유한요소해석을 이용한 공동주택의 중량충격음 예측

문 대 호¹ · 이 상 현¹ · 황 재 승² · 백 길 옥³ · 박 홍 근^{3*}

¹단국대학교 건축공학과, ²전남대학교 건축공학과, ³서울대학교 건축학과

Prediction of Heavy-Weight Floor Impact Sound in Multi-unit House using Finite Element Analysis

Dae-Ho Mun¹, Sang-Hyun Lee¹, Jae-Seung Hwang², Gil-Ok Baek³ and Hong-Gun Park³

¹Department of Architectural Engineering, Dankook University, Yongin, 06289, Korea

²Department of Architectural Engineering, Chonnam National Univ., Gwangju, 61186, Korea

³Department of Architecture & Architectural Engineering, Seoul National Univ., Seoul, 08826, Korea

Abstract

In this study floor impact noise and structure acceleration response of bare concrete slabs were predicted by using *Finite Element Analysis*(FEA). Prediction results were compared with experimental results to prove the accuracy of numerical model. Acoustic absorption were addressed by using panel impedance coefficients with frequency characteristics and structural modal damping of numerical model were applied by modal testing results and analysis of prediction and test results. By using frequency response function, the floor acceleration and acoustic pressure responses for various impact sources were calculated at the same time. In the FEA, the natural frequencies and the shapes of vibration and acoustic modes can be estimated through the eigen-value analysis, and it can be visually seen the vibration and sound pressure field and the contribution of major modes.

Keywords : finite element method, FEM, heavy weight impact sound, frequency response function

1. 서 론

구조기인 방사음(structure born sound)은 진동하는 구조물의 형상과 음환경 조건이 이상적인 경우 이론적 해를 도출할 수 있으며, 이 이론해는 해에 포함된 변수들에 대한 다양한 분석을 가능하도록 하여 문제해결을 위한 설계요소를 설정하고, 그 설계 요소에 대한 명확한 최적화를 가능하게 해준다. 하지만 구조체의 형상과 재료 물성이 복잡해지거나 구속조건이 다양할 경우 이론해의 도출은 불가능하며, 실제의 경우 대부분 이런 복잡한 조건이 적용된다. 수치해석은 이러한 복잡한 시스템에 대해 수학적인 근사해(approximation solution)를 도출할 수 있도록 해준다.

구조기인 소음에 대한 수치해석 기법으로 통계적에너지해석법(SEA, statistical energy analysis), 경계요소법

(BEM, boundary element method), 그리고 유한요소법(FEM, finite element method)은 가장 많이 활용되고 있다. 이 수치해석 기법들은 예측하고자 하는 유사해의 특성과 물리적 환경조건 그리고 해석모델에 대한 지배방정식에 따라 다르게 사용된다. 구조기인 소음예측은 진동해석 및 음향해석에 주로 주파수영역 해석이 사용되고 있으며, 예측하고자 하는 주파수영역에 따라 수치해석 기법들은 Fig. 1과 같이 구분될 수 있다.

SEA 해석 기법은 1960년대부터 대두된 수치해석 기법(Richard Lyon, 1959)으로, 소음 및 진동시스템의 에너지 흐름을 투과손실을 통해 계산할 수 있다. SEA법은 시스템의 모드밀도가 높고 입력이 랜덤인 상황에서 평균에너지를 계산하기 때문에 모드밀도가 높은 고주파 영역의 해석에 적합하며, 특정 주파수 또는 저주파영역 해석에는 부적합하다.

* Corresponding author:

Tel: +82-2-880-7053; E-mail: parkhg@snu.ac.kr

Received October 19 2015; Revised November 16 2015;

Accepted November 17 2015

©2015 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

FEM과 BEM 수치해석 기법은 연속된 시스템을 유한개의 요소로 나누어 지배방정식을 만족하는 근사해를 구하는 방법이다. 소음진동 분야에서 이 수치해석 기법은 저주파수 영역의 실내 또는 실외 방사소음 해석에 적합하며, 높은 주파수 해석을 위해서는 보다 작은 크기의 요소를 사용해야 한다. 요소의 개수가 증가될수록 많은 해석시간이 필요하기 때문에 고주파해석에 대해서는 부적합하다.

Fig. 1 Numerical analysis in frequency range

공동주택의 중량충격음은 표준중량충격원(뱅머신) 가진에 대한 구조체의 진동에 의해 발생하는 저주파 충격소음으로 KS F 2810-2에서는 1/1 옥타브 밴드의 63, 125, 250, 500Hz 중심주파수에 대해 최대 음압레벨을 측정하도록 하고 있다. 중량충격음은 충격원의 충격력 스펙트럼 특성을 반영하여 100Hz이하 저주파 영역에 진동 및 음향에너지가 집중되는 특성을 갖고 있기 때문에 수치해석 모델은 100Hz 이하 저주파 대역에서 높은 예측 정밀도가 요구된다(Mun *et al.*, 2014). 이러한 중량충격음의 물리적 특성과 환경특성을 고려할 때 중량충격음 예측을 위한 해석 기법은 FEM 또는 BEM이 가장 적절한 해석기법임을 알 수 있다.

중량충격음은 저주파 대역에서 특정 주파수에서 진동 및 음압 피크가 발생하는 모드응답 특성을 갖고 있다. 이러한 모드응답은 시스템의 가진위치에 따라 응답 특성이 크게 바뀌기 때문에 바닥충격음 분석에 있어 진동모드 분석과 음향 모드 분석은 필수적이다.

