

바닥 슬래브 진동 특성을 이용한 바닥충격음 요인 분석 연구 : 유효 평면

The Study on Characteristic of Floor Impact Noise using the Structural Vibration on Floor Slab : Effective Plate

김 태 민* · 배 진 영* · 양 홍 석†

Tae-Min Kim*, Jin-Young Bae* and Hong-Seok Yang†

(Received May 11, 2020 ; Revised June 5, 2020 ; Accepted June 16, 2020)

Key Words : Floor Impact Noise(바닥충격음), Structural Vibration(구조 진동), Effective Plate(유효 평면), Modal Test(모달 테스트), Modal Density(모드 밀도)

ABSTRACT

In this study, a new method was proposed to set the area of a living room based on the vibration behavior of the floor slab. The area of a living room studied in this study was named as the "effective plate" which was referred to the plate theory. To investigate the influence of the effective plate on floor impact noise, a modal test was conducted, and the floor impact noise was measured in a mock-up structure with two different living room sizes with non-floating slabs. As a result, it was found that the similar vibration responses and floor impact noises were obtained for the different living room sizes. This was because although there was about 34 % difference in floor area of the two living rooms, the effective plates of those cases were same as 40 m². In the high frequency range with sufficient mode density, similar vibration responses were obtained because the effective plates were similar in size, resulting in similar floor impact noises. In contrast, however, for the frequency bands below 100 Hz with low mode density, significant differences in the vibration responses were observed due to the shape of the plate and location of the load-bearing wall. Consequently, it was determined that the living room shape and boundary condition, such as position of load-bearing wall, were the main influencing factors for floor impact noise in the low frequency range, whereas the size of the plate was the main influencing factor in the high frequency range. This means that it is necessary to consider the frequency band in the design of a floating floor to effectively reduce the floor impact noise.

1. 서 론

바닥충격음을 저감하기 위해 많은 연구가 진행되

고 있으며, 국내의 경우 맨발로 생활하는 거주 문화 특성 상 저주파 대역의 소음 피해가 공동주택 소음 민원 중 많은 비중을 차지한다. 따라서 국내의 경우 이러한 바닥충격원의 주파수 특성을 고려하여 증량층

† Corresponding Author ; Member, Land and Housing Institute, Korea Land and Housing Cooperation, Reasearcher
E-mail : ktaemin@lh.or.kr

* Member, Land and Housing Institute, Korea Land and Housing Cooperation, Reasearcher

A part of this paper was presented at the KSNVE 2019 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Jong Kwan Ryu

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

격음과 경량충격음으로 구분하여 KS F 2810과 KS F 2863에서 바닥충격음을 측정 및 평가하고 있다. 중량충격음은 1/1 옥타브 밴드의 63 Hz ~ 500 Hz까지를 뱅머신을 이용하여 측정하며⁽¹⁾, 경량충격음은 1/1 옥타브 밴드의 125 Hz ~ 2000 Hz까지를 태핑머신을 이용하여 측정한다⁽²⁾.

일반적으로 바닥충격음을 저감하기 위해 완충재를 적층한 표준바닥구조⁽³⁾를 적용하거나, 슬래브 두께를 증가시키는 방법을 적용한다. 완충재를 이용한 방법은 절연기(isolator)를 이용하여 에너지 전달을 저감시키는 방법으로⁽⁴⁾, 경량충격음에 효과가 큰 것으로 알려져 있다^(5,6). 바닥 슬래브의 두께를 증가하는 방법은 슬래브의 굽힘 강성을 증가시켜 진동 응답 크기를 저감시키는 방법으로⁽⁷⁾, 국내에서는 최소 슬래브 두께를 규정하여 2015년도에는 210 mm 이상으로 슬래브 두께를 규정하고 있다⁽³⁾.

하지만 저주파 대역을 측정하는 중량충격음의 경우, 완충재를 적용한 표준바닥구조 및 슬래브 두께 증가가 항상 긍정적인 효과만 존재하지는 않는다. 완충재를 적용한 뜬바닥구조의 경우 완충재의 탄성계수가 구조물에 비해 상대적으로 낮기 때문에 완충재가 1-자유도 시스템의 스프링과 같이 작용한다. 따라서 뜬바닥구조에 충격 가진 시 공진 모드가 발생하며, 이러한 공진 모드에 의해 맨슬래브 대비 저주파 대역의 바닥충격음이 증폭하는 현상이 발생한다⁽⁸⁾. 슬래브 두께 증가의 경우에는 진동 모드의 변화로 인해 평가 옥타브 대역에서 소음 편차가 발생한다. 특히 저주파 대역의 개별적인 진동 모드의 영향이 크기 때문에 강성 변화에 따른 진동 응답 특성이 달라진다. 따라서 중량충격음을 저감하기 위해서는 바닥 슬래브의 진동 특성을 함께 고려해야 이상적인 바닥충격음 저감 방안 제시가 가능하다⁽⁹⁾.

하지만 공동주택의 다양한 평면 및 평형에 대해 개별적인 바닥충격음 저감 연구를 수행하기에는 한계점이 존재한다. 따라서 다양한 평면 및 평형을 분류하여 확실적인 바닥충격음 저감 방안을 마련하기 위해 거실 공간의 면적, 장·단변비 등과 같은 기하학 변수를 선정하고 있으나 실제 바닥 슬래브의 진동 거동을 대변하지는 못하여 바닥충격음의 상관성을 제시하기에는 한계가 존재한다.

이 연구에서는 다양한 구조, 평형 등에 대한 대표성을 분류할 수 있는 변수를 연구하였다. KS F 2810

에서는 거실 공간을 세대 내 경계벽을 기준으로 정의하고 있으나, 실제 바닥 슬래브의 진동은 부엌 및 복도가 함께 진동 거동하기 때문에 바닥 슬래브의 방사 면적을 고려한 새로운 평면의 정의가 요구된다.

