

2방향 중공슬래브의 진동성능 검토

Investigation of Vibration Performance of Biaxial Hollow Slab

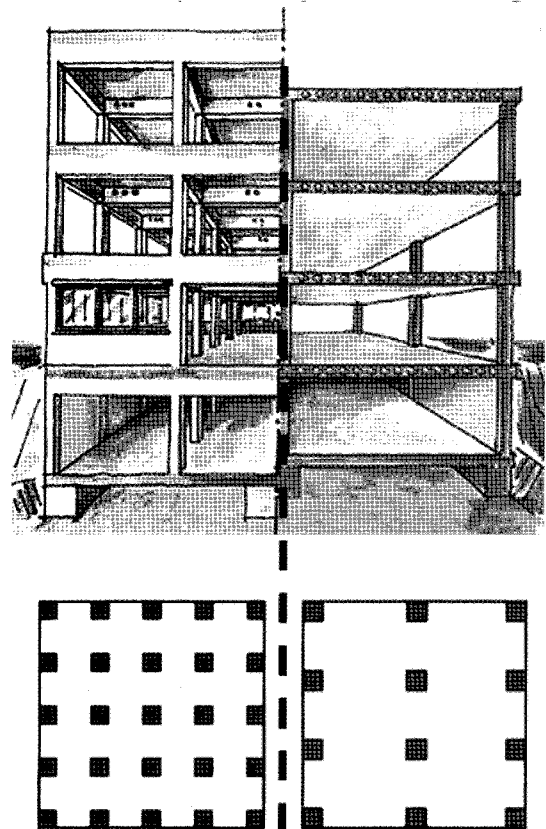


김 현 수*
Kim, Hyun-Su

1. 서론

최근 국내에서는 층간소음 감소를 위하여 건설교통부에서 '바닥충격음 차단성능 기준'이 제정되어 슬래브 차음성능에 대한 관심이 더욱 커지고 있다²⁾. 이에 대응하여 적절한 슬래브 두께 증가가 요구되고 있다. 그러나 이러한 슬래브의 두께 증가는 자중을 증가시키고 지진하중이 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 있다³⁾. 그래서 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 다양한 바닥판 시스템 개발이 진행되어 왔는데 <그림 1>에 나타난 중공슬래브는 이러한 바닥판 시스템중의 하나이다.

일반 RC 라멘조 중공슬래브



<그림 1> 일반 RC 라멘조와 중공슬래브 시스템의 비교

* 정회원 · 선문대학교 건축학부 조교수, 공학박사

중공슬래브는 슬래브 내부에 중공을 설치하여 슬래브의 자중을 줄이는 시스템으로 중공의 배치에 따라 한쪽 방향으로 파이프 형태의 중공을 배치하는 1방향 중공슬래브와 양쪽 방향으로 공 형태의 중공을 배치하는 2방향 중공슬래브로 구분된다. 중공슬래브는 중공에 의해 생기는 T 형태의 단면이 힘에 효율적으로 저항하므로 속이 짝 찬 일반적인 솔리드 슬래브에 비하여 휨강성이 크게 저하되지 않는 장점이 있다. 1방향 중공슬래브의 경우에는 한 방향으로만 T 형 단면을 가지는데 비해 2방향 중공슬래브는 양방향 모두 T 형 단면을 가져 양방향으로 힘에 저항하는 특성이 있다.

