

보행하중에 대한 2방향 중공슬래브의 진동성능 평가

Performance Evaluation of Floor Vibration of Biaxial Hollow Slab Subjected to Walking Load

김민균¹⁾ · 박현재²⁾ · 이동근³⁾ · 황현식⁴⁾ · 김현수⁵⁾

Kim, Min-Gyun · Park, Hyun-Jae · Lee, Dong-Guen · Hwang, Hyun-Sik · Kim, Hyun-Su

국문 요약 >> 2방향 중공슬래브 시스템은 슬래브 두께가 증가해도 자중은 크게 증가하지 않으면서 솔리드 슬래브에 비해서 휨강성이 크게 저하되지 않는 장점이 있다. 따라서 최근 넓은 바닥판 구조에 대한 수요가 커지면서 2방향 중공슬래브 시스템에 대한 관심이 증가하고 있다. 그러나 이러한 장스팬 구조의 경우 바닥판 진동의 증가에 의한 사용성에 문제가 발생할 수 있고 특히 2방향 중공슬래브의 경우 기존의 구조시스템과 동적특성이 상이하다. 따라서 본 연구에서는 기존의 라멘조 시스템과 2방향 중공슬래브 시스템의 바닥진동성능을 보행하중을 가하여 검토해 보았다. 본 연구에서는 해석의 효율성을 위하여 2방향 중공슬래브의 동적특성을 정확히 나타낼 수 있는 등가의 플레이트 모델을 사용하여 시간이력해석을 수행하였다. 해석결과를 바탕으로 일본건축학회와 미국표준협회에서 제안하는 진동성능평가 기준을 이용하여 진동성능 평가를 수행한 결과 2방향 중공슬래브가 사무실 수준의 진동성능을 만족하고 있는 것으로 나타났다.

주요어 2방향 중공슬래브, 바닥판진동, 보행하중, 시간이력해석, 진동성능평가

ABSTRACT >> Considering that the weight of a biaxial hollow slab system is not increased with an incremental increase in its thickness, and that the flexural stiffness of a biaxial hollow slab is not significantly lower than that of a general solid slab, there has been a growing need for biaxial hollow slab systems, because long span structures are in great demand. In a long span structure, the problem of vibration of floor slabs frequently occurs, and the dynamic characteristics of a biaxial hollow slab system are quite different from the conventional floor systems. Therefore, in this study, the floor vibration of a biaxial hollow slab system subjected to walking load is investigated in comparison with a conventional floor slab system. For the efficiency of time history analysis, an equivalent plate slab model that can precisely represent the dynamic behavior of a biaxial hollow slab system is used. From the analytical results, it was determined that vibration of a biaxial hollow slab system subjected to walking load is evaluated as "office-level vibration," according to the classifications of the architectural institute of Japan and ANSI.

Key words Biaxial hollow slab system, Floor vibration, Walking load, Time history analysis, Floor vibration evaluation

1. 서론

현대 건축물은 도심지의 인구집중으로 인하여 공동주택 및 오피스의 수요가 점점 증가하고, 경제적, 기능적 요구를 만족시키기 위하여 점차 고층화, 대형화되는 추세에 있다. 구조공학 기술의 발전에 따라 평면계획의 효율성을 위하여

장스팬 구조와 같은 넓은 바닥판에 관심이 더욱 커지고 있는데 이러한 장스팬 구조물은 사용하중 하에서 바닥진동문제가 발생할 가능성이 크다. 따라서 근래에 들어와 바닥충격음 차단구조인정 및 관리기준, 공동주택 친환경건축물 인증기준, 내진기준 강화 등과 같은 구조적, 환경적 규정이 강화되고 있다. 구조물 바닥판의 진동성능을 향상시키기 위한 가장 일반적인 방법은 슬래브의 두께를 증가시키는 것이지만 기존의 구조시스템에서 슬래브의 두께를 증가시키면 슬래브 자중의 증가로 작은보가 추가되고 층고가 증가하여 건축물 전체의 효율성이 떨어지게 되는 문제점이 있다. 따라서 슬래브의 두께를 증가시키면서도 자중은 크게 증가하지 않는 바닥판 시스템으로 중공슬래브에 관한 관심이 커지고 있다.⁽¹⁾

¹⁾ 성균관대학교 건설환경시스템공학과, 석사과정

²⁾ 성균관대학교 건설환경시스템공학과, 석사과정

³⁾ 정회원·성균관대학교 건축공학과, 교수

⁴⁾ 삼성중공업(주) 건설사업부 기술실, 차장

⁵⁾ 선문대학교 건축학부, 전임강사

(교신저자: hskim72@sunmoon.ac.kr)

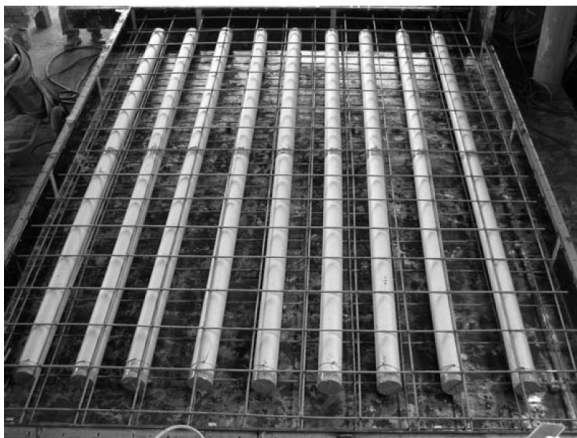
본 논문에 대한 토의를 2009년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2009. 5. 19 / 수정일 : 2009. 8. 20 / 게재확정일 : 2009. 8. 24)

중공슬래브는 슬래브 내부에 중공을 설치하여 슬래브의 자중을 줄이는 시스템으로 중공의 배치에 따라 한쪽방향으로 파이프 형태의 중공을 배치하는 1방향 중공슬래브와 양쪽 방향으로 공 형태의 중공을 배치하는 2방향 중공슬래브로 구분된다. 중공슬래브는 중공에 의해 생기는 'I' 형태의 단면이 휨에 효율적으로 저항하므로 속이 꽉 찬 일반적인 슬리드 슬래브에 비하여 휨강성이 크게 저하되지 않는 장점이 있다. 1방향 중공슬래브의 경우에는 한 방향으로만 'I'형 단면을 가지는데 비해 2방향 중공슬래브는 양방향 모두 'I'형 단면을 가져 양방향으로 휨에 저항하는 특성이 있다. 또한 그림 1에 나타난 바와 같이 일반적으로 2방향 중공슬래브가 1방향 중공슬래브에 비하여 슬래브의 자중을 더 크게 감소시킬 수 있다. 2방향 중공슬래브는 일반적인 슬래브 시스템에 비하여 건물의 층고를 낮출 수 있기 때문에 공동주택 및 오피스 등에서 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 2방향 중공슬래브는 기존의 구조시스템과 동적특성이 크게 다르고 중공형상에 따라 바닥시스템의 질량과 강성이 변화한다. 따라서 근래에 바닥진동에 따른 사

용성 문제가 중요시 되고 있는 상황에서 2방향 중공슬래브가 널리 사용되기 위해서는 바닥진동성능에 대한 평가가 반드시 필요하다.