이 연구에서는 벽식 실증주택을 대상으로 국내의 대표적인 평형인 전용면적 59 m²와 84 m²에서 모달 테스트와 바닥충격음을 측정하였으며, 바닥 슬래브의 진동 특성을 분석하여 진동 거동을 고려한 거실 공간을 새롭게 정의하였다.

2. 배경 이론

2.1 판의 진동

Fig. 1과 같이 유한한 크기의 평면(plate)에 입사된 파(wave)는 시스템 끝단에서 반사되어 반사파가 생성된다. 이때 반사파의 크기와 위상은 끝단 경계조건인 임피던스(impedance)에 의해 결정되며, 입사파와 반사파의 위상이 같은 경우 정재파(standing wave)가 생성된다. 이러한 현상을 모드(mode)라 하며, 정재파의 형상은 모드 형상(mode shape)이라 한다⁽⁴⁾. 평판의 모드는 판의 크기, 경계조건 및 구성하는 재료의 물성 등에 의해 결정되며, 균일한 재료로 구성된 유한한 직사각형 평판의 모든 끝단이 단순지지(simple support)로 지지되어 조건에서는 식 (1)을 이용하여 진동 모드를 이론적으로 계산할 수 있다⁽¹⁰⁾.

$$\omega_m = \sqrt{\frac{D}{\rho_t} \left[\left(\frac{n_x \pi}{l_x} \right)^2 + \left(\frac{n_y \pi}{l_y} \right)^2 \right]} \quad (1)$$

여기서, ρ_t 는 판의 면밀도(kg/m²), n_x 와 n_y 는 각 축의 모드 차수, l_x 와 l_y 는 각 축의 판의 길이(m)를 나타낸다. D 는 판의 굽힘 강성(bending stiffness) (N/m)을 의미하며 식 (2)를 이용하여 계산할 수 있으며, E 는 재료의 탄성계수(Pa), ν 는 푸아송비, h 는 판의 두께(m)를 의미한다.

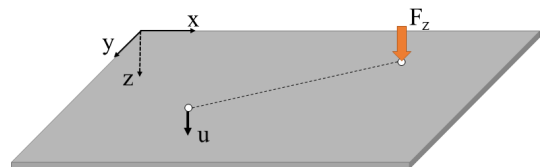


Fig. 1 Sign convention and coordinate systems for a rectangular plate excited by a point force

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \tag{2}$$

Fig. 1과 같이 가진력 F_z 가 판의 (x_1, y_1) 지점에 가 진되는 경우 (x_2, y_2) 지점의 운동(transverse displacement)은 식 (3)과 같이 정의할 수 있으며, 여기서 ψ_m 는 m 차 모드 형상, M 은 질량(kg)을 의미한다.

각 차수의 모드 형상은 식 (4)를 이용하여 계산할 수 있다. 따라서 유한한 크기의 판의 거동을 설명하기 위해서는 선형적으로 진동 모드 분석이 요구되며, 재료 물성, 판의 길이 및 경계조건이 주요 변수로 작용한다.

$$\begin{aligned} & \tilde{u}(x_2, y_2, \omega) \\ &= \sum_{r=1}^{\infty} \frac{\psi_m(x_2, y_2)\psi_m(x_1, y_1)}{M_m[\omega_m^2(1+\eta) - \omega^2]} \tilde{F}_z(\omega) \end{aligned} \tag{3}$$

$$\psi_r(x, y) = 2\sin\left(\frac{m_x\pi}{l_x}x\right)\sin\left(\frac{m_y\pi}{l_y}y\right) \tag{4}$$

2.2 판의 모드 밀도

주파수 대역을 옥타브 대역으로 변환하는 경우 대역 내 포함된 모드들을 중첩하여 응답을 설명하며, 여기서 각 모드 기여도는 모드 밀도에 따라 상이한 특성을 보유하게 된다. 모드 밀도(mode density)란 단위 주파수 당 평균 모드의 수로 정의되며, 식 (5)를 이용하여 계산 할 수 있다. 여기서, N 은 옥타브 내 존재하는 모드 개수, $\Delta\omega$ 는 옥타브 대역폭을 나타낸다.

$$n(\omega) = \frac{N}{\Delta\omega} \tag{5}$$

즉, 모드 밀도가 적으면 옥타브 내 존재하는 모드 개수가 적기 때문에 개별적인 모드 기여도가 높으며, 모드 밀도가 높으면 옥타브 내 모드의 중첩으로 인하여 개별적인 모드 특성이 저감된다.

공동주택 내 발생하는 바닥충격원의 진동 에너지 전달은 굽힘파(bending wave) 형태로 전달되며, 굽힘(bending) 진동에 대한 모드 밀도는 식 (6)과 같이 정의된다⁽¹¹⁾. 여기서 h 는 슬래브의 두께(m), c_l 은 판의 종파 속도(longitudinal wave speed)를 나타낸다.

$$n = \frac{\sqrt{3}}{hc_l} \tag{6}$$

2.3 판의 소음 방사

진동하는 판의 표면에서 음이 발생하는 현상을 음향 방사(acoustic radiation)라 하며, 무한한 크기의 구조물에서 음향 공간으로 방사되는 공간 평균 음향 파워는 식 (7)과 같이 정의할 수 있다⁽¹¹⁾.

$$W_{rad} = \langle v \rangle^2 \rho_0 c_0 A \sigma_{rad} \tag{7}$$

여기서 v 는 구조물의 진동 속도(transverse velocity), ρ_0 는 공기의 밀도(kg/m³), c_0 는 공기의 음속(m/s), A 는 판의 면적(m²), σ_{rad} 는 방사효율(radiation efficiency)를 나타낸다.

