



박스형 시험실 모델을 이용한 층간소음 저감 인자의 영향도 분석

Analysis of the Influence of Interfloor Noise Reduction Factors Using a Box-Type Test Room Model

원대관* · 남유진** · 유영동*** · 김용희****

Daegwan Won* · Yujin Nam** · Youngdong Yu*** · Yonghee Kim****

* Main author, Graduate Student, Dept. of Architectural Engineering, Pusan National Univ., South Korea (wdk5340@pusnan.ac.kr)

** Corresponding author, Professor, Dept. of Architectural Engineering, Pusan National Univ., South Korea (Namyujin3@pusan.ac.kr)

*** Coauthor, Senior Researcher, Steel Solution R&D Center, POSCO, South Korea (ydyu@posco.com)

**** Coauthor, Associate Professor, of Architectural Engineering, Yeungsan Univ., South Korea (yhhkim@ysu.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: This study aims to evaluate heavyweight floor impact noise through a numerical simulation using the finite element method (FEM) within a box-type test chamber. It focuses on analyzing the acoustic response and identifying the influence of structural factors, such as slab thickness and material density, on sound pressure reduction in the low-frequency domain. **Method:** A three-dimensional structural-acoustic coupling model was developed using COMSOL Multiphysics. An impact force, defined by the KS F 2810-2:2022 standard rubber ball specifications, was applied at the center of the floor slab. Frequency response functions (FRF) and sound pressure levels were measured at both center and corner positions. Additionally, a parametric study was conducted by varying slab thickness (150~210mm) and material density (2070~2300kg/m³). **Result:** The simulation identified major resonance modes at 57Hz, 83Hz, and 114Hz, with a sharp increase in modal density above 100Hz. A one-third octave band analysis showed a frequency shift in dominant energy from 63Hz to 125Hz compared to real-world trends. The parametric analysis confirmed that increased slab thickness and density led to notable reductions in sound pressure levels, particularly at 63Hz. These results demonstrate the utility of FEM simulations as a reliable tool for assessing impact sound transmission and guiding future improvements for residential noise control.

KEYWORD

맨바닥
중량충격음
유한요소해석

Bare Slab
Heavy-Weight Impact Noise
Finite Element Method

ACCEPTANCE INFO

Received Dec. 12, 2025

Final revision received Jan. 26, 2026

Accepted Jan. 30, 2026

© 2026. KIEAE all rights reserved.

1. 연구 배경 및 목적

현대사회에서 사람들은 대부분의 시간을 건축물 내부에서 보내며, 이때 경험하는 소음은 건축물의 용도와 주변 환경에 따라 다양한 특성이 나타난다. 특정 소음은 단순한 불쾌감을 넘어, 장기간 노출 시 심리적 불안, 수면 장애, 이명 등의 건강 문제를 유발할 수 있으며, 특히, 층간소음은 건축물에서 발생하는 대표적인 사례로, 지속적으로 사회적 갈등의 원인이 되고 있다.

Fig. 1.에 나타난 바와 같이 층간소음 관련 민원은 증가 추세를 보이며, 특히 2020년 이후 크게 증가하였다. 관련 민원은 2012년 8,733건에서 2021년 42,250건으로 약 4.8배 증가하였으며[1], 일부 사례에서는 층간소음이 강력범죄로 이어지기도 한다. 이러한 문제의 심각성이 대두되면서 2022년 ‘층간소음 사후확인제’가 도입되었고, 이에 따라 다양한 저감 기술의 개발과 연구가 활발히 이루어지고 있다.

바닥충격음 저감 기술은 층간소음 문제 해결을 위한 핵심적인 기술 영역이며, 그 효과를 검증하기 위한 실험적 평가는 필수적이다. 주거시설 내 소음은 외부 교통이나 공사 소음과 달리 이웃의 생활 패턴과 밀접하게 연관되어 있어 발생 위치와 강도를 사전에 예측하기

어렵고 시간 및 상황에 따라 불규칙하게 나타난다. 이러한 특성으로 인해 바닥충격음 저감 기술의 개발 및 성능 검증은 실용적인 측면에서 높은 중요성을 가진다. 현재 건설업계에서는 다양한 바닥 구조와 완충재 기술이 개발되어 실험실 환경에서 평가하고 있으나, 이 과정은 시간과 비용이 많이 소요되며, 골조의 장단비나 바닥 슬래브 두께 등 주요 구조 변수들을 자유롭게 조정하기 어렵다. 또한 실험실 조건과 실제 주거 환경 간 차이로 인해 실험 결과의 현장 적용성에도 제약이 발생한다. 특히 중량충격음은 바닥 두께, 표면 마감재, 구조적 공진 특성 등에 민감하게 영향을 받기 때문에 이러한 괴리가 더욱 크게 나타난다.