이러한 필요성을 바탕으로 본 연구에서는 보행하중이 가해지는 2방향 중공슬래브의 시간이력해석을 수행하였고 해석결과를 바탕으로 진동성능평가를 하였다. 진동성능의 평가를 위하여 일본건축학회 제안기준⁽²⁾과 미국 표준협회(ANSI) 제안기준⁽³⁾을 사용하였다. 기존 슬래브 시스템에 대한 2방향 중공슬래브의 진동특성을 비교하기 위하여 RC 라멘조 및 철골 라멘조, 그리고 플랫슬래브 시스템을 예제구조물로 사용하였다. 2방향 중공슬래브도 중공의 형상에 따라서 진동특성이 달라지므로 사용 가능한 몇 가지 중공형상에 따라서 진동특성을 평가하였다. 보행하중이 가해지는 2방향 중공 슬래브의 진동에 대한 정확한 해석결과를 얻기 위해서는 슬래브 시스템 전체를 3차원 입체요소로 모형화하는 것이 바람직하다. 그러나 중공형상을 정확하게 표현할 수 있을 정도의 작은 메쉬크기를 사용하여 2방향 중공 슬래브를 3차원 입체요소로 모형화할 경우에는 해석모델의 자유도수가 너무나 많아져서 해석시간이 대폭 증가하거나 경우에 따라서는 개인용 컴퓨터에서 해석이 불가능한 경우도 발생한다. 따라서 본 연구에서는 2방향 중공슬래브의 동적특성을 정확히 표현할 수 있는 등가의 플레이트 요소를 사용하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용한 하중은 일반적인 사람의 보행 진동수인 2Hz의 진동수를 가지는 보행하중을 사용하여 진동성능평가를 수행하였고, 가장 불리한 상황에서의 슬래브의 응답을 검토하기 위하여 탁월진동수에 맞춰 공진할 수 있는 보행하중 진동수를 각 모델에 맞도록 계산하였다. 이때, 계산된 보행하중 진동수를 적용하여 2Hz의 보행하중 진동수를 적용한 경우와 비교하여 진동응답을 평가하였다.



(a) 1방향 중공슬래브



(b) 2방향 중공슬래브

〈그림 1〉 중공슬래브의 종류

2. 슬래브 진동성능기준

구조물의 바닥판에 가해지는 보행하중 또는 충격에 의해 야기되는 진동은 그 공간에 있는 사람에게 스트레스를 유발하여 수면장애, 피로감 증대 등을 일으킬 수 있다. 따라서 건물의 용도에 따라 사용성에 문제가 없도록 바닥판의 진동성능수준을 평가할 필요가 있다. 이런 진동성능평가를 위한 기준은 해외에 각국의 연구결과를 토대로 제정된 여러 평가방법이 있다.⁽⁴⁾ 본 연구에서는 일본건축학회와 미국표준협회에서 제안하는 기준으로 진동성능을 평가하였다. 본 장에서는 두 기준에 대해서 간략히 소개한다.

2.1 일본건축학회 제안기준

일본건축학회에서는 구조물의 바닥판에서 발생하는 연직진동을 평가하기 위해서 1991년에 국제표준화기구(ISO)의 진동성능평가기준을 바탕으로 하여 “건축물의 진동에 관한 거주성능 평가지침”을 제정하였다. 일본건축학회에서는 진동을 표 1과 같이 연속진동 또는 충격진동으로 분류하였고 건축물실의 용도와 등급에 따라서 표 2 및 분류2와 같은 진동성능평가기준을 제시하였다. 이 평가기준에서는 진동응답의 최대값을 이용하여 진동성능을 평가한다. 본 연구에서는 보행하중을 사용하여 진동응답을 평가하므로 진동종별 1에 해당한다.

2.2 미국표준협회(ANSI) 제안기준

미국표준협회의 진동성능평가기준은 앞서 설명한 일본건축학회나 국제표준화기구 등 일반적인 진동성능평가기준과 마찬가지로 진동이 인체에 미치는 영향을 고려하여 제정하였으며 분류번호 S3.29에 명시되어 있다. 미국표준협회의 진동성능평가기준은 표 3에 나타난 바와 같이 정밀한 작업을 요하는 중요한 작업 장소에 대하여 특별히 기준을 제시하였고 낮과 밤에 따라서 평가의 기준을 다르게 제시하였다. 이러한 평가기준을 바탕으로 작성한 진동성능 평가곡선을 그림 3에 나타내었다.

〈표 1〉 일본건축학회 진동성능평가기준의 진동분류

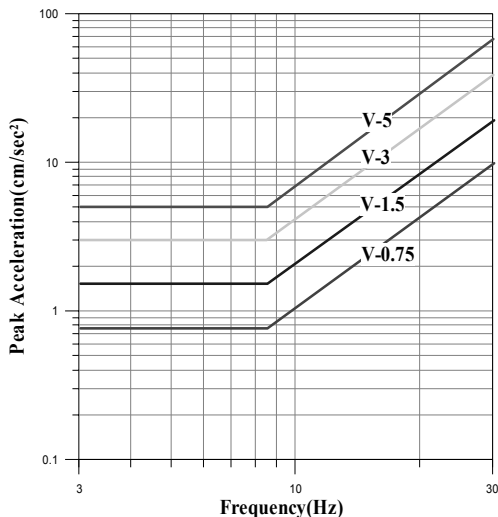
진동종별	내 용
1	연속진동 및 간헐적으로 반복하여 발생하는 진동을 받는 바닥
2	충격진동을 받는 감쇠성이 낮은 바닥, 감쇠 3%이하
3	충격진동을 받는 감쇠성이 높은 바닥, 감쇠 3-6%정도

〈표 2〉 일본건축학회 진동성능평가기준

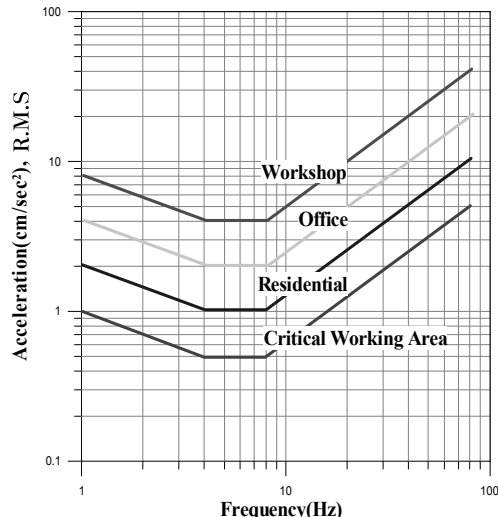
건축물종별등급		진동종별 I			진동종별 2	진동종별 3
건축물 실용도		등급 I	등급 II	등급 III	등급 III	등급 III
주택	거실, 침실	V-0.75	V-1.5	V-3	V-5	V-10
사무소	회의, 응접실	V-1.5	V-3	V-5	V-10	V-30
	일반사무소	V-3	V-5	V-5정도	V-10정도	V-30정도