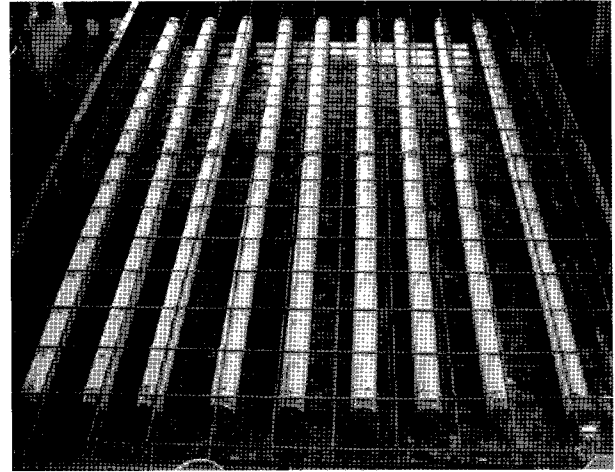
또한 <그림 2>에 나타낸 바와 같이 일반적으로 2방향 중공슬래브가 1방향 중공슬래브에 비하여 슬래브의 자중을 더 크게 감소시킬 수 있다. 2방향 중공슬래브는 일반적인 슬래브 시스템에 비하여 건물의 층고를 낮출 수 있기 때문에 공동주택 및 오피스 등에서 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

이러한 2방향 중공슬래브는 기존의 구조시스템과 동적특성이 크게 다르고 중공형상에 따라 바닥시스템의 질량과 강성이 변화한다. 따라서 근래에 바닥진동에 따른 사용성 문제가 중요시 되고 있는 상황에서 2방향 중공슬래브가 널리 사용되기 위해서는 바닥진동성능에 대한 평가가 반드시 필요하다.

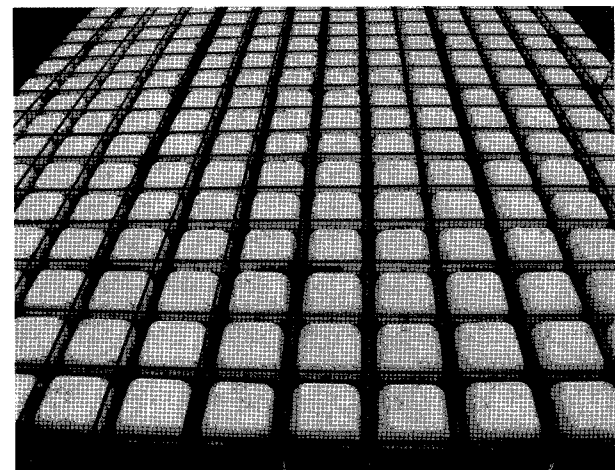
이러한 필요성을 바탕으로 본 연구에서는 보행하중이 가해지는 2방향 중공슬래브의 시간이력해석을 수행하였고 해석결과를 바탕으로 진동성능평가를 하였다.

진동성능의 평가를 위하여 일본건축학회 제안기준⁴⁾과 미국 표준협회(ANSI) 제안기준⁵⁾을 사용하였다. 기존 슬래브 시스템에 대한 2방향 중공슬래브의 진동특성을 비교하기 위하여 RC 라멘조 및 철골 라멘조, 그리고 플랫 슬래브 시스템을 예제구조물로 사용하였다.

2방향 중공슬래브도 중공의 형상에 따라서 진동특성이 달라지므로 사용 가능한 몇 가지 중공형상에 따라서 진동특성을 평가하였다. 해석에 사용한 하중은 가장 불리한 상황에서의 슬래브의 응답을 검토하기 위하여 탁월진동수에 맞춰 공진할 수 있는 보행하중 진동수를 각 모델에 맞도록 계산하였다.



a) 1방향 중공슬래브



b) 2방향 중공슬래브

<그림 2> 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.⁶⁾ 본 연구에서는 일본건축학회와 미국표준협회에서 제안하는 기준으로 진동성능을 평가하였다. 본 장에서는 두 기준에 대해서 간략히 소개한다.

2.1 일본건축학회 제안기준

일본건축학회에서는 구조물의 바닥에서 발생하는 연직진동을 평가하기 위해서 1991년에 국제표준화기구(ISO)의 진동성능평가기준을 바탕으로 하여 “건축물의 진동에 관한 거주성능 평가지침”을 제정하였다.

일본건축학회에서는 진동을 <표 1>과 같이 연속진동 또는 충격진동으로 분류하였고 건축물 실의 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.