이러한 이유로 기존 실험 기반 평가법의 한계를 보완하고, 바닥충

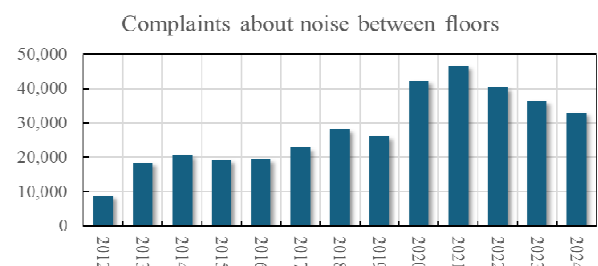


Fig. 1. Complaints about noise between floors 2024

격음을 보다 효율적·정밀하게 예측할 수 있는 대안으로서 유한요소 해석(Finite Element Method, FEM)을 활용한 수치해석 기법이 주목받고 있다. FEM은 구조의 기하학과 물성 조건을 세밀하게 반영할 수 있어 다양한 설계 변수의 영향을 체계적으로 분석하고, 저감 인자의 작용 메커니즘을 정량적으로 평가하는 데 효과적인 접근 방식으로 평가된다[2].

선행연구로 문대호 등(2015)은 수음실 벽과 바닥 표면의 흡음 조건을 변수로 설정하여 주파수 특성을 반영한 바닥충격음 예측 모델을 제시하였다[3]. 그 결과, 저주파 영역에서는 높은 임피던스 값이, 고주파 영역에서는 낮은 임피던스 값이 실험 결과와 유사하게 나타났다. 또한 김수홍 외(2024)는 아파트 두 현장의 내력벽 유무에 따른 바닥 진동 특성과 중량충격음의 차이를 조사하고 분석을 수행하였다[4].

기존의 중량충격음 관련 연구는 실증 주택 또는 시험실 기반의 실험 연구를 중심으로 수행되어 왔으며, 이를 통해 실주거 환경에서의 소음 특성이 분석되었다. 하지만, 이러한 실험적 접근은 구조 조건과 재료 물성을 독립적으로 제어하는 데 한계가 있으며, 특히 슬래브 두께, 밀도, 경계조건과 같은 구조 인자의 영향을 분리하여 분석하는 데 제약이 따른다.

이에 본 연구에서는 FEM을 기반으로 한 구조-음향 연성 시뮬레이션을 적용하여, 박스형 시험실 조건에서 중량충격음의 발생 및 전달 특성을 분석하고, 슬래브 두께, 밀도 등 주요 구조 인자의 영향도를 평가하고자 한다. 본 연구의 목적은 실험을 대체하는 것이 아닌, 실험적으로 분리하기 어려운 구조 인자의 영향을 해석적으로 규명함으로써 중량충격음 저감 메커니즘에 대한 이해를 심화하는 데 있다.

2. 연구 방법

2.1. 공동주택 중량충격음 특성 및 평가체계

공동주택에서 발생하는 층간소음 중 가장 큰 비중을 차지하는 것은 중량충격음으로, 이는 주로 보행, 점프, 가구 이동, 무거운 물체 낙하 등 일상적인 생활 행위에서 발생한다. 중량충격음은 100Hz 이하의 저주파 대역에 에너지가 집중되고 감쇠가 어렵다는 특성을 지니, 비교적 먼 거리까지 전파되는 경향이 있다. 이러한 특성으로 인해 저주파 대역의 저감 인자 분석과 구조적 대책 마련이 필수적이다.

중량충격음을 평가하기 위한 국제 기준으로는 ISO에서 제시한 고무공(impact ball) 시험 방법이 있으며, 이는 기존의 뱅머신(bang machine)보다 실제 보행 충격음과 유사한 주파수 특성을 재현할 수 있어 평가 정밀도가 우수하다. 이러한 이유로 국내 평가 체계에서도 고무공을 활용한 평가 방식이 보편적으로 적용되고 있다.

현재 국내에서는 「주택건설기준 등에 관한 규정」 제14조의2 제2항 및 제60조의2에 따라 바닥충격음 차단 성능 평가가 법적으로 의무화되어 있다. 경량충격음은 태핑머신(tapping machine), 중량충격음은 고무공을 충격원으로 사용하며, 측정은 KS F 16283-2 기준에 따라 수행된다. 평가는 KS F ISO 717-2을 기준으로 이루어지며, 이를 통해 바닥 구조의 차음 성능을 정량적으로 판단한다. 이러한 기준 충족 여부는 공동주택의 성능 확보를 평가하는 핵심 지표로 기능

한다.