〈표 3〉 ANSI(S3.29) 진동성능평가기준

장소	시 간	가속도(cm/sec ²)
중요한 작업장소 (병원의 수술실, 정밀도를 요하는 실험실)	낮/밤	0.5
	낮	1-2
주거지역	밤	0.7
사무실	낮/밤	2
작업장	낮/밤	4



〈그림 2〉 일본건축학회 진동성능평가곡선



〈그림 3〉 ANSI(S3.29) 진동성능평가곡선

3. 예제구조물 및 보행하중

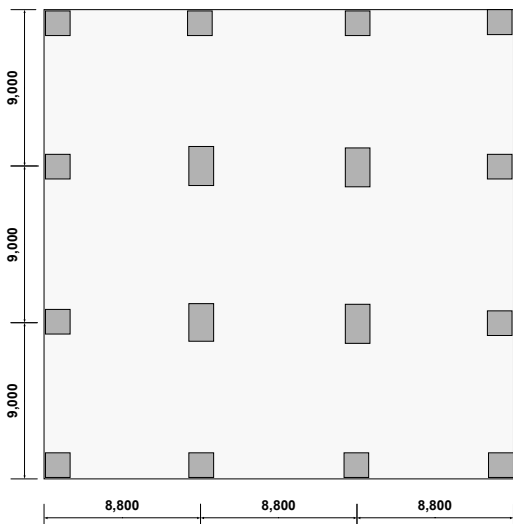
본 연구에서는 3가지 중공형상을 가지는 2방향 중공슬래브 시스템과 일반적으로 사용되는 RC 라멘조 및 철골 라멘조 슬래브 시스템에 보행하중을 가하여 시간이력해석을 수행한 후 진동성능을 평가하였다. 본 장에서는 해석에 사용된 예제구조물 및 보행하중에 대하여 설명한다.

3.1 예제구조물 개요

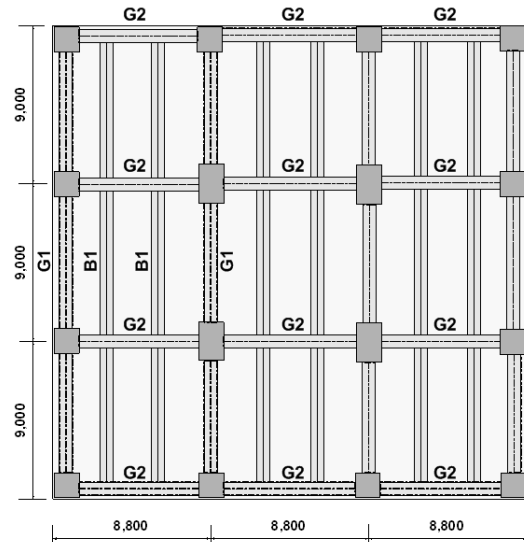
본 연구에서는 사용한 예제구조물의 평면을 그림 4와 5에 나타내었다. 그림 4에 2방향 중공슬래브 및 플랫폼슬래브 시스템을 나타내고 그림 5는 일반적인 RC 라멘조 및 철골 라멘조 시스템을 나타낸다. 두 시스템 모두 양방향 3경간 구

조물로서 가로방향의 경간은 8.8m이고 세로방향의 경간은 9m이다. 철골 라멘조 시스템의 경우에 Steel 기둥을 사용하는 구조물과 SRC 기둥을 사용하는 구조물의 두 가지 예제 구조물을 사용하였다. 플랫폼슬래브 및 라멘조(RC, 철골)구조의 경우 예제구조물의 스패에서 범용적으로 통행되는 구조 설계를 수행하였다. 예제 구조물에서 플랫폼슬래브 및 중공슬래브 시스템의 바닥판 두께는 300mm이며 RC 라멘조 및 철골 라멘조 시스템의 바닥판 두께는 150mm이다. 예제구조물은 24MPa의 콘크리트와 SS400 철골로 구성하였고 사용된 부재의 재원은 표 4에 나타내었다.

중공슬래브 시스템의 경우 중공부의 형상에 따라 그림 6에 나타낸 3가지 형태의 중공슬래브 시스템을 사용하였다. 각 중공 슬래브에 사용된 중공부의 형태를 상세히 표현하여 그림 7에 나타내었다. 먼저 그림 6에서 첫 번째 슬래브는 중



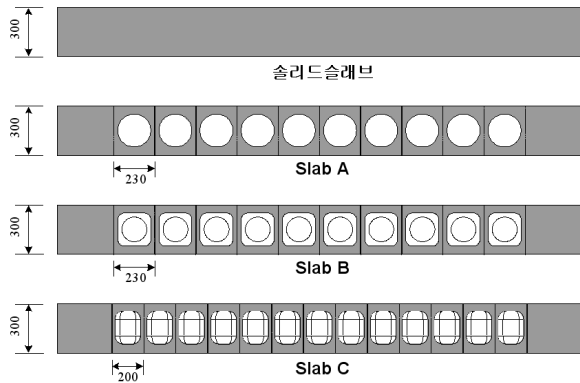
〈그림 4〉 플랫폼슬래브 및 중공슬래브 시스템



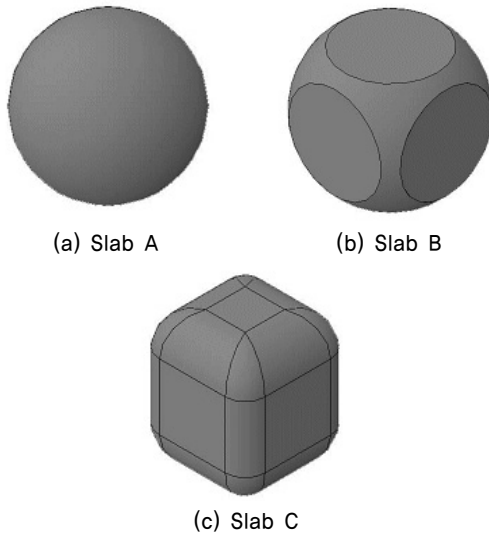
〈그림 5〉 RC 라멘조 및 철골 라멘조 시스템

〈표 4〉 예제구조물의 부재 및 단면크기

골조 형식	부재	재료	단면 크기
플랫폼슬래브 및 중공슬래브	기둥	R.C.	800×800mm (외부) 800×1400mm (내부)
	슬래브	R.C.	300mm
RC 라멘조	기둥	R.C.	800×800mm (외부) 800×1400mm (내부)
	보	R.C.	B1, G1 : 400×700mm G2 : 500×700mm
철골 라멘조	기둥	Steel	H428×407×20×35 (내·외부)
		SRC	600×600mm(내·외부) (H428×407×20×35 철골사용)
	보	Steel	B1, G1 : H500×200×10×16 G2 : H588×300×12×20
	슬래브	R.C.	150mm