<표 1> 일본건축학회 진동성능평가기준의 진동분류

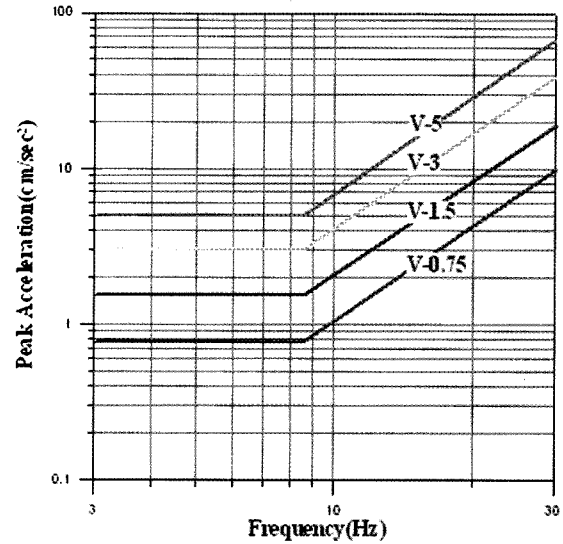
진동종별	내 용
1	연속진동 및 간헐적으로 반복하여 발생하는 진동을 받는 바닥
2	충격진동을 받는 감쇠성이 낮은 바닥, 감쇠 3%이하
3	충격진동을 받는 감쇠성이 높은 바닥, 감쇠 3-6%정도

<표 2> 일본건축학회 진동성능평가기준

건축물 종별등급	건축물 실용도	진동종별 I			진동 종별 2	진동 종별 3
		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
	회의, 응접실	V-1.5	V-3	V-5	V-10	V-30
사무 소	일반사 무소	V-3	V-5	V-5 정도	V-10 정도	V-30 정도

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 3>에 나타난 바와 같이 정밀한 작업을 요하는 중요한 작업 장소에 대하여



<그림 3> 일본건축학회 진동성능평가곡선

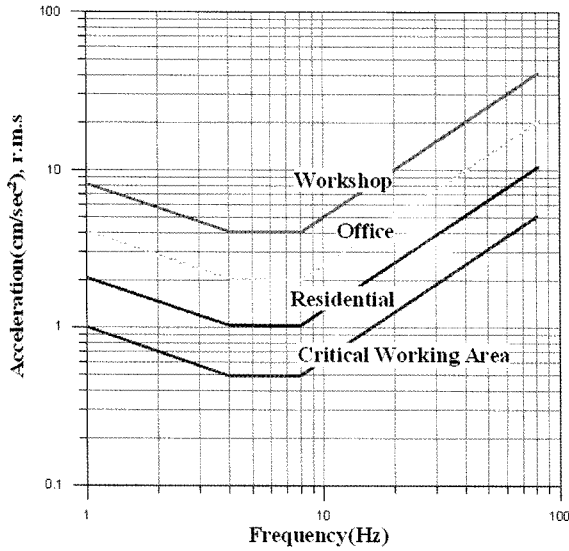
특별히 기준을 제시하였고 낮과 밤에 따라서 평가의 기준을 다르게 제시하였다. 이러한 평가기준을 바탕으로 작성한 진동성능 평가곡선을 <그림 4>에 나타내었다.