구조물의 공간 평균 진동 속도(space-average mean-squared transverse velocity)는 식 (8)과 같이 하중 F 에 대해 공간 평균속도를 구할 수 있다.

$$\langle v \rangle^2 = \frac{G_{dp}}{\omega\eta\rho_t A} F^2 \tag{8}$$

여기서, η 는 손실계수(loss factor), ρ_t 는 판의 면밀도(kg/m²), κ 는 $h/\sqrt{12}$, G_{dp} 는 가진점에서의 모빌리티(driving point mobility)를 나타낸다. 평판의 G_{dp} 는 식 (9)를 이용하여 이론적으로 계산할 수 있다⁽¹¹⁾.

$$G_{dp} = \frac{1}{8\rho_t\kappa c_l} \tag{9}$$

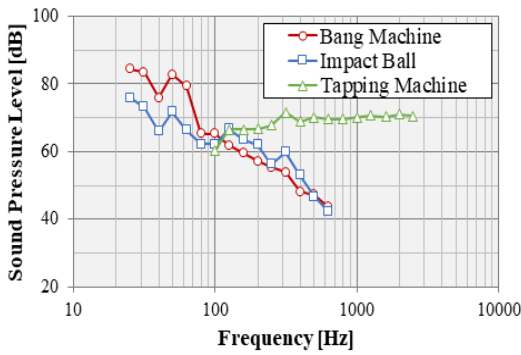
결과적으로 하중 F_z 에 의해 방사되는 음향파워는 식 (10)과 같이 계산할 수 있으며⁽¹²⁾, 여기서 ρ_0 는 공기의 밀도(kg/m³), c_0 는 공기의 음속(m/s), σ_{rad} 는 방사효율, ρ_t 는 판의 면밀도(kg/m²), c_l 은 판의 종파 속도(m/s)를 나타낸다. 상기 식과 같이 평판의 방사 파워는 구조물의 두께와 밀도 변화에 따른 영향이 큰 것을 확인할 수 있다.

$$W_{rad} = \left(\frac{\rho_0 c_0 \sigma_{rad}}{2.3 \rho_t^2 h^3 \omega \eta c_l} \right) F^2 \tag{10}$$

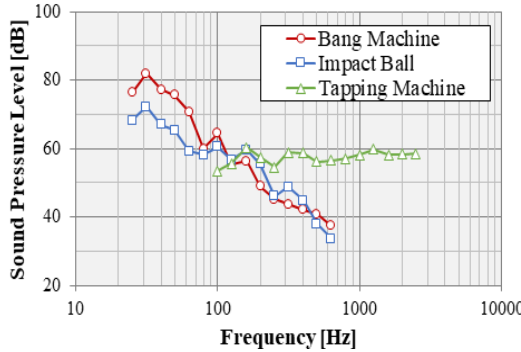
3. 바닥 슬래브 두께 및 평형에 따른 바닥충격음 측정

3.1 실증주택을 이용한 바닥충격음 측정

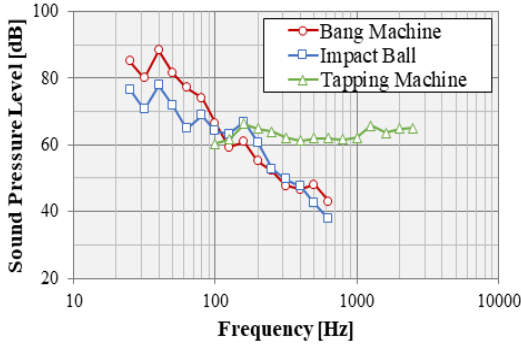
벽식구조의 실증주택을 대상으로 바닥충격음을 측정하였으며, 실증주택은 국내의 대표적인 평형인 전



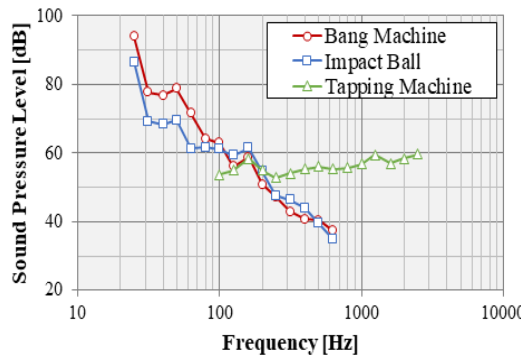
(a) 59 m², 1500 mm



(b) 59 m², 210 mm



(c) 84 m², 150 mm



(d) 84 m², 210 mm

Fig. 2 Free body diagram of the plate element

용면적 59 m²와 84 m²로 구성되어 있다. 실증주택 내 바닥 슬래브 두께 150 mm와 210 mm인 세대에서 중량충격음과 경량충격음을 측정하였으며, 중량충격음 측정 시에는 임팩트볼을 추가하였다.

실증주택의 상부층 바닥은 완충재 마감이 되지 않은 맨슬래브 상태이며, Table 1과 같이 59 m² 세대(슬래브 두께 150 mm)를 제외하고 모든 수음실에는 석고보드로 마감된 동일한 구조의 천정(120 mm)이 설치되어 있는 조건에서 바닥충격음을 측정하였다.

바닥충격음 측정 시 RION 사의 주파수 분석기 (SA-02)와 GRAS 사의 마이크로폰(146AE)을 사용하였으며, KS 2810에 의거하여 바닥충격음을 측정하였다^(1,2).