〈그림 6〉 중공형상에 따른 중공슬래브 시스템



〈그림 7〉 각 중공슬래브 모델에 사용된 중공형상

공부분이 없는 일반적인 솔리드 슬래브를 사용한 플랫슬래브 시스템을 나타낸다. Slab A는 지름이 200mm인 구형의 볼을 포함한 중공슬래브로서 볼의 중심 간의 거리는 230mm이다. Slab B는 구형 볼의 위아래면 및 네 옆면을 잘라낸 형태의 중공부를 포함하고 있다. 이때 구형 볼의 지름은 260mm이고 잘라낸 부분의 높이는 각각 30mm이다. 따라서 중공부의 가로, 세로 길이 및 높이는 각각 200mm이다. 이러한 형태의 중공부는 구형볼보다 그 부피가 크게 증가하여 중공 슬래브의 중량을 더욱 줄일 수 있다. Slab C는 가로, 세로 길이가 160mm이고 높이가 200mm인 직육면체의 모서리를 둥그렇게 처리한 형태의 중공볼을 포함한 중공 슬래브이다. 이때 위아래면과 접한 8개의 모서리는 반지름 50mm로, 옆면 4개의 모서리는 반지름 30mm를 이용하여 모따기를 하였다. 각 중공형상에 따라 Slab-A, Slab-B, Slab-C의 체적감소율이 솔리드 슬래브에 대하여 26%, 45%, 36%로 다르기 때문에 서로 동적특성이 상이할 것이다. 따라서 본 연구에서는 이 3가지 볼의 형상에 따른 2방향 중공슬래브의 진동성능 변화를 검토하였다.

3.2 효율적인 해석을 위한 등가모델의 적용

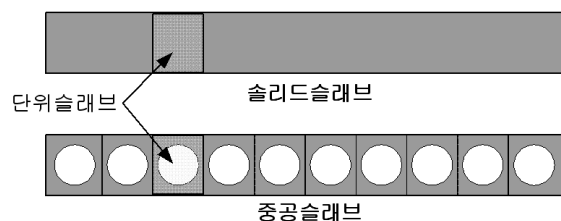
중공슬래브의 정확한 진동해석을 위해서는 3차원입체요소를 사용하여 내부 중공형상을 정확히 반영하는 상세 유한요소해석모델을 사용하는 것이 필요하다. 그러나 슬래브 내부의 복잡한 중공형상을 반영하기 위해서는 해석모델 생성에 어려움이 따른다. 또한, 정확한 형상의 표현을 위해서는 3차원입체요소의 메쉬크기를 작게 하여 모형화해야 하므로 해석모델의 자유도수가 대폭 증가하여 과도한 해석시간이 필요하거나 슬래브의 크기가 커지게 되면 경우에 따라서 해석이 불가능하게 된다. 따라서 본 연구에서는 2방향 중공슬래브의 질량과 강성 특성을 고려한 등가 플레이트요소를 사용하여 중공슬래브의 진동성능을 평가하였다.

등가 플레이트요소는 2방향 중공슬래브를 위한 등가질량과 등가강성을 구해서 생성된다. 등가질량의 산출은 그림 8과 같은 중공슬래브에서 하나의 중공부가 들어가는 단위슬래브의 부피를 이용한다. 일반 솔리드슬래브와 중공슬래브의 단위슬래브 부피를 구하여 중공부분에 의한 부피감소를 계산할 수 있다. 이때, 부피가 감소한 만큼 질량이 감소하므로 중공슬래브의 밀도는 부피비를 이용하여 구할 수 있다. 부피비는 단위슬래브에서 솔리드슬래브가 가지는 부피에 대해 중공슬래브가 가지는 부피의 비율을 나타내고 식 (1)와 같다.

$$V_R = \frac{\text{단위슬래브 부피} - \text{중공부분 부피}}{\text{단위슬래브 부피}} \quad (1)$$

등가강성은 후크의 법칙에 의하여 동일한 힘이 가해질 때 변위는 강성에 반비례하는 성질을 이용한다. 따라서 일반 솔리드슬래브에 대한 중공슬래브의 변위비는 휨강성 비율과 반비례관계에 있게 되므로 변위비를 이용하여 등가강성을 구할 수 있다. 이때, 등가강성은 등가 플레이트요소를 적용하여 해석을 수행할 때 쉽게 적용할 수 있도록 휨강성과 비례하는 탄성계수를 변화시킬 수 있다. 이를 식으로 표현하면 식 (2)과 같다.

$$E_R = K_R = \frac{1}{\Delta_R} = \frac{\Delta_1}{\Delta_2} \quad (2)$$



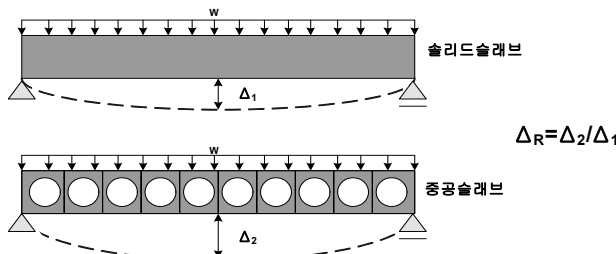
〈그림 8〉 등가질량 계산을 위한 단위슬래브

여기서 E_R , K_R 과 Δ_R 은 솔리드슬래브에 대한 중공슬래브의 탄성계수비와 휨강성비 및 변위비를 나타내고 Δ_1 과 Δ_2 는 그림 9에 나타난 바와 같이 동일한 하중에 대한 솔리드슬래브와 중공슬래브의 변위를 나타낸다.

본 연구에서는 3차원입체요소를 사용하여 등분포로 동일한 하중을 재하하고, 4변 단순지지의 경계조건을 가진 중공이 없는 솔리드슬래브와 3가지 중공형상에 따른 중공슬래브의 해석모델을 구성하여 정적해석을 수행하였다. 정적해석 결과를 바탕으로 일반 솔리드슬래브에 대한 각 중공슬래브의 변위 비를 이용하여 식 (2)를 통해 3가지 중공슬래브 모델의 등가탄성계수비를 구하였다. 솔리드슬래브와 3가지 중공형상에 따른 중공슬래브의 등가 플레이트요소로 적용된 등가밀도 및 등가탄성계수를 표 5와 표 6에 나타내었다.