<표 3> ANSI(S3.29) 진동성능평가기준

장 소	시 간	가속도(cm/sec²)
중요한 작업장소 (병원의 수술실, 정밀도를 요하는 실험실)	낮/밤	0.5
주거지역	낮	1-2
	밤	0.7
사 무 실	낮/밤	2
작 업 장	낮/밤	4

3. 예제구조물 및 보행하중

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



〈그림 4〉 ANSI(S3.29) 진동성능평가곡선

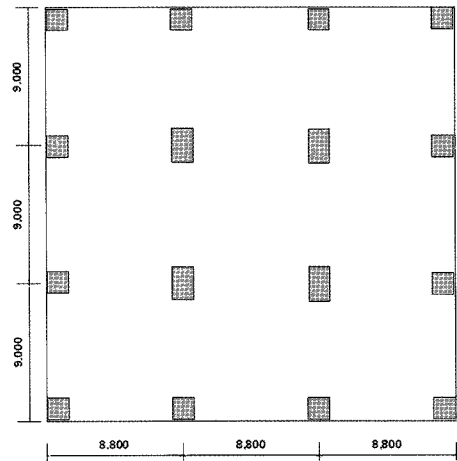
3.1 예제구조물 개요

본 연구에서는 사용한 예제구조물의 평면을 〈그림 5와 6〉에 나타내었다.

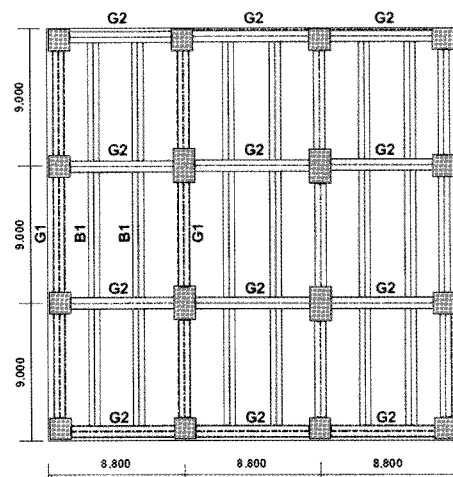
〈그림 5〉에 2방향 중공슬래브 및 플랫폼슬래브 시스템을 나타내고 〈그림 6〉은 일반적인 RC 라멘조 및 철골 라멘조 시스템을 나타낸다. 두 시스템 모두 양방향 3경간 구조물로서 가로방향의 경간은 8.8m이고 세로방향의 경간은 9m이다. 철골 라멘조 시스템의 경우에 Steel 기둥을 사용하는 구조물과 SRC 기둥을 사용하는 구조물의 두 가지 예제구조물을 사용하였다.

플랫폼슬래브 및 라멘조(RC, 철골)구조의 경우 예제구조물의 스팬에서 범용적으로 통행되는 구조설계를 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 4〉에 나타내었다.

중공슬래브 시스템의 경우 중공부의 형상에 따라 〈그림 7〉에 나타낸 3가지 형태의 중공슬래브 시스템을 사용하였다. 각 중공 슬래브에 사용된 중공부의 형태를 상세히 표현하여 〈그림 8〉에 나타내었다. 먼저 〈그림 7〉에서 첫 번째 슬래브는 중공부분이 없는 일반적인 솔리드 슬



〈그림 5〉 플랫폼슬래브 및 중공슬래브 시스템

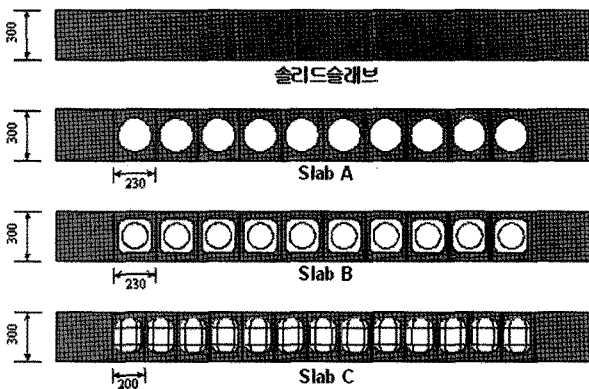


〈그림 6〉 RC 라멘조 및 철골 라멘조 시스템

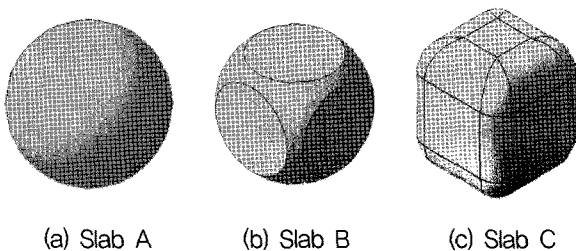
〈표 4〉 예제구조물의 부재 및 단면 크기

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
	슬래브	R.C.	150mm
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

래브를 사용한 플랫폼슬래브 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.