한편 해외의 경우, 중량충격음에 대한 규제가 법적으로 강제되지 않거나 권고 수준에 머무르는 경우가 많다. 예를 들어 미국은 ASTM E1007 기준에 따라 시험을 수행하지만 법적 강제성이 약하며, 주로 자발적 성능 인증이나 민간 기준으로 활용된다. 유럽연합 또한 실험실 측정방법인 ISO 10140 시리즈를 기반으로 시험 체계를 운영하고 있으나, 국가별로 적용 범위와 의무화 수준에서 차이가 존재한다. 이를 종합하면 국내는 법령을 기반으로 한 의무 평가 체계를 갖춘 반면, 국외는 자율적 또는 선택적 운영이 일반적이며, 그 결과 국내의 층간소음 규제가 상대적으로 엄격하고 구체적인 체계를 유지하고 있음을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 국내 현행 표준바닥 구조의 바닥충격음 시험기준을 모사하여 해석모형을 구축하였다.

2.2. FEM 기반 바닥충격음 해석 방법

바닥충격음의 특성을 분석하고 예측하기 위해 다양한 수치해석 기법이 활용될 수 있다. 대표적으로 유한요소법(Finite Element Method, FEM), 통계적 에너지 해석법(Statistical Energy Analysis, SEA), 경계요소법(Boundary Element Method, BEM) 등이 있으며, 이 중 중량충격음 해석에는 FEM이 가장 널리 사용된다. FEM은 구조물의 동적 거동을 정밀하게 모사할 수 있어, 특정 주파수 대역에서의 충격음 전달 특성을 정량적으로 분석하는 데 효과적인 기법으로 알려져 있다. 특히 중량충격음은 100Hz 이하의 저주파 영역에 에너지가 집중되므로, 해당 대역에서의 해석 신뢰도가 높은 FEM 적용이 적합하다.

FEM 기반 선행연구로 김태민 외(2020)는 벽식 구조의 실증 주택을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다. 고무공 및 뱅머신 충격원을 이용해 구조 모델과 음향 모델을 분리하여 해석한 후 구조-음향 커플링 모델로 통합하였다. 해석은 주파수응답함수(Frequency Response Function, FRF)를 기반으로 수행되었으며, 실험 결과와 비교한 결과 고무공 충격원에서는 단일 평가지표 $L'_{iA, Fmax}$ 기준 0.5dB, 뱅머신 충격원에서는 2.1dB 이내의 편차를 보였다. 이 연구는 충격원의 종류에 따라 해석 정밀도가 달라질 수 있음을 보여주며, 충격 특성 고려가 시뮬레이션 정확성 확보에 핵심임을 시사하였다[5].

본 연구에서는 바닥충격음 저감 인자 분석을 위해 FEM기반 해석 모델을 활용하였으며, KS 표준 평가방법을 기반으로 박스형 시험실 모델을 구현하여 파일럿 해석을 수행하였다. Fig. 2와 같이 해석 모델은 27m³ 규모의 정육면체 시험실을 3D 요소(3D elements)로 구성하였으며, 흡음재 및 완충재가 배제된 조건에서 구조-음향 커플

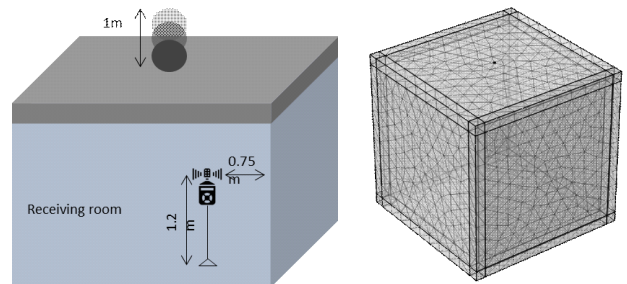


Fig. 2. Floor impact sound simulation test room

링(Structural-acoustic coupling) 해석을 수행하였다.

모델의 해석 정확도를 확보하기 위해, 구조 및 음향 요소 모두에 대해 “하나의 파장 내 최소 6개 요소” 조건을 적용하였다. 이 기준은 식 (1)과 같이 최소 파장 λ_{\min} 과 요소 크기(Element size)의 관계로 정의된다.

$$6 \times \text{Elementsize} \leq \lambda_{\min} = \frac{c}{f_{\max}} \quad (\text{Eq. 1})$$

이를 통해 고무공 충격력에 따른 실내 음압 응답을 정밀하게 모사할 수 있도록 모델을 구성하였으며, 주요 모드 주파수를 도출하고 충격력에 대응하는 FRF (Frequency Response Function)를 정의함으로써 바닥충격음 예측 및 구조적 저감 인자 분석을 수행하였다.

2.3. 바닥면에서의 고유진동수 해석

유한한 크기의 평판에 진동파가 입사하면, 끝단에서 반사되어 평판 내부에 생성되는 정재파(Standing wave)가 형성된다. 이때 평판은 특정 주파수에서 고유한 진동 형상을 나타내는데, 이를 고유 모드(Natural mode)라 하며, 해당 진동수가 고유진동수(Natural frequency)이다.