앞에서 유도한 등가밀도 및 등가탄성계수를 적용한 등가 플레이트 모델의 정확성을 검증하기 위하여 3차원입체요소를 사용하여 정밀하게 표현된 모델과 등가플레이트 모델의 고유치해석을 수행하여 결과를 비교하여 보았다. 해석모델은 그림 4에 나타난 예제구조물의 8.8m×9m 스패를 가지는 중앙부 슬래브를 4변 단순지지로 구성하였다. 이때 40mm의 메쉬크기를 가지는 3차원입체요소를 사용하여 모형화한 경우에는 과도한 절점과 자유도 수 때문에 개인용 컴퓨터

(Intel Core2 Quad CPU@2.4GHz, 2GB RAM)에서 해석이 불가능하였다. 따라서, 모드형상의 대칭 및 역대칭 조건을 이용하여 1/4부분만 모델링한 후 해석을 수행하였다. 고유치해석결과를 표 7에 나타내었는데 각 중공슬래브의 모드형상을 비교해 보면 등가플레이트모델이 3차원입체요소 모델의 모드형상을 정확히 나타낼 수 있는 것을 확인할 수 있다. 세 가지 형태의 중공슬래브에 대하여 두 해석모델의 고유진동수를 비교해보면 Slab A의 경우에는 1%이내의 오차가 발생하고 Slab B 및 Slab C의 경우에는 최대 3%이하의 오차를 나타내는 것을 볼 수 있다. Slab A보다 Slab B와 Slab C의 오차가 조금 더 커지는 이유는 3차원 입체요소모델에서 40mm의 메쉬크기를 사용해서 Slab B와 Slab C의 중공부 형태를 정확하게 표현할 수 없기 때문으로 판단된다. 특히 Slab C의 중공부 모서리의 반지름이 30mm이므로 40mm의 메쉬크기로는 중공형상을 정확하게 표현하는 것이 불가능하다. 즉, 더욱 정확한 해석결과를 얻을 수 있는 작은 메쉬크기를 사용하여 중공슬래브를 모형화한다면 오차는 더욱 줄어들 것으로 판단된다. 이상과 같이 등가의 플레이트모델이 3차원 입체요소모델의 동적특성을 비교적 정확하게 나타낼 수 있으므로 본 연구에서는 등가플레이트모델을 사용하여 2방향 중공슬래브의 진동성능을 평가한다.



(그림 9) 등가강성 계산을 위한 변위비

3.3 보행하중을 적용한 진동해석

본 연구에서는 보행하중이 가해지는 2방향 중공슬래브의 진동성능을 평가해보기 시간이력해석을 수행하였다. 시간이력해석을 위한 감쇠비는 모든 예제모델에 대하여 3%를 적용하였다. 보행하중은 그림 10에 나타난 바와 같이 예제구조물의 중앙부에 위치한 슬래브에 가하였고 가장 큰 진동을 유발할 수 있도록 보행자가 대각선 기동방향으로 이동하도록

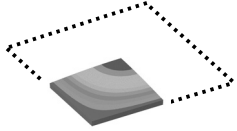
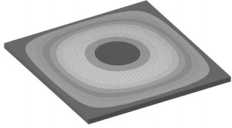
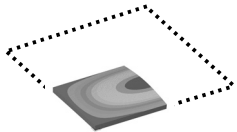
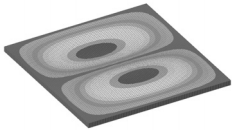
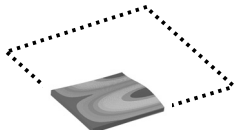
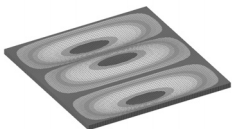
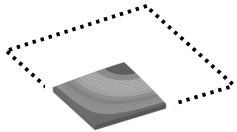
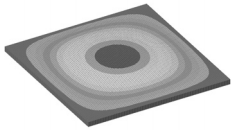
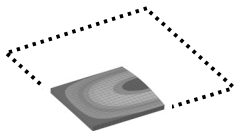
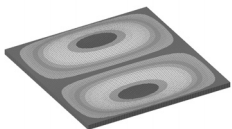
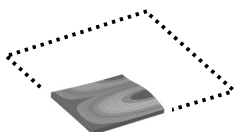
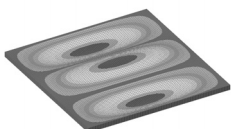
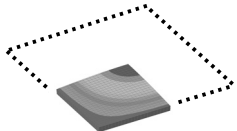
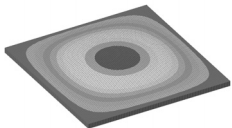
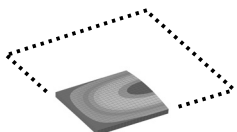
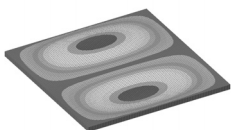
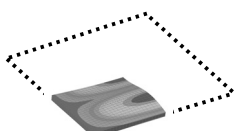
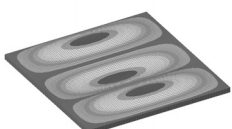
(표 5) 중공슬래브별 부피비 및 등가밀도

TYPE	단위슬래브부피 (cm ³)	중공부분부피 (cm ³)	단위슬래브실부피 (cm ³)	실부피비	등가밀도 (tonf/cm ³)
솔리드슬래브	15870	-	15870	1.000	2.4000×10 ⁻⁶
Slab-A	15870	4189	11681	0.736	1.7665×10 ⁻⁶
Slab-B	15870	7167	8703	0.548	1.3161×10 ⁻⁶
Slab-C	12000	4402	7598	0.633	1.5196×10 ⁻⁶

(표 6) 중공슬래브별 등가탄성계수 및 탄성계수비

TYPE	탄성계수비	등가탄성계수 (tonf/cm ²)
플랫슬래브	1.0000	2.3694E+002
Slab-A	0.8781	2.0806E+002
Slab-B	0.7208	1.7079E+002
Slab-C	0.8250	1.9548E+002

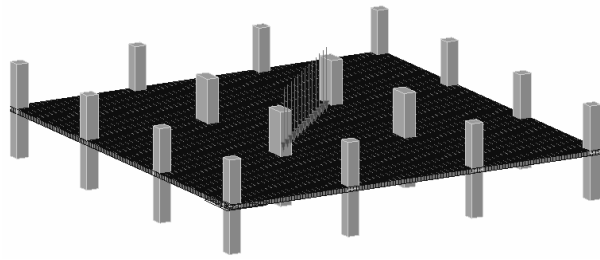
〈표 7〉 3차원입체요소 모델과 등가플레이트요소 모델의 고유치해석결과 비교

중공슬래브 모델	진동모드	3차원입체요소 모델		등가플레이트요소 모델	
		모드형상	고유진동수 (Hz)	모드형상	고유진동수 (Hz)
Slab A	1차모드		11.7019		11.7365
	2차모드		28.5914		28.9333
	5차모드		57.0117		57.4599
Slab B	1차모드		12.4074		12.2348
	2차모드		31.1225		30.2897
	5차모드		60.2243		60.2364
Slab C	1차모드		11.6917		11.9346
	2차모드		28.6359		29.5383
	5차모드		57.1146		58.8224