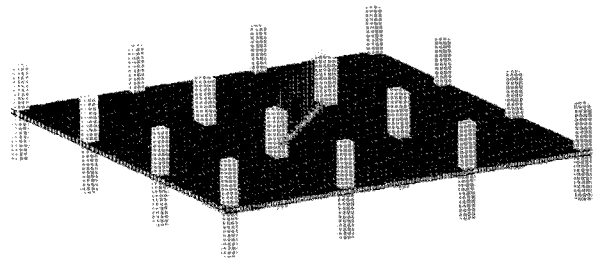
〈그림 7〉 중공형상에 따른 중공슬래브 시스템



〈그림 8〉 각 중공슬래브 모델에 사용된 중공형상

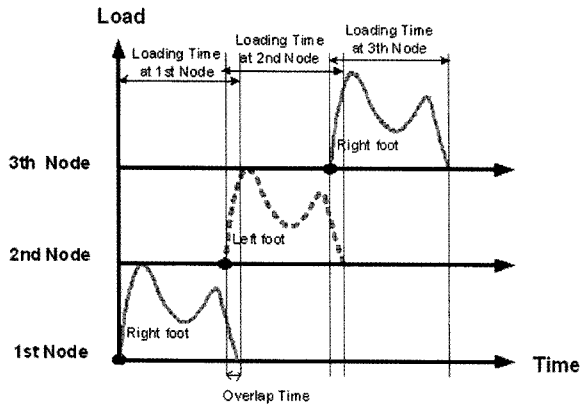
3.2 보행하중을 적용한 진동해석

본 연구에서는 보행하중이 가해지는 2방향 중공슬래브의 진동성능을 평가해보기 시간이력해석을 수행하였다. 시간이력해석을 위한 감쇠비는 모든 예제모델에 대하여 3%를 적용하였다. 보행하중은 〈그림 9〉에 나타난 바와 같이 예제구조물의 중앙부에 위치한 슬래브에 가하였고 가장 큰 진동을 유발할 수 있도록 보행자가 대각선 기동방향으로 이동하도록 하였다. 보행하중의 간격은 실제 보행자의 보폭과 슬래브의 요소간격을 고려하여 85cm로 하였다.