Fig. 2는 바닥충격음 측정 결과를 나타내며, 그림과 같이 맨슬래브 조건에서 중량충격음(맹머신, 임팩트 볼)은 100 Hz 이하의 저주파 대역에서 높은 소음도가 발생하고 있으며, 경량충격음은 100 Hz 이후 대역에서 비교적 균일한 소음이 발생하고 있음을 확인할 수 있다.

바닥충격음 평가 시 KS F 2863의 단일 평가량인 역 A 특성 가중 바닥충격음 레벨($L_{i,Fmax,AW}$)을 사용하고 있으며, Table 2에 측정된 바닥충격음 측정 결과를 단일 평가량으로 계산하여 정리하였다^(13,14). 추가적으로 측정결과를 A-weighting 후 전체소음도를 계산하는 단일 평가량인 A특성 가중 최대 바닥 충격음 레벨

Table 1 Test set-up of each living room

Thickness	Type	Floor	Ceiling
150 mm	59 m ²	Non-floating floor	-
	84 m ²		Coffered ceiling 120 mm
210 mm	59 m ²		
	84 m ²		

Table 2 Experimental results of floor impact noise

Impact Source	Flat information		Single number quantity	
	Type	Thickness	$L_{i,Fmax,AW}$	$L_{iA,Fmax}$
Bang Machine	59	150	55	60.1
	84		54	59.1
	59	210	50	53.9
	84		51	55.3
Impact Ball	59	150	54	59.0
	84		53	57.3
	59	210	47	51.9
	84		48	52.7
Tapping Machine	59	150	77	72.2
	84		71	65.2
	59	210	65	60.1
	84		65	58.2

($L_{iA, Fmax}$)을 함께 정리하였다⁽¹⁵⁾. 이 실증주택의 전용면적 59 m²과 84 m²의 거실 크기가 각 13.4 m²와 20.1 m²으로 약 34 % 차이가 존재하지만 동일 슬래브 두께 조건에서 1 dB편차 수준으로 유사한 역 A 가중 바닥 충격음 레벨($L_{i, Fmax, AW}$)이 분석되었다. A 특성 가중 최대 바닥충격음 레벨($L_{iA, Fmax}$) 측면에서도 태핑머신 가진 시 최대 1.9 dB 편차로 유사하게 분석되었다. 슬래브 두께가 150 mm에서 60 mm(약 30 %) 증가

시 이론적으로 약 4.4 dB의 바닥충격음 저감 효과를 기대할 수 있으며⁽¹²⁾, 임팩트볼 가진시 평균적으로 약 6 dB 저감효과가 존재하였으며 (뱅머신 가진시는 평균 4 dB 저감), 임팩트볼 가진 시 역 A 특성 가중 바닥 충격음 레벨에서 최대 7 dB(A특성 가중 최대 바닥 충격음 레벨은 7.1 dB)의 바닥충격음 저감 효과가 존재하였다.

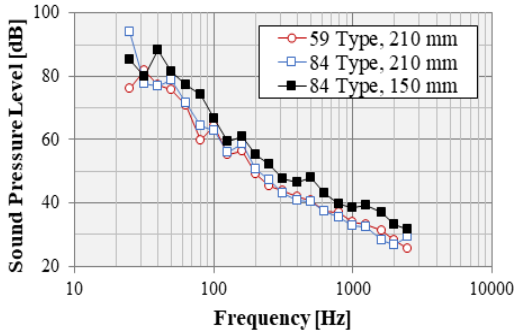
3.2 슬래브 두께 변화에 따른 바닥충격음

Table 2와 같이 슬래브 두께가 동일한 조건에서는 바닥충격음 단일평가량이 평면에 무관하게 유사한 측정 결과가 도출되었다. 옥타브 대역에서 바닥충격음 측정 결과를 비교하기 위해 Fig. 3과 같이 수음실 조건(석고 보드 마감 120 mm 전정)이 동일한 59 type(210 mm)와 84 type(150 mm, 210 mm)의 총 3세대에 대한 측정 결과를 충격원 별로 구분하여 도시화 하였다.

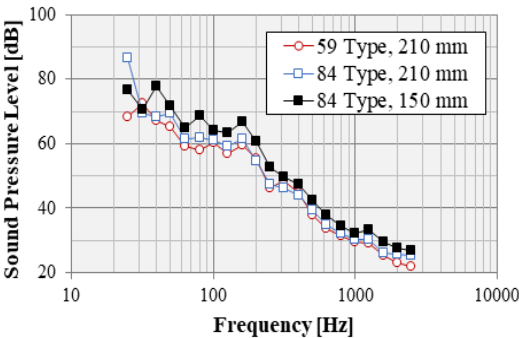
Fig. 3(a)는 뱅머신, Fig. 3(b)는 임팩트 볼에 대한 중량충격음 결과로, 중량충격음은 1/1 옥타브 밴드의 (63 ~ 500) Hz까지 측정한다. 일반적으로 뱅머신의 충격력은 약 100 Hz 이하, 임팩트 볼은 약 200 Hz 이하에 집중되어 있어 가진력 스펙트럼에서 차이가 존재한다⁽¹⁶⁾. Fig. 3(a)와 3(b)에서 확인할 수 있듯이 100 Hz 이하 대역에서는 슬래브 두께 및 평면에 따라 경향성이 존재하지 않지만, 100 Hz 이상의 옥타브 대역에서는 슬래브 두께가 동일한 경우 평면에 무관하게 유사한 측정 결과를 확인할 수 있다. 또한, 슬래브 두께 증가 시 전체 옥타브 대역에서 유사한 소음 저감 효과를 확인할 수 있다.