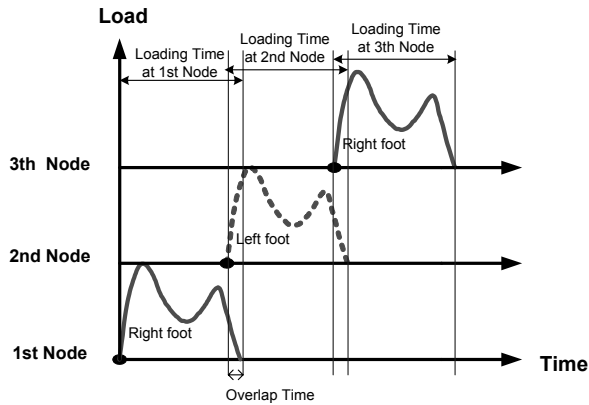
록 하였다. 보행하중의 간격은 실제 보행자의 보폭과 슬래브의 요소간격을 고려하여 85cm로 하였다.

보행하중은 일본 건축학회 RC규준에서 보행에 의한 충격

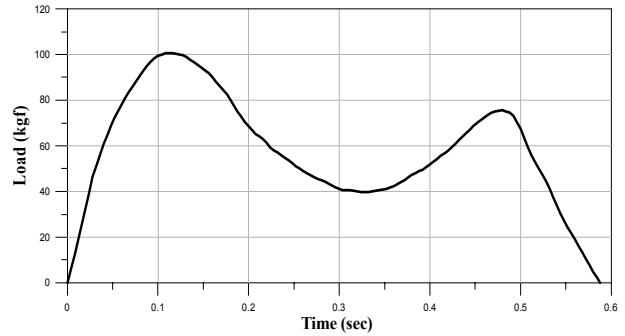
량을 0.3 kgf·sec로 정의하고 이를 지속시간 0.04초의 반정현파 충격하중으로 가정하여 제시하고 있다. 그러나 보행자의 이동을 고려하는 경우에는 적합하지 않으므로 본 연구에



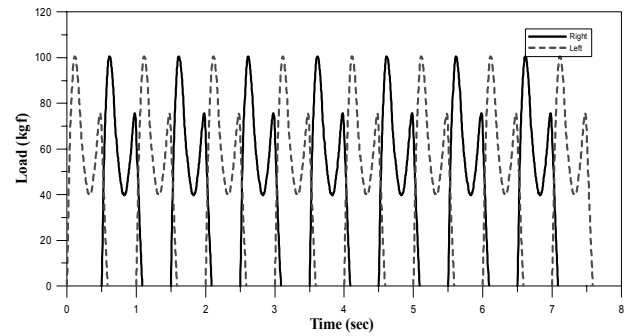
〈그림 10〉 보행하중을 나타낸 구조해석모델



〈그림 11〉 보행하중의 적용방법



(a) 보행하중 1step



(b) 보행하중 시간이력

〈그림 12〉 해석에 사용된 보행하중

〈표 8〉 2Hz의 보행하중을 사용한 경우의 모델별 응답

모델	최대 변위 (cm)	최대 속도 (cm/sec)	최대 가속도 (cm/sec ²)	RMS 가속도 (cm/sec ²)	
플랫슬래브	1.503×10^{-3}	1.600×10^{-2}	0.696	0.2108	
중공 슬래브	Slab-A	1.873×10^{-3}	2.719×10^{-2}	1.462	0.4512
	Slab-B	2.305×10^{-3}	3.600×10^{-2}	1.975	0.5948
	Slab-C	2.022×10^{-3}	3.176×10^{-2}	1.740	0.5220
RC 라멘조	1.374×10^{-3}	2.673×10^{-2}	3.600	0.4580	
철골 라멘조	철골 기둥	3.616×10^{-3}	4.123×10^{-2}	2.124	0.5215
	SRC 기둥	3.447×10^{-3}	3.712×10^{-2}	1.783	0.4282

서는 Bachmann등이 제시하는 보행자의 1Step하중을 사용하였다. 보행하중의 적용방법은 그림 10의 하중위치에 1step에 해당하는 하중을 보행하중의 간격(85cm)에 따라 순차적으로 가력하였다. 이때, 바닥판에서 두 발이 동시에 바닥에 닿는 시간간격을 중복시켜 그림 11과 같이 각 절점에 작용시킴으로써 사람이 보행하는 경우 왼발과 오른발의 영향을 고려하도록 하였다.⁽⁵⁾ 중복되는 시간간격은 2Hz의 보행하중에 대하여 0.1초를 사용하였다. 해석에 사용한 보행하중은 75kg의 몸무게를 가지는 사람의 것으로 가정하였고 이를 그림 12에 나타내었다. 사람의 일반적인 보행하중의 진동수는 2Hz 정도로 알려져 있다.⁽⁵⁾ 따라서 본 연구에서는 2Hz의 진동수를 가지는 보행하중을 사용하여 진동성능평가를 수행하였고, 가장 불리한 상황에서의 슬래브의 응답을 검토하기 위하여 탁월진동수를 적용한 보행하중도 사용하였다.

4. 해석결과

앞서 설명한 구조해석 모델 및 보행하중을 사용하여 MIDAS/Gen을 이용해 시간이력해석을 수행한 후 슬래브별 수직방향 응답을 구하였다. 일반적으로 10Hz이하의 하중에 대한 바닥진동 사용성 평가는 주로 가속도에 의하여 좌우되므로 가속도응답을 위주로 성능을 검토하여 보았다. 예제 구조물의 응답측정점은 가운데 슬래브의 중앙점으로 하였다.