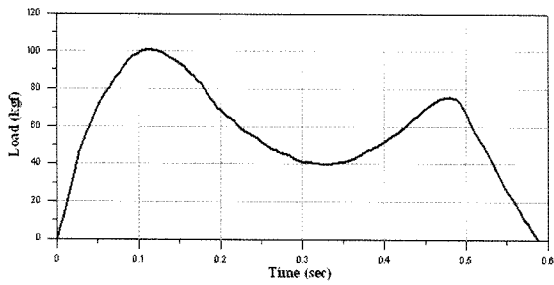


〈그림 9〉 보행하중을 나타낸 구조해석모델

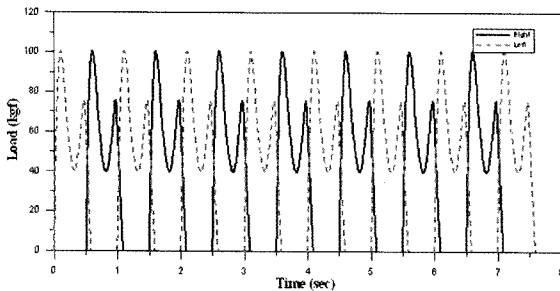
보행하중은 일본 건축학회 RC규준에서 보행에 의한 충격량을 $0.3 \text{ kgf} \cdot \text{sec}$ 로 정의하고 이를 지속시간 0.04초의 반정현파 충격하중으로 가정하여 제시하고 있다. 그러나 보행자의 이동을 고려하는 경우에는 적합하지 않으므로 본 연구에서는 Bachmann등이 제시하는 보행자의 1Step하중을 사용하였다. 보행하중의 적용방법은 〈그림 9〉의 하중위치에 1step에 해당하는 하중을 보행하중의 간격(85cm)에 따라 순차적으로 가력 하였다. 이때, 바닥판에서 두 발이 동시에 바닥에 닿는 시간간격을 중복시켜 〈그림 10〉과 같이 각 절점에 작용시킴으로써 사람이 보행하는 경우 왼발과 오른발의 영향을 고려하도록 하였다.⁷⁾ 해석에 사용한 보행하중은 75kg의 몸무게를 가지는 사람의 것으로 가정하였고 이를 〈그림 11〉에 나타내었다. 본 연구에서는 가장 불리한 상황에서의 슬래브의 응답을 검토하기 위하여 탁월진동수를 적용한 보행하중을 사용하였다.



〈그림 10〉 보행하중의 적용방법



(a) 보행하중 1step



(b) 보행하중 시간이력

〈그림 11〉 해석에 사용된 보행하중

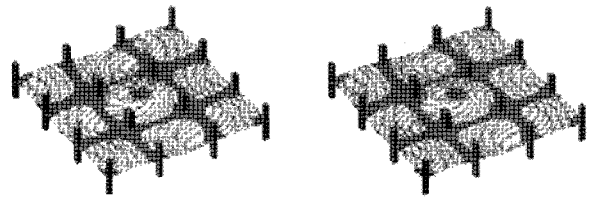
4. 해석결과

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 검토하

여 보았다. 예제 구조물의 응답측정점은 가운데 슬래브의 중앙점으로 하였다.

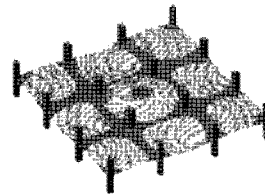
각 모델별로 가장 불리한 조건의 보행하중을 가하여 극한 상황에 대한 2방향 중공슬래브의 진동성능을 평가하기 위하여 각 모델별 탁월진동수를 구하고 탁월진동수에 맞추어 보행하중을 가하였다.

각 모델별 탁월진동수를 결정하기 위하여 〈그림 12〉에 나타낸 바와 같이 슬래브의 모드형상을 검토하였고 응답

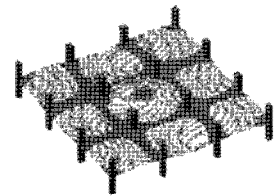


(a) 플랫슬래브
9차모드 (9.2272Hz)

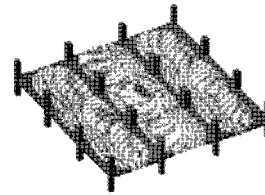
(b) Slab A
9차모드 (9.810Hz)



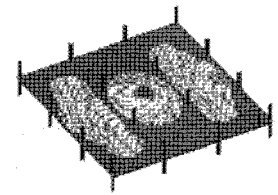
(c) Slab B
9차모드 (9.9719Hz)



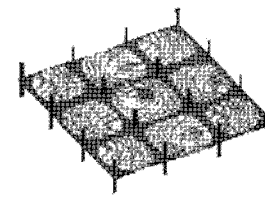
(d) Slab C
9차모드 (9.9945Hz)



(e) RC 라멘조
1차모드 (27.1082Hz)



(f) 철골라멘조(철골기둥)
2차모드 (8.1545Hz)



(g) 철골라멘조(SRC기둥)
2차모드 (8.327Hz)

〈그림 12〉 슬래브별 탁월진동수를 나타내는 모드의 형상

측정점에서 가장 큰 진폭을 나타내는 모드의 진동수를 탁월진동수로 선택하였다. 이렇게 결정된 탁월진동수에 공진을 일으킬 수 있도록 보행하중 진동수를 조정하면 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 5>에 나타내었다.