평판의 고유진동수는 일반적으로 식 (2)와 같이 표현된다.

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

여기서 D 는 판의 굽힘강성(Bending Stiffness)(N/m), ρ_t 는 판의 면 밀도(kg/m²) l_x, l_y 는 각 축에 해당하는 판의 길이 n_x, n_y 는 각 축의 모드 차수를 의미한다.

여기서 굽힘강성은 식 (3)으로 계산된다.

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (\text{Eq. 3})$$

여기서 E 는 재료의 탄성계수(Pa) ν 는 포아송비 h 는 판의 두께를 의미한다.

고유 모드 형상은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\psi_m(x, y) = 2 \sin\left(\frac{n_x \pi}{l_x} x\right) \sin\left(\frac{n_y \pi}{l_y} y\right) \quad (\text{Eq. 4})$$

따라서 고유진동수는 평판의 재료 물성, 형상, 두께, 경계 조건 등에 의해 결정되며, 특정 고유진동수에서 평판은 식 (4)와 같은 고유 모드 형상(Mode shape)을 나타낸다.

한편, 평판에 작용하는 외부 가진 주파수가 고유진동수와 일치할

경우 공진(Resonance)현상이 발생하게 되며, 이때 진동 응답이 비선형적으로 크게 증폭된다. 이는 구조물의 충격음 전달 및 저감 특성을 분석하는 데 있어 중요한 요소로 작용한다.

2.4. 수음실 내부에서의 고유진동수 해석

음향 모드는 수음실 내부의 형상과 경계 조건에 의해 특정 주파수에서 음압이 비약적으로 증가하거나 감소하는 현상을 의미한다. 이는 매질 경계에서 표면 속도가 0이 되는 조건을 만족하는 정상파(standing wave)의 형태로 정의되며, 순수하게 실의 크기와 형태에 의해 결정된다. 음향 모드는 식 (5)를 이용하여 도출할 수 있다.

$$f_{(x,y,z)} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{z}{l_z}\right)^2} \quad (\text{Eq. 5})$$

여기서 c 는 음속(343 m/s) $f_{(x,y,z)}$ 는 축에 해당하는 모드의 공진 주파수 l_x, l_y, l_z 는 각 축에 해당하는 룸 길이를 의미한다.

또한 특정 주파수 범위 f 내에서 발생 가능한 음향 모드의 수는 식 (6)으로 계산된다.

$$N_f = \frac{4\pi}{3} V \left(\frac{f}{c}\right)^3 + \frac{\pi}{4} S \left(\frac{f}{c}\right)^2 + \frac{L}{8} \left(\frac{f}{c}\right) \quad (\text{Eq. 6})$$

여기서 V 는 체적 S 는 표면적 L 은 모서리 총합을 의미한다.

모드 주파수의 평균 밀도와 특정 대역폭 내 모드 수는 식 (7)로 표현된다.

$$\frac{\partial N_f}{\partial f} = \frac{4\pi v V f^2}{c^3} \quad (\text{Eq. 7})$$

식 (7)에 따르면 모드 밀도(mode density)는 주파수의 제곱에 비례하여 증가한다. 이러한 음향 모드의 특성은 실내에서 발생하는 공진(resonance) 현상을 설명하는 핵심 요소이며, 구조물의 동적 거동 및 바닥 충격음의 전달 특성에 직접적인 영향을 미친다. 특히 저주파 중량충격음의 경우, 실의 모드 분포와 중첩되어 음압 응답이 국부적으로 크게 강화될 수 있으므로 정확한 음향 모드 분석이 필수적이다.

2.5. 해석 조건

Table. 1.은 본 연구에서 사용된 주요 재료의 물성치와 출처를 나타낸다. 기본 모델에서는 구조 영역으로 콘크리트, 음향 영역으로 공기를 각각 재료로 설정하였다. 구조 영역에 적용된 콘크리트의 탄성계수, 밀도 및 포아송비는 국내 공동주택 바닥 구조 해석을 다룬 기존 연구와 ISO 10140 등 관련 기준에서 제시하는 대표 물성 범위를 참조하여 설정하였다. 음향 영역의 공기 물성은 표준 상태(상온, 대기압) 조건을 가정하여 ISO 기준에서 제시하는 밀도 및 음속 값을 적용하였다.