4.1 2Hz의 보행하중을 적용한 경우

앞 절에서 소개한 2Hz의 보행하중을 적용한 해석결과 중에서 각 슬래브별 최대응답 및 RMS 가속도응답을 비교하여 표 8에 나타내었다. 해석결과를 보면 2방향 중공슬래브가 중공부가 없는 플랫슬래브에 비해서는 큰 가속도 응답을

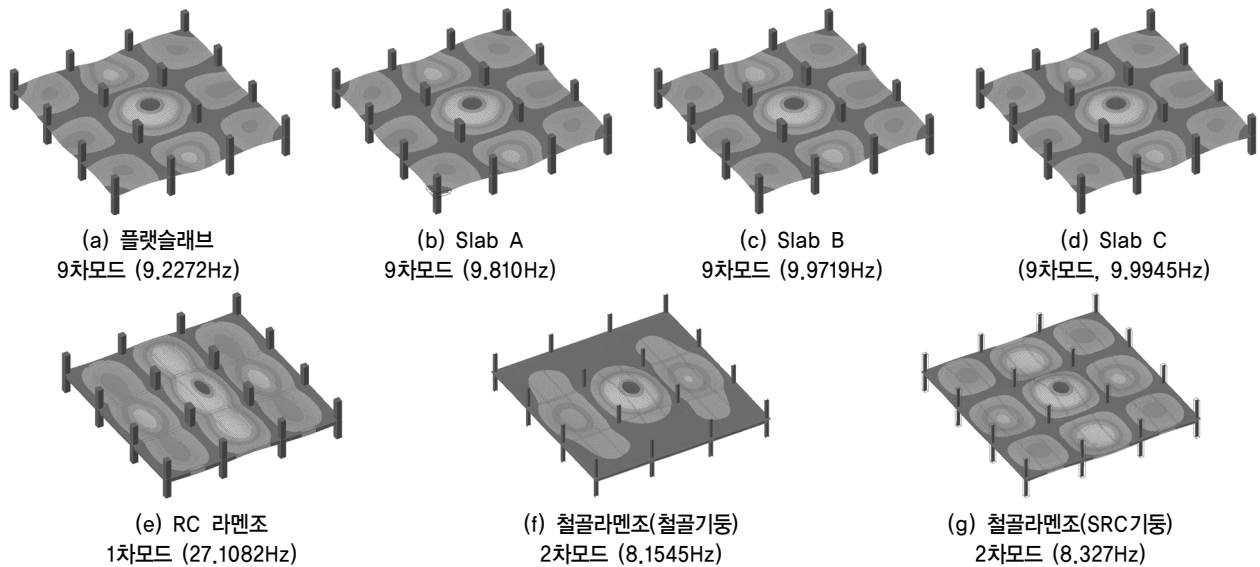
나타내는 높 및 알 수 있다. 그러나 일전적인 RC 라멘조 및 철골 라멘조(철골기둥) 구조물보렷별 더에 은 최대 가속도를 나타내었다. 또한 각 모델별 RMS 가속도 응답을 비교하여 보면 2방향 중공슬래브가 기존의 시스템과 비슷하거나 조금 큰 응답을 보인다. 나 조금이다. 나 조금이다. 나 조금이다에 대해서는 2방향 중공슬래브가 기존의 시스템과 비교해볼 때 비슷한 늑에 대을 나타낸다고 볼 수 있다.

4.2 탁월진동수의 보행하중을 적용한 경우

2Hz로 일관된 보행하중 진동수를 사용한 경우보다 각 모델별로 가장 불리한 조건의 보행하중을 가하여 극한 상황에 대한 2방향 중공슬래브의 진동성능을 평가해 보는 것이 필요하다. 이를 위해서 각 모델별 탁월진동수를 구하고 탁월진동수에 맞추어 보행하중을 가하였다. 각 모델별 탁월진동수를 결정하기 위하여 그림 13에 나타난 바와 같이 슬래브의 모드형상을 검토하였고 응답 측정점에서 가장 큰 진폭을 나타내는 모드의 진동수를 탁월진동수로 선택하였다. 이렇게 결정된 탁월진동수에 공진을 일으킬 수 있도록 보행하중

진동수를 조정한 후 각 모델에 가하면 해당 보행하중에 대한 가장 불리한 경우의 응답을 얻을 수 있다. 이때, 일반적인 보행하중의 진동수인 2Hz에 근접한 진동수를 구하기 위하여 각 모델별 탁월진동수를 적절한 정수로 나누어 탁월진동수의 1/n배가 2Hz에 근접한 보행하중 주파수를 찾아내었고 이를 표 9에 나타내었다.

탁월진동수에 맞춘 보행하중진동수를 사용하여 해석한 결과를 각 모델별 응답을 표 10에 나타내었다. 해석 결과를 보면 최대 가속도응답에서 기존 라멘조 시스템에 비하여 2방향 중공슬래브 시스템이 매우 우수한 진동성능을 가지는 것을 알 수 있다. RMS 가속도 응답을 비교해보면 슬래브의 부피를 45%정도로 가장 많이 공제한 Slab B 모델을 제외하고 부피를 26%, 36% 줄인 Slab A와 Slab C의 경우 다른 모델에 비해 뛰어난 성능을 보인다. 특히 Slab C의 경우 Slab A에 비해 상당한 양의 슬래브 부피를 공제하였음에도 진동성능은 훨씬 우수함을 확인 할 수 있다. 이를 통해서 2방향 중공슬래브의 진동성능은 중공부의 부피뿐만 아니라 형상에 의해서 크게 좌우되는 것을 알 수 있다. 플랫폼슬래브 모델의 경우 2Hz 진동수로 보행하중을 가하였을 때 보다



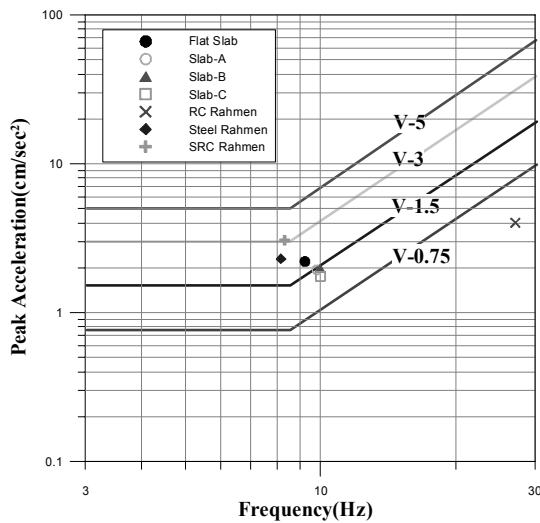
〈그림 13〉 슬래브별 탁월진동수를 나타내는 모드의 형상

〈표 9〉 슬래브 모델별 탁월진동수 및 보행하중 주기

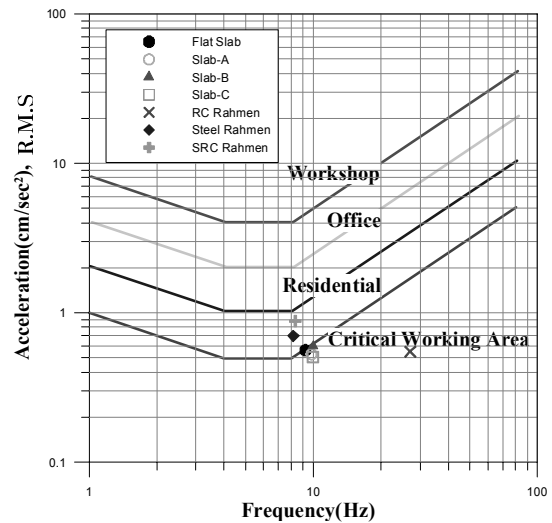
모델	탁월진동수(Hz)	보행하중 주파수(Hz)	보행하중 주기(sec)
플랫폼슬래브	9.2272	1.8454 (9.2272/ 5)	0.542
중공 슬래브	Slab-A	9.8101	1.9620 (9.8101/ 5)
	Slab-B	9.9719	1.9944 (9.9719/ 5)
	Slab-C	9.9945	1.9989 (9.9945/ 5)
RC 라멘조	27.1082	1.9363 (27.1082/14)	0.516
철골 라멘조	철골 기둥	8.1545	2.0386 (8.1545/ 4)
	SRC 기둥	8.3271	2.0818 (8.3271/ 4)