반면, Fig. 3(c)는 태핑머신을 이용한 경량충격음으로, 1/1 옥타브 대역의 125 Hz ~ 2000 Hz까지 평가하고 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이 경량충격음은 평면에 무관하게 슬래브 두께가 동일한 경우 전체 옥타브 대역에서 유사한 측정 결과가 도출되었으며, 슬래브 두께 증가 시 각 옥타브에서 약 5 dB 소음 저감 효과를 확인할 수 있다.

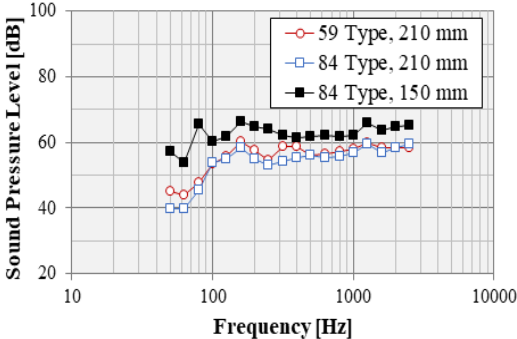
결과적으로 이 연구 대상의 실증주택의 경우 100 Hz 이상의 옥타브 대역에서는 슬래브 두께가 동일한 경우 충격원 및 평면 형태에 무관하게 유사한 바닥충격음 측정 결과가 측정되었다. 반면 100 Hz 이하 대역에서는 상대적으로 평면 및 슬래브 두께의 변화에 따라 바닥충격음 측정 결과가 차이가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 거실 평면 또는 평형에 따



(a) Bang machine



(b) Impact ball



(c) Tapping machine

Fig. 3 Comparison of floor impact sound on same experiment condition

라 바닥충격음에 유리한 것으로 알려져 있으나, 이 연구의 대상 실증주택에서는 다른 평면에서 유사한 바닥충격음 결과가 도출되었다. 바닥충격음 측정 결과가 동일한 것은 두 평면의 거실 바닥이 동일한 음향 파위를 방사하고 있는 것을 의미하며, 이를 분석하기 위해 각 평형의 거실 공간에 대한 평면 분석을 수행하였다.

4. 유효 평면을 이용한 바닥충격음 영향 분석

4.1 바닥 슬래브의 모달 테스트

바닥충격음은 바닥 슬래브 진동에 의해 방사되는 구조-소음(vibro-acoustics) 현상으로(17), 슬래브 진동 특성과 밀접한 관련이 있다. 따라서 바닥 충격음과 관련된 거실 공간의 평면을 분석하기 위해 선행적으로 바닥충격음 측정 조건(맨슬래브)에서 바닥 슬래브의 진동 특성을 분석하였다.

평판의 진동은 구조물을 구성하는 재료 물성과 기하학 변수로 정의할 수 있으며, 기하학 변수에는 길이와 경계조건이 존재한다. 선행 연구에서 바닥충격음을 결정하는 주요 변수로 내력벽을 경계로 거실 공간의 크기를 정의하였으며(18), 이 연구에서도 내력벽

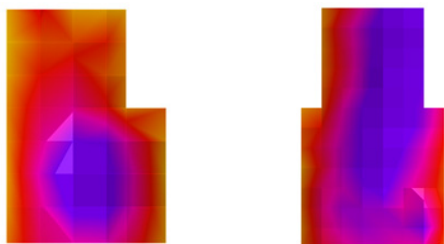
을 기준으로 거실 공간을 설정하여 모달 테스트를 수행하였다. Fig. 4와 같이 모달 테스트를 수행하기 위해 내력벽을 기준으로 거실 공간을 설정하였으며, 거실 공간 단축 방향의 3차 모드까지 분석할 수 있도록 그림과 같이 격자를 구성하였다. 전용면적 84 m²의 경우 약 1 m 격자 크기로 총 45개의 격자를 구성하였으며, 전용면적 59 m²의 경우에는 약 0.5 m의 격자 크기로 총 89개의 격자를 구성하였다.

바닥 슬래브의 진동 특성 분석은 임팩트 해머를 이용한 모달 테스트를 수행하였으며, 2개의 가속도계(PCB, 352C33)를 고정하고 임팩트 해머(PCB, 086D50) 가진 위치를 이동하며 가속도 응답을 측정하였다(19). 주파수 분석기는 SIEMENS의 SCA- DAS-Mobile을 이용하였으며, 1024 Hz까지 1 Hz 간격으로 주파수 분석을 할 수 있도록 설정하였다. 임팩트 해머의 팁은 고무팁을 이용하였으며, 이 실험의 경우 고무팁을 사용하면 재현성(coherence)이 약 300 Hz까지 0.9 이상으로 분석되었다. 따라서 바닥 슬래브의 진동 특성 분석은 300 Hz까지 수행하였다.

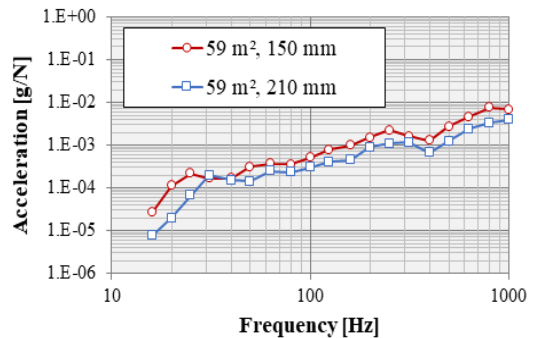
Fig. 5는 210 mm 슬래브의 첫 굽힘 모드를 나타내



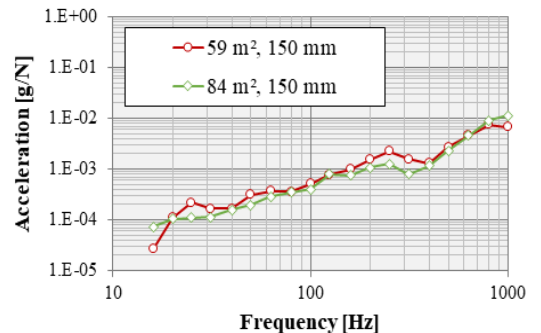
Fig. 4 Experimental set-up to measure vibration characteristic of floor structure