Table 1. Material property of simulation model

Material	Property	Value	Reference
Concrete	Young's modulus	25 [GPa]	KS F ISO 10140
	Density	2300 [kg/m ³]	
	Poisson's ratio	0.2	
Air	Density	1.225 [kg/m ³]	KS F ISO 140-12
	Speed of sound	343 [m/s]	
Impact ball	Peak force	1600 [N]	KS F 2810-2
	Force duration	20 [ms]	

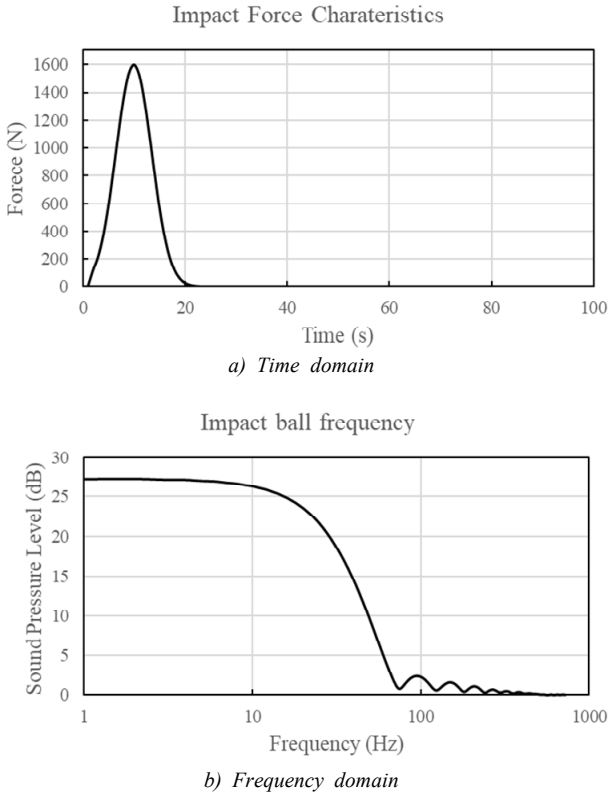


Fig. 3. Force characteristics of ISO impact ball impact sources

또한 중량충격음 가진원으로 적용된 고무공(impact ball)의 충격력 크기 및 시간·주파수 특성은 KS F 2810-2에 규정된 표준 시험 방법을 기반으로 정의하였다. 고무공 충격력의 시간 이력과 주파수 스펙트럼은 해당 표준에서 제시하는 특성을 충실히 반영하도록 구성하여, 실제 중량충격음 시험 조건과의 적합성을 확보하고자 하였다. 이러한 설정을 통해 본 연구의 시뮬레이션 입력자료는 표준 시험 조건과 기존 연구 결과에 근거한 합리적인 범위 내에서 정의되었으며, 해석 결과의 신뢰성과 비교 가능성을 확보하였다.

해석 대상 주파수 범위는 50Hz~630Hz이며, 분석은 1Hz 간격으로 세밀하게 수행하였다. 동시에 1/3 Octave band에 대한 병행 분석도 수행하여, 중량충격음 에너지가 집중되는 저주파 영역의 특성을 정밀하게 반영하였다.

본 연구에서는 박스형 시험실의 상부 중앙 및 코너 가진을 적용하였으며, 이에 따른 구조-음향 응답을 FRF (Frequency Response Function)와 수음실의 모드 형상(Mode Shape)을 통해 분석하였다.

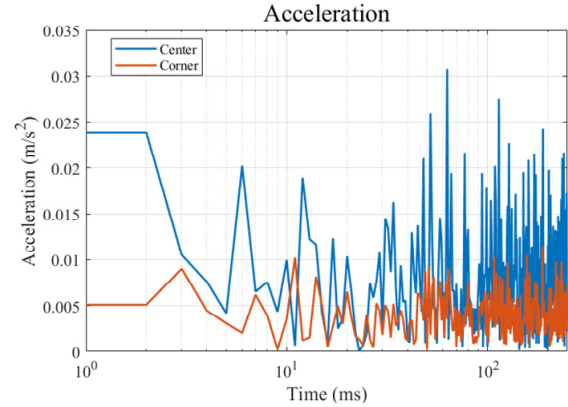


Fig. 4. Frequency response function of sound room

3. 해석 결과 및 분석

3.1. 주파수 응답함수 분석

Fig. 4.는 바닥 중앙부에서의 충격력 가진 조건의 결과로 수음실의 중앙 및 코너에서의 주파수 응답 특성을 각각 나타낸다. 100Hz이하의 저주파 영역에서는 중앙 및 코너 지점 모두에서 응답이 비교적 일정하게 유지되었다. 그러나 100Hz를 초과하는 주파수 영역부터는 응답 특성이 급격하게 변동하는 양상을 보였으며, 이는 해당 주파수 대역에서 구조물 내부에 고유 모드가 집중적으로 형성되고 있음을 의미한다. 특히 고유진동수에 대응하는 주파수에서 공진 가능성이 높아지며, 이에 따라 응답이 급격히 증폭되는 특징이 나타난다.

응답 지점 간 비교 결과, 중앙 지점의 가속도 응답이 코너 지점보다 크고 변동성도 더 크게 나타났다. 이는 가진 위치와 응답 위치 간의 상대적 거리 차이 및 구조물의 감쇠 특성에 기인한다. 즉, 중앙 위치는 충격력이 직접 전달되는 경로에 놓여 있어 높은 에너지가 유지되며, 반면 코너 지점은 구조적 경로를 따라 전달되는 과정에서 에너지 분산 및 감쇠가 발생하여 응답이 상대적으로 낮게 나타난 것으로 해석된다.