〈표 10〉 탁월진동수에 맞춘 보행하중진동수를 사용한 경우의 모델별 응답

모델	최대 변위 (cm)	최대 속도 (cm/sec)	최대 가속도 (cm/sec ²)	RMS가속도 (cm/sec ²)	
플랫슬래브	1.848×10 ⁻³	4.397×10 ⁻²	2.198	0.5604	
중공 슬래브	Slab-A	1.919×10 ⁻³	3.677×10 ⁻²	1.936	0.5271
	Slab-B	2.306×10 ⁻³	3.609×10 ⁻²	1.977	0.5979
	Slab-C	2.023×10 ⁻³	3.181×10 ⁻²	1.743	0.5027
RC 라멘조	1.388×10 ⁻³	2.839×10 ⁻²	4.013	0.5492	
철골 라멘조	철골 기둥	3.899×10 ⁻³	4.863×10 ⁻²	2.293	0.7013
	SRC 기둥	4.312×10 ⁻³	5.897×10 ⁻²	3.068	0.8828



〈그림 14〉 일본건축학회 기준에 따른 진동성능평가



〈그림 15〉 ANSI(S3.29) 기준에 따른 진동성능평가

탁월진동수 보행하중을 가했을 경우의 응답이 크게 늘어 모든 2방향 중공슬래브 모델에 비해 불리한 결과를 얻었다. RMS 가속도 응답을 비교하여 보아도 2방향 중공슬래브의 진동성능이 다른 슬래브 시스템에 비하여 우수하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 Slab B 모델의 경우 부피가 크게 줄어들어 RC 라멘조 모델보다 불리한 응답을 보였다.

5. 2방향 중공슬래브의 진동성능평가

본 장에서는 앞 장에서 구한 탁월진동수를 가지는 보행하중에 대한 각 모델별 슬래브의 진동응답을 일본건축학회와 미국표준협회에서 제안하는 진동성능평가기준을 토대로 검토하여 보았다.

5.1 일본건축학회 제안기준 적용

본 절에서는 일본건축학회에서 제안하는 진동성능평가곡선을 사용하여 앞 장에서 수행한 탁월진동수를 가지는 보행하중을 사용했을 때의 해석결과를 토대로 각 슬래브의 진동

성능을 평가하였다. 각 모델별 가속도 응답의 최대값을 그림 14에 나타낸 바와 같이 진동성능평가곡선에 표시하였다. 그림 14을 보면 모든 모델이 V-3수준을 만족하여 일반사무소 등급1에 적합한 진동수준으로 판정되었다. 특히 Slab C 모델과 RC 라멘조 모델은 V-1.5수준을 보여서 보다 뛰어난 진동성능을 나타내는 것을 알 수 있다.

5.2 미국표준협회 제안기준 적용

미국표준협회에서 제안하는 진동성능평가곡선을 이용하여 앞서 일본건축학회 제안곡선에 적용한 방법과 동일하게 각 슬래브의 진동성능을 평가하였다. 다만 미국표준협회에서 제안하는 진동성능평가곡선은 최대 가속도응답이 아니라 RMS 가속도 응답을 기준으로 평가하므로 그림 15에 나타낸 바와 같이 각 슬래브별 RMS 가속도 응답을 진동성능평가곡선에 표시하였다. 진동성능평가곡선을 기준으로 평가해보면 모든 경우에 있어 사무실에서 요구하는 성능기준을 만족함을 볼 수 있다. 특히 철골조 모델을 제외하고는 정밀 실험실 수준을 만족함을 확인 할 수 있다. 미국표준협회 제

안기준에서는 2방향 중공슬래브 모델별 응답의 차이가 크지 않아 보다 우수한 진동성능을 가지는 모델을 판별하기는 어렵지만, 기존 철골라멘조에 비하여 뛰어난 진동성능을 가짐을 확인 할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 보행하중을 사용하여 3가지의 중공형상을 가지는 2방향 중공슬래브 시스템과 기존의 라멘조 및 플랫 슬래브 시스템에 대한 진동성능평가를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 2방향 중공슬래브 시스템의 바닥진동성능은 상당량 슬래브의 체적이 감소되었음에도 기존의 시스템에 비하여 크게 저하되지 않으며, 오히려 많은 경우에 진동성능이 향상됨을 알 수 있다. 특히 Slab C 모델의 경우 솔리드 슬래브에 비하여 36%의 체적감소율에도 가장 우수한 진동성능을 나타내므로 본 연구에서 사용된 2방향 중공슬래브 모델 중 가장 효과적이라고 판단된다.
2. 탁월진동수를 고려한 보행하중에 대한 진동해석결과를 바탕으로 일본건축학회 진동성능기준 및 미국표준협회 진동성능기준을 적용해보면 모든 2방향 중공슬래브 모델이 사무실 수준의 진동성능을 만족하고 있는 것으로 나타났다.
3. 보다 정확한 진동성능의 평가를 위하여 향후 2방향 중공

슬래브 시스템이 적용된 건물이나 실험체를 대상으로 실제 보행하중 가진 실험을 통한 진동성능검토가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 삼성 중공업(주)의 지원으로 이루어졌으며, 지원 기관에 깊은 감사를 표합니다.

참고 문헌

1. 김기철, 김광만, “중공슬래브 바닥판의 진동 및 충격음 특성에 관한 실험연구,” 대한건축학회논문집, 제23권, 59-69, 2007.
2. 日本建築學會, “建築物の振動に關する居住性能評價指針 同解説,” 1991.
3. ANSI S3.29, “Guide for the Evaluation of Human Exposure to Vibration in Buildings,” 1983.
4. 이성수, 전호민, 이종원, 홍갑표, “바닥진동 평가방법에 사용된 평가척도의 비교분석,” 대한건축학회논문집, 제22권, 3-10, 2006.
5. 최원호, 김기철, 이동근, “보행 이동하중 효과를 고려한 건물 바닥판의 진동평가,” 대한건축학회학술발표논문집, 제19권, 69-74, 1999.
6. 박강근, 김용태, 최영화, 김한철, “공동주택 바닥판의 진동해석 및 평가,” 춘계학술발표회 논문집, 한국철골공간구조학회, 제3권, 246-255, 2006.
7. Chopra, *Dynamics of Structures*, Prentice Hall, New Jersey, 2000, pp.844.