(a) 84 m²: 31 Hz (b) 59 m²: 24 Hz
Fig. 5 1st mode shape of floor slab (210 mm)



(a) Same plan with different floor slab thickness



(b) Same floor slab thickness with different plan

Fig. 6 Experiment result of modal test

며, 그림과 같이 모드 형상이 내력벽을 경계로 거동하는 것을 확인 할 수 있다. 반면, 전용면적 59 m²의 모드 형상과 같이 비내력벽 모서리가 내력벽 모서리와 같이 고정(fixed) 조건으로 작용하지 않고 면과 함께 거동하고 있는 것을 확인할 수 있다. 선행 연구⁽¹⁸⁾에서 비내력벽으로 구분되어 있는 방을 함께 모달 테스트를 수행한 결과 방 6을 포함관 평면이 함께 진동 거동하는 것을 확인하였다. 따라서 슬래브의 진동 거동은 내력벽을 경계로 거동하고 있는 것을 확인 할 수 있으며, 내력벽을 기준 평면을 정의해야만 실제 진동 거동 및 바닥충격음을 분석할 수 있음을 의미한다⁽¹⁹⁾.

Fig. 6은 모달 테스트 결과를 1/3 옥타브 밴드로 변환하여 도시화하였다. 그림과 같이 가속도 응답에서도 100 Hz 이하에서는 차이가 존재하지만 100 Hz 이상 주파수 대역에서는 비교적 유사한 가속도 응답을 확인 할 수 있다. 즉, 이 연구 대상의 실증주택의 경우 동일한 슬래브 두께 조건에서 유사한 바닥충격음과 바닥 슬래브 진동이 측정되었으며, 이는 거실 공간의 크기가 유사한 것을 의미한다. 따라서 바닥 슬래브의 진동 거동을 기준으로 거실 공간의 면적과 바닥충격음을 분석하였다.

4.2 유효 평면

바닥 슬래브의 진동은 Fig. 5와 같이 내력벽을 경계로 진동 운동하고 있는 것을 확인하였으며, 따라서 이 연구에서는 내력벽을 기준으로 거실 공간을 새롭게 정의하였다. Fig. 7과 같이 내력벽을 기준으로 거실 공간을 설정하였으며, 이 연구에서는 이를 유효 평면(effective plate)이라 정의하였다.

현재 바닥충격음 측정 시에는 ‘공동주택 바닥충격음 차단구조인정 및 관리기준’으로 세대 내 벽체를 기준으로 Fig. 7와 같이 거실 공간을 정의하고 있다. 그림과 같이 KS F 2810에서 정의하는 거실공간과 이 연구에서 제안한 거실 공간이 면적에서 큰 차이가 존재하는 것을 확인 할 수 있다.

KS 고시에서 제시하는 거실 공간과 이 연구에서 제안하는 유효평면에 의한 거실 공간의 크기를 Table 3에 정리하였다. 표와 같이 KS 고시에서 제시하는 방법으로 바닥 면적을 정의하면 두 평면은 약 34% 차이가 존재하는 평면이지만, 유효 평면에 의한 면적 산출에서는 전용면적 59 m²이 40.1 m², 전용면적 84 m²이 41.4 m²로 유사한 것을 확인 할 수 있다.

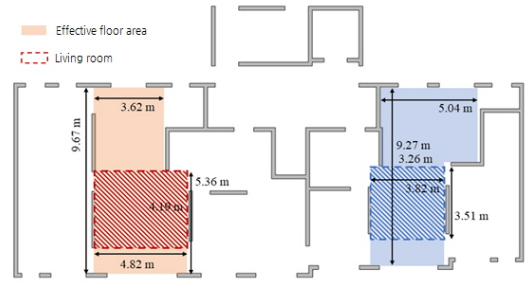


Fig. 7 Definition of living room size to estimate floor impact noise

Table 3 Comparison of area defined as effective plate and KS 2810

Definition as	59 Type	84 Type
KS F 2810	13.4 m ²	20.1 m ²
Proposed method	40.1 m ²	41.4 m ²

Table 4 Mode density of floor slab

Type / Thickness of slab	Area	Mode density
59 Type	150 mm	40.1 m ²
	210 mm	
84 Type	150 mm	41.4 m ²
	210 mm	

Table 5 Main parameter to reduce the floor impact noise considering frequency range

Impact source	Modal density	Geometric parameter (2D)
Heavy-weight impact source	Low	Shape of plate, Boundary condition, etc.
Light-weight impact source	High	Area size, Thickness of slab, Density, etc.