본 FRF 분석은 바닥 슬래브 내부의 모드 분포 및 진동 전달 경로를 규명하는데 중요한 자료로 작용한다. 이러한 분석 결과는 바닥 구조 설계 및 완충재 적용 시, 구조적 취약 주파수 대역의 저감 대책을 수립하는 데 활용할 수 있는 정량적 근거를 제공한다.

3.2. 수음실 모드형상 분석

수음실을 대상으로 수행한 정적 모드 해석 결과, 상부로부터의 가진에 의해 발생한 룸 모드의 주파수 분포는 Fig. 5.에 나타나 있다. 해석 결과, 1차 모드는 57Hz, 2차 모드는 83Hz, 3차 모드는 114Hz에서 형성되는 것으로 확인되었다. 이후의 주파수 영역에서는 모드 수가 급격하게 증가하는 경향을 보였으며, 이는 기존 문헌[6]에서 보고된 저주파 음장 분포 특성과 유사한 양상을 나타낸다. 이러한 결과는 저주파 영역에서 수음실 내부에서의 공진이 상대적으로 강하게 형성될 수 있음을 시사한다.

이어 수행한 Time-domain 해석에서는 고무공의 충격력을 입력하여 시뮬레이션을 진행하였다. 그 결과, 정적 모드에서 도출된 고

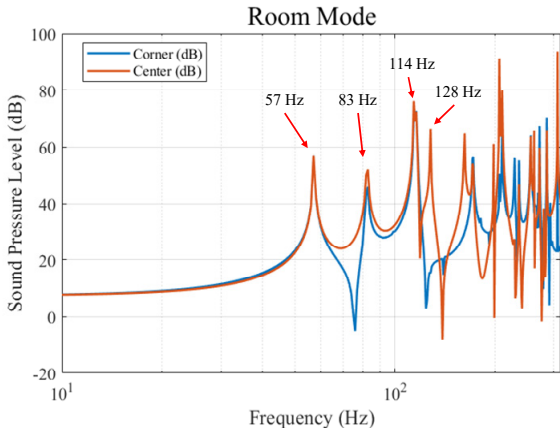


Fig. 5. Room mode under static conditions simulation

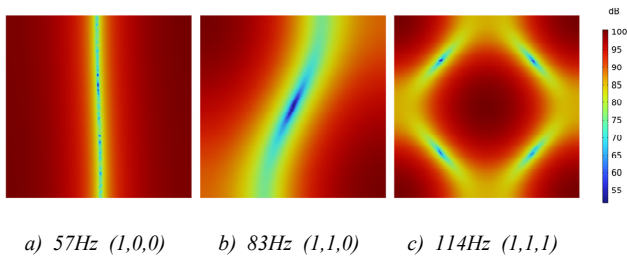


Fig. 6. Room mode shape

유 주파수와 근접한 주파수 대역에서 유사한 모드 패턴이 형성되는 것이 확인되었다. 이는 시간영역 기반의 동적 응답과 주파수 기반의 정적 모드 해석이 서로 일관된 결과를 보임을 의미한다.

Fig. 6.은 57Hz, 83Hz, 114Hz에서 발생한 모드 형상을 시각화한 것으로, 각 주파수에서의 음압 레벨 분포 및 공간적 형상을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 정적 해석과 동적 시뮬레이션 간의 상관성을 입증하는 지표로 활용될 수 있으며, 수음실 내부 모드 형성 메커니즘을 직관적으로 확인할 수 있는 자료이다.

본 분석을 통해 수음실의 고유 음향 특성이 중량충격음의 전달 특성과 공간 내 음압 분포에 실질적인 영향을 미친다는 점을 확인하였다. 이는 다양한 설계 파라미터 변화에 따른 수음실 내부 음향 응답을 예측하는 데 활용될 수 있으며, 바닥 구조 설계 또는 실내 음향 제어 설계 시 기초자료로서의 활용 가능성을 시사한다.

3.3. 바닥충격음 분석

Fig. 7.은 impact ball의 충격력 특성을 기반으로 수행한 중량충격음 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 분석 결과, 비교적 단순한 공간 구성으로 인해 주요 소음 에너지가 63Hz에서 160Hz 범위의 주파수 대역으로 이동하는 경향이 확인되었다. 이는 구조적 특성 변화에 따른 고유주파수 분포의 차이에 기인한 것으로, 실증 환경에 비해 상대적으로 높은 중심 주파수에서 모드 형성과 에너지 집중 현상이 발생함을 의미한다.

