회 논문집, 3(1), pp.246~255.
- 박철림, 김문한 (1995) Half Slab와 Half PC Beam을 이용한 T형보의 構造性能 評價를 위한 實驗的 研究, 대한건축학회 논문집, 11(2), pp.137~143.
- 손철수 (2000) 공동주택에서 중공 슬래브 바닥의 차음 특성에 관한 연구, 한국주거학회 논문집, 11(1), pp.171~181.
- 우운택, 박대원, 정란 (2000) 건축구조물의 슬래브 진동에 의한 사용성 평가 연구, 한국지진공학회 추계학술발표대회 논문집, pp.245~250.
- 최원호, 김기철, 이동근 (1999) 보행 이동하중 효과를 고려한 건물 바닥판의 진동평가, 대한건축학회 학술발표 논문집, 19(2), pp.69~74.
- 최정욱, 송진규, 이수곤 (2002) 횡하중을 받는 RC 무량판 구조의 슬래브 모델링 기법, 한국콘크리트학회 논문집, 14(4), pp.615~622.
- 한상환, 박영미 (2005) 수평하중을 받는 플랫 플레이트 슬래

브 해석을 위한 수정된 등가골조모델, 한국콘크리트학회 논문집, 17(3), pp.419~426.

Taranath B.S. (2005) *Wind and Earthquake Resistant Buildings*, Marcel Dekker, New York,

p.892.

Chopra A.K. (2000) *Dynamics of Structures*, Prentice hall, New Jersey, p.844.