<표 5> 슬래브 모델별 탁월진동수 및 보행하중 주기

모델	탁월진동수 (Hz)	보행하중 주파수(Hz)	보행하중 주기(sec)	
플랫슬래브	9.2272	1.8454 (9.2272/ 5)	0.542	
중공 슬래브	Slab-A	9.8101	1.9620 (9.8101/ 5)	0.510
	Slab-B	9.9719	1.9944 (9.9719/ 5)	0.501
	Slab-C	9.9945	1.9989 (9.9945/ 5)	0.500
RC 라멘조	27.1082	1.9363 (27.1082/14)	0.516	
철골 라멘조	철골 기둥	8.1545	2.0386 (8.1545/ 4)	0.491
	SRC 기둥	8.3271	2.0818 (8.3271/ 4)	0.480

탁월진동수에 맞춘 보행하중진동수를 사용하여 해석한 결과를 각 모델별 응답을 <표 6>에 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 확인할 수 있다. 이를 통해서 2방향 중공슬래브의 진동성능은 중공부의 부피뿐만 아니라 형상에 의해서 크게 좌우되는 것을 알 수 있다. 플랫슬래브 모델의 경우 2Hz 진동수로 보행하중을 가하였을 때 보다 탁월진동수 보행

하중을 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.

<표 6> 탁월진동수에 맞춘 보행하중진동수를 사용한 경우의 모델별 응답

모델	최대 변위 (cm)	최대 속도 (cm/sec)	최대 가속도 (cm/sec ²)	RMS 가속도 (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

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 진동성능을 평가하였다. 각 모델별 가속도 응답의 최대값을 <그림 13>에 나타낸 바와 같이 진동성능평가곡선에 표시하였다. <그림 13>을 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 가속도 응답이 아니라 RMS 가속도 응답을 기준으로 평가하므로 <그림 14>에 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 제안기준에서는 2방향 중공슬래브 모델별 응답의 차이가 크지 않아 보다 우수한 진동성능을 가지는 모델을 판별하기는 어렵지만, 기존 철골라멘조에 비하여 뛰어난 진동성능을 가짐을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 보행하중을 사용하여 3가지의 중공형상을 가지는 2방향 중공슬래브 시스템과 기존의 라멘조 및 플랫슬래브 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 진동해석결

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

-감사의 글-

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호# '06 건설핵심 B03)에 의해 수행되었습니다.

-참고문헌-

1. 우은택, 박태원, 정란 (2000), "건축구조물의 슬래브 진동에 의한 사용성 평가 연구", 한국지진공학회 추계학술발표대회논문집, pp.245~250.
2. 박강근, 김용태, 최영화, 김한철 (2006), "공동주택 바닥판의 진동해석 및 평가", 한국셀공간구조학회 춘계학술발표대회 논문집, 3권, 1호, pp.246~255.
3. 박칠림, 김문한 (1995), "Half Slab와 Half PC Beam을 이용한 T형보의 構造性能 評價를 위한 實驗的 研究", 대한건축학회 논문집, 11권, 2호, pp.137~143.
4. 日本建築學會 (1991), 建築物の振動に關する居住性能評價指針 同解説.
5. ANSI S3.29 (1983), Guide for the Evaluation of Human Exposure to Vibration in Buildings.
6. 이성수, 전호민, 이종원, 홍갑표 (2006), "바닥진동 평가방법에 사용된 평가척도의 비교분석", 대한건축학회논문집, 제22권, pp.3-10
7. 최원호, 김기철, 이동근 (1999), "보행 이동하중 효과를 고려한 건물 바닥판의 진동평가", 대한건축학회학술발표논문집, 제19권, pp.69-74