또한 공간 구조의 단순성과 반사면 구성의 영향으로 음향 에너지의 분산보다는 반사 효과가 우세하게 작용하여, 고주파 영역에서 음압레벨이 상대적으로 높게 형성된 것으로 판단된다.

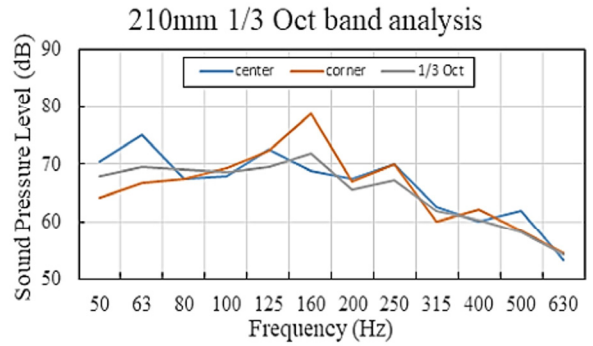


Fig. 7. Corner to center comparison based on 1/3 octave bands

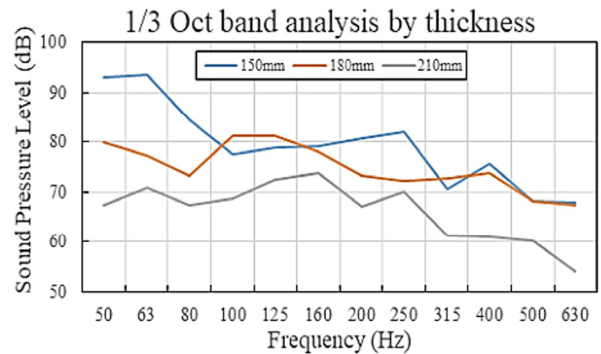


Fig. 8. Frequency analysis analysis to thickness

본 모델은 완충재, 음향 임피던스, 음장 교정 등 일부 실험 환경 요소는 미반영된 상태였으나, 순수 구조체 기반의 음향 전달 특성을 정량적으로 분석하는 데 적합한 구성을 갖추고 있다. 이를 통해 중량충격음의 주요 에너지 전달 경로 및 고유 주파수 영역을 도출하는 데 효과적인 기초자료를 확보할 수 있었다.

3.4. 저감 인자에 따른 바닥중량충격음 영향도 분석

층간소음 저감 인자의 변화에 따른 중량충격음 전달 특성에 미치는 영향을 분석하기 위해, 박스형 시험실 모델을 활용한 케이스 스터디를 수행하였다. 저감 인자로는 슬래브의 두께와 재료 밀도를 선택하였으며, 각 변수 변화에 따른 저주파 대역의 음압레벨 변화를 도출하였으며 분석은 구조적 특성이 명확히 반영되는 63Hz 대역을 중심으로 수행하였다.

해석 결과, 슬래브 두께가 증가할수록 저주파 대역에서의 음압레벨이 감소하여 중량충격음 저감 효과가 향상되는 것으로 나타났다. 이는 슬래브 두께 증가가 구조적 강성을 높여 저주파 에너지의 감쇠를 효과적으로 강화하는 것이 원인으로 추정된다.

또한 현재 공동주택에서 일반적으로 적용되고 있는 210mm 두께의 콘크리트 슬래브를 기준으로 재료 밀도 변화에 따른 중량충격음 전달 특성을 분석하였다. 밀도는 -10%, -5%, 0%의 범위로 설정하였으며, 시뮬레이션 결과 밀도가 증가할수록 하부로 전달되는 음압레벨이 감소하는 경향이 나타났다. 이는 슬래브의 밀도가 증가함에 따라 강성이 증가하고, 그에 따라 충격에 대한 구조물의 동적 응답이 줄어들면서, 저주파 대역에서의 에너지 전달이 감쇠되었기 때문