이 연구의 대상인 전용면적 59 m²과 84 m²이 평형 및 평면이 다르지만 슬래브의 진동을 결정하는 유효평면의 크기가 유사하였으며, 결과적으로 바닥충격음도 유사한 것으로 분석되었다. 중량충격음에 비해 경량충격음에서 이러한 현상을 더욱 뚜렷하게 확인할 수 있으며, 이는 모드 밀도와 밀접한 관련이 있다. 모드 밀도가 낮은 저주파 대역을 평가하는 중량충격음의 경우 개별적인 모드 기여도가 높아 평면 형상 및 경계 조건 등에 따른 진동응답 및 바닥충격음 차이가 존재하지만, 고주파로 이동할수록 차이는 줄어들는다. 특히 경량충격

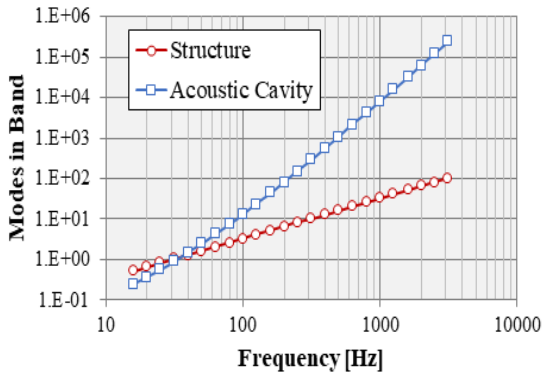


Fig. 8 Mode number of structure and acoustic cavity (59 m², slab thickness: 150 mm)

음의 경우 중량충격음에 비해 모드 밀도가 많은 대역을 대상으로 하기 때문에 개별적인 진동 모드의 영향보다는 판의 크기 또는 물성의 기여도가 지배적이다.

4.3 모드 밀도

실증주택 거실 공간을 유효 평면으로 정의하여 식 (4)를 이용하여 모드 밀도를 계산하면 Table 4와 같이 정리할 수 있다. 이론적으로 슬래브 두께 증가에 따라 모드 밀도가 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 전용면적 59 m²와 84 m²의 바닥 슬래브의 모드 밀도는 유사한 것으로 분석되었다.

Fig. 8은 전용면적 59 m²의 구조물과 음향 공간의 모드 개수를 나타낸다. 그림과 같이 음향 공간은 구조물에 비해 모드 개수가 급격하게 증가하며, 모드 개수가 증가하는 것은 개별적인 모드의 영향도가 낮아짐을 의미한다.

즉, 모드 밀도가 충분히 많은 주파수 대역에서는 음향 공간이 확산 음장 조건을 만족하게 된다. 반면, 구조물의 경우 1/3 옥타브 밴드의 중심주파수 300 Hz에서 모드 개수가 10개가 존재하며, 100 Hz 이전 주파수에는 이론적으로 Fig. 8과 같이 10개 이하의 모드가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 실제 모달 테스트 결과에서는 100 Hz 이하 대역에서 약 6개의 굽힘 모드가 존재하는 것으로 분석되었으며, 1/1 옥타브 대역의 63 Hz에는 3개의 굽힘모드가 존재하였다. 결과적으로 바닥충격음을 저감하기 위해 유효 평면을 이용한 거실 평면 분석이 선행되어야 하며, 바닥 슬래브의 모드 밀도를 고려하여 Table 5와 같이 바닥충격음 저감 설계가 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

바닥충격음은 가진원에 의한 바닥 슬래브 진동 응답에 의해 음의 크기 및 특성이 결정된다. 따라서 바닥충격음을 저감하기 위해서는 선행적으로 바닥 슬래브의 진동 분석이 요구되며, 정밀한 슬래브의 진동 특성을 분석하기 위해서는 거실 바닥 공간의 정의가 중요하다.

KS F 2810에서는 거실 공간을 세대 내 벽을 경계로 구분하여 정의하고 있으나, 벽식 실증주택을 대상으로 거실 바닥 모달 테스트 측정 결과 바닥 슬래브의 진동 응답은 내력벽을 경계로 거동하는 것으로 분석되었다. 따라서 부엌, 복도 등을 포함한 평면이 함께 진동 거동 하기 때문에 비내력벽 기준으로 거실 면적을 산출하는 경우 오차가 발생한다. 연구 대상의 벽식 실증주택의 경우 전용면적 84 m²은 내력벽을 기준으로 판의 경계를 정의하여 진동 거동을 정의할 수 있었지만, 전용면적 59 m²의 경우 경량벽체로 구분되어 있는 모서리는 경계로 작용하지 못하여 인근 방을 포함하여 진동 거동하는 것으로 분석되었다. 따라서 실제 거실 공간의 진동 거동은 내력벽을 경계로만 정의되며, 이 연구에서는 내력벽을 경계로 정의된 거실 공간을 ‘유효 평면’으로 정의하였다.

유효 평면에 대한 바닥충격음 영향을 분석하기 위해 국내의 대표적인 평형인 전용면적 59 m²와 84 m²를 대상으로 슬래브 두께 150 mm와 210 mm의 거실 공간에서 바닥충격음을 측정하였다. 바닥충격음 측정 결과 동일 두께 조건에서 평형에 무관하게 유사한 역A특성 가중 최대 바닥충격음 레벨($L_{i,Fmax,AW}$)과 A특성 가중 최대 바닥충격음 레벨($L_{i,A,Fmax}$) 측정 결과가 도출되었으며, 슬래브 두께 60 mm 증가 시 두 평형 모두 약 5 dB 감소하는 것으로 분석되었다. 추가적으로 동일 조건의 모달 테스트 측정 결과 100 Hz 이후 대역은 전체 에너지 측면에서 유사한 진동 응답을 확인할 수 있으며, 이론적으로 동일한 질량을 갖는 평판으로 확인할 수 있다. KS F 2810로 거실 공간의 정의하는 경우 약 34% 차이가 존재하지만 이 연구에서 제안한 유효 평면으로 거실공간의 크기를 산출하면 약 40 m²로 동일한 것을 확인할 수 있다. 따라서 거실을 정의하는 경우 내력벽을 기준으로 정의하는 것이 바닥충격음 분석 및 예측 시 바람직할 것으로 판단된다.