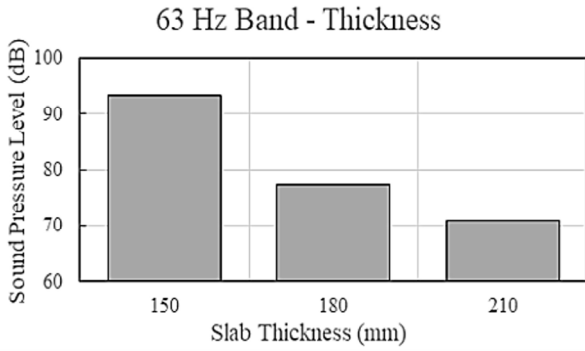


Fig. 9. 63Hz sound pressure level according to thickness

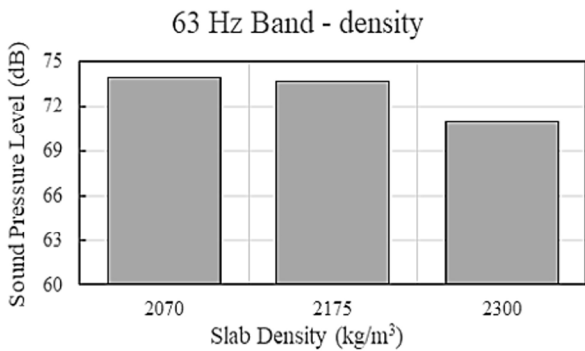


Fig. 10. Sound pressure level according to density at 210mm

Table 2. Material property of simulation model

Case no.	Thickness [mm]	Density [kg/m³]
Case 1	150	2,070
Case 2	150	2,185
Case 3	150	2,300
Case 4	180	2,070
Case 5	180	2,185
Case 6	180	2,300
Case 7	210	2,070
Case 8	210	2,185
Case 9	210	2,300

로 해석된다.

이러한 결과는 재료 물성 자체가 바닥구조의 차음 성능에 유의미한 영향을 미칠 수 있음을 시사하며, 구조 설계시 단순 두께뿐만 아니라 재료 밀도에 따른 구조 응답 변화까지 고려하는 것이 중량충격음 저감 성능 향상에 효과적일 수 있음을 보여준다. 향후 동일 두께 조건에서 재료의 복합성분, 혼합률, 강도특성에 따른 시뮬레이션 분석을 병행하여 개선된 연구 방향을 제시할 수 있을 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 층간소음 저감 요소의 영향도를 분석하기 위해 FEM 기반 박스형 시험실 모델을 구축하고 구조-음향 연성 시뮬레이션을 수행하였다. 특히 중량충격음이 주로 분포하는 저주파 대역을 중심으로 바닥충격음 특성을 분석하고, 주요 구조 인자에 따른 음

압 응답 변화를 평가하였다.

층간소음 저감 인자에 대한 영향도 분석 결과, 슬래브 두께와 밀도의 증가는 중량충격음 저감에 유의미한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 구조물의 강성 증가에 따른 동적 응답 감소 효과에 기인한 결과로 해석할 수 있다. 본 연구 결과는 중량충격음 저감 성능에 영향을 미치는 구조 인자의 상대적 중요도를 제시하였다는 점에서 의의를 가진다.

연구에서 제시한 박스형 시험실 기반 구조-음향 연성 시뮬레이션 프레임워크는 향후 완충층 재료 특성, 접합부 조건, 감쇠 모델의 다양화 등을 반영하여 확장 적용이 가능하다. 특히 동일한 해석 조건에서 실험 결과와의 체계적인 비교를 수행할 경우, 표준 시험 방법에서 관측되는 중량충격음 결과에 대한 해석적 근거를 제공하는 보조 도구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgement

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] 한국환경공단 층간소음 이웃사이센터, 층간소음 이웃사이센터 민원사례집, 2024. // (Korea Environment Corporation, Inter-floor Noise Neighborhood Center, Floor Noise Neighborhood Center Complaint Case Collection, 2024.)
- [2] 문대호 외 3인, 유한요소해석을 이용한 공동주택의 중량충격음 예측, 한국전산구조공학회논문집, 제28권 제6호, 2015, pp.645-658. // (D.H. Mun et al., Prediction of heavy-weight floor impact sound in multi-unit house using finite element analysis, Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, 28(6), 2015, pp.645-658.)
- [3] 김수홍, 류종관, 황재승, 전산해석을 통한 질량동조감쇠기 적용 슬래브의 바닥충격음 저감 성능 검증, 한국소음진동공학회논문집, 제34권 제1호, 2024, pp.84-94. // (S.H. Kim, J.K. Ryu, J.S. Hwang, Verification of floor impact sound reduction performance of a slab with an applied tuned mass damper using computational analysis, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 34(1), 2024, pp.84-94.)
- [4] 연준오 외 3인, 공동주택 거주자 실충격력을 고려한 바닥 매트류의 충격음 저감량 평가, 한국건축환경설비학회 논문집, 제13권 제5호, 2019, pp.291-302. // (J.O. Yeon et al., Evaluation of impact sound reduction for floor mats considering the impact of residents in apartment housing, Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, 13(5), 2019, pp.291-302.)
- [5] 김태민, 양홍석, 유한요소해석을 이용한 중량충격원 종류 및 평가지표별 바닥충격음 예측 정확도 검증, 한국소음진동공학회논문집, 제30권 제2호, 2020, pp.169-178. // (T.M. Kim, H.S. Yang, 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, 30(2), 2020, pp.169-178.)
- [6] 이성복 외 3인, 유한요소해석법을 이용한 공동주택 뜬바닥 구조 중량충격음 예측, 한국소음진동공학회논문집, 제33권 제4호, 2023, pp.402-411. // (S. Lee et al., Prediction of heavy weight impact sound in apartment with floating floor structure using finite element analysis method, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 33(4), 2023, pp.402-411.)