바닥충격음 및 모달 테스트 결과에서 100 Hz 이후 대역에서는 유효평면이 동일하여 비교적 유사한 소음도 및 진동 응답을 확인할 수 있으나, 100 Hz 이전 대역에서는 동일 두께 및 유효 평면 조건에서도 차이가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 차이는 동일 질량의 평판에서도 판의 형상이 다르기 때문에 상이한 진동 모드가 발생하기 때문이다. 저주파 대역의 경우 모드 밀도가 적기 때문에 개별 모드에 의한 차이가 크며, 고주파로 갈수록 모드 밀도가 많아져서 개별 모드의 기여도가 낮아지기 때문이다. 따라서 모드 밀도가 낮은 저주파 대역을 측정하는 중량충격음을 저감하기 위해서는 상대적으로 평면 형상 및 경계 조건이 주요한 변수이며, 모드 밀도가 충분하여 개별적인 모드 기여도가 작은 경량충격음의 경우 평면의 크기 및 두께가 지배적인 변수로 분석되었다.

이 연구는 진동 특성을 기준으로 유효 평면을 도입하였으며, 벽식 실증주택을 대상으로 바닥충격음 영향을 분석하였다. 추후 다양한 현장 측정 데이터를 분석하여 유효 평면에 대한 바닥충격음 영향을 심도 있게 분석할 예정이다.

후 기

이 연구는 토지주택연구원에서 수행한 “바닥충격음 저감을 위한 기술공유시스템 구축 및 맞춤형 모델 개발(R202002002)” 결과의 일부임.

References

- (1) Korean Industrial Standards, 2015, KS F 2810-1:2015, Field Measurements of Impact Sound Insulation of Floors-Part 1: Method Using Standard Light Impact Source (equivalent ISO 140-7: 1998).
- (2) Korean Industrial Standards, 2017, Field Measurements of Floor Impact Sound Insulation of Buildings-Part 2: Method Using Standard Heavy Impact Sources.
- (3) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, No. 2015-997: Acceptance and Management Standards for Floor Impact Sound Insulation Structures in Apartment Buildings.
- (4) Inman, D. J., 2013, Engineering Vibration 4th Edition, Pearson Higher Education.
- (5) Im, J. B., Chung, J. Y., Kim, K. W. and Jeung, G. C., 2007, A Study on Dynamic Stiffness of Multi-layered Damping Materials, Proceedings of the KSNVE Annual Fall Conference, pp. 1149~1152.
- (6) Schiavi, A., Prato, A. and Belli, A. P., 2015, The "dust spring effect" on the Impact Sound Reduction Measurement Accuracy of Floor Coverings in Laboratory, Applied Acoustics, Vol. 97, pp. 115~120.
- (7) Cremer, L., Heckl, M. and Petersson, B. A., 2005, Structure-borne Sound: Structural Vibrations and Sound Radiation at Audio Frequencies, 3rd Edition, New York, Springer Science & Business Media.
- (8) Hwang, J. S., Moon, D. H., Park, H. G., Hong, S. G. and Hong, G. H., 2010, The Effect of Dynamic Property of Absorbing Sheet on the Amplification of Heavy Weight Floor Impact Noise, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 7, pp. 651~657.
- (9) Kim, T. M., Kim, J. T. and Kim, J. S., 2018, Effect of Structural Vibration and Room Acoustic Modes on Low Frequency Impact Noise in Apartment House with Floating Floor, Applied Acoustics. Vol. 142, pp. 59~69.
- (10) Fahy, F., 1987, Sound and Structural Vibration: Radiation, Transmission and Response, Academic Press.
- (11) Lyon, R. H., 1987, Machinery Noise and Diagnostics, Butterworths-Heinemann, Boston.
- (12) Istvan, L. V. and Beranek, L. L., 1992, Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications, Wiley.
- (13) Korean Industrial Standards, 2015, Rating of Floor Impact Sound Insulation for Impact Source in Buildings and Building Elements - Part 1 : Floor Impact Sound Insulation Against Standard Light Impact Source.
- (14) Korean Industrial Standards, 2017, Rating of Floor Impact Sound Insulation for Impact Source in Buildings and Building Elements - Part 1 : Floor Impact Sound Insulation Against Standard Heavy Impact Source.
- (15) Jeong, J. H., Park, S. H. and Lee, P. J., 2019, Single-number Quantities of Heavyweight Impact Sound Insulation, Acta Acustica United with Acustica, Vol. 105, No. 1, pp. 5~8.
- (16) Kim, T. M., Kim, J. T. and Kim, J. S., 2018, SEA-FEM Hybrid Analysis for Predicting Inter-floor Impact Noise, Applied Acoustics, Vol. 129, pp.

397~407.

(17) Chakraverty, S., 2009, Vibration of plate, CRC Press.

(18) Kim, T. M. and Yang, H. S., 2020, Prediction of Heavy-weight Floor Impact Sound with Different Impact Sources and Indices using a Finite Element Method, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 30, No. 2, pp. 169~178.

(19) Ewins, D. J., 1984, Modal testing: theory and practice. New York, Brisbane: Research studies press LTD, John Wiley and Sons Inc.



Tae-Min Kim received his Ph.D. at Department of Mechanical Engineering, Hongik University. He is currently Researcher of Acoustics at the LHI(Land & Housing Institute). His main fields are noise and vibration

control in buildings.



Jin-Young Bae is a Ph.D. Candidate in Department of Architectural Engineering at Hanyang University. She is currently a Researcher of Acoustics at the LHI(Land & Housing Institute). Her main fields are architectural and environmental acoustics.



Hong-Seok Yang received his Ph.D. at School of Architecture, University of Sheffield, UK. He is currently Researcher of Acoustics at the LHI(Land & Housing Institute). His main fields are architectural and environmental acoustics.

control in buildings.