FEM은 진동 및 음향모델에 대한 고유치 해석이 가능하고 이 모드들에 대한 형상을 가지적으로 보여줄 수 있기 때문에 BEM보다 직관적인 결과분석이 가능하다. 또한 공동주택 수음실과 같이 수치해석 모델의 크기가 커서 요소개수가 많은 경우 FEM은 BEM 보다 계산시간이 빠르다. 이러한 조건들을 고려했을 때 공동주택 중량충격음 예측을 위한 수치해석 기법은 FEM이 가장 적합하다.

Mun(2012)의 연구에서 유한요소법을 이용하여 공동주택 시험동의 바닥충격음을 예측하였으며, 유한요소법을 이용한

바닥충격음 예측이 실내 음향모드를 고려하여 비교적 정확한 바닥충격음을 예측하였다. 하지만 실제 거실의 흡음 물성에 대해 대략적인 공기의 음압 감쇠 물성을 사용하여 다양한 거실 실내 표면 마감에 대한 흡음 조건을 적용하지 못하였고 수치해석 결과로 사용되는 RMS FFT 스펙트럼에 1.4를 곱하여 Peak 크기의 스펙트럼 값을 바닥충격음 레벨로 나타내었지만 실제의 경우 바닥충격음 음압신호의 파고율이 사인함수보다 크기때문에 PEAK FFT 스펙트럼의 밴드합을 통해 계산되는 1/3 옥타브 음압레벨보다 최대 음압레벨이 더 크게 나타난다.

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 맨바닥 콘크리트 슬래브 조건의 공동주택 거실에 대한 구조해석 모델과 음향해석 모델을 개발하고 예측된 바닥 가속도와 음압 레벨을 실험 결과와 비교하여 예측에 대한 정확성을 검증하였다.

2. 구조 및 음향해석 모델의 지배방정식

유한요소법을 이용한 구조 및 음향해석은 외부 가진에 대한 구조물의 진동응답과 구조물의 진동에 의해 방사되는 수음실의 음장예측을 목적으로 한다. 구조해석 모델과 음향해석 모델은 물리적으로 연계(coupled)되어 있지만 실제공동주택 바닥충격음 예측에 사용되는 음향모델인 공기 매질은 비중과 휨강성이 큰 콘크리트 구조물의 동특성을 크게 변화시키기 어렵다. 구조물과 공기 매질이 연계된 수치해석 모델을 사용할 경우 공기의 음향해석 모델은 주파수가 증가할수록 고차모드의 개수가 기하급수적으로 증가하기 때문에 해석시간이 매우 많이 소요되어 수치해석의 효율성 면에서 부적합하다.

결과적으로 바닥충격음 예측을 위한 구조해석 모델과 음향해석 모델은 독립적으로 구성할 수 있으며, 이 방법은 수치해석 시간을 단축하고 구조해석 모델과 음향해석 모델에 대한 독립적인 결과 분석을 가능하게 한다.

Fig. 2 Numerical calculation flow of structure vibration and floor impact sound

Fig. 2는 바닥충격음 수치해석을 위한 계산과정을 나타낸다. 구조해석 모델과 음향해석 모델은 구조해석 모델의 속도 응답과 음향해석 모델의 속도 경계조건을 통해 연계되며, 수음실 음압응답은 구조해석 모델의 속도응답 결과를 경계조건으로 하여 계산된다. 음향해석 모델의 정확성은 근본적으로 구조해석 모델의 정확성에 따라 결정되기 때문에 구조해석 모델에 대한 해석결과 검증은 고유모드 분석(모드 형상, 고유진동수, 모달 감쇠비 등) 및 주파수 응답함수 등 보다 정밀한 척도를 이용하여 검증되어야 한다.

수치해석의 첫번째 단계로 운동방정식을 만족하는 구조해석 모델의 외부 가진에 대한 구조물의 진동응답을 주파수 영역에서 계산한다. 가진원으로 충격력 측정장비를 이용하여 측정된 뱀머신 또는 고무공의 충격력 스펙트럼이 사용되며, 수치해석 모델의 재료 물성은 콘크리트 재료에 대한 탄성계수, 밀도, 프아송 비 등이 입력되고 모달 감쇠비 등을 적용하여 운동방정식의 감쇠력을 적용시킬 수 있다. 진동응답은 변위-속도-가속도 등에 대해 계산할 수 있으며, 주파수영역에서 이들 물리량은 식 (1)을 통해 간단히 변환된다.

$$u = \frac{v}{j\omega} = \frac{a}{(j\omega)^2} \quad (1)$$

여기서, u, v, a 는 각각 변위, 속도, 가속도를 나타내며, ω 는 각진동수, j 는 허수단위를 의미한다.

두번째 단계로 공기의 파동방정식을 만족하는 음향해석 모델의 음압응답을 주파수영역에서 계산한다. 음향해석 모델의 경계조건은 부과된 음압, 표면속도, 표면 임피던스 등이 사용된다. 음압 경계조건은 음원이 없을 경우 무시되고 표면 속도 경계조건으로 구조체 진동해석을 통해 계산된 표면 법선 속도(surface normal velocity)가 입력된다. 표면 임피던스 경계조건으로 바닥, 벽 등의 표면 임피던스가 적용되어 수음실의 흡음특성을 주파수 특성에 따라 입력할 수 있다.

유한요소법을 이용할 경우 최대 해석 가능한 주파수영역은 요소의 크기에 따라 결정된다. 선형요소(Linear Element)를 사용할 경우 식 (2)와 같이 음파의 한 파장 안에 최소 6개 요소가 존재하도록 해석모델을 구성해야 하며, 이 조건은 구조모델과 음향모델 모두에 적용된다.

$$6 \times \text{Element size} \leq \lambda_{\min} = \frac{c}{f_{\max}} \quad (2)$$

여기서, $\lambda_{\min}$ 은 음파 파장의 최소길이, $f_{\max}$ 는 해석하고자 하는 최대 주파수 그리고 c 는 음속을 나타낸다.

본 연구에서는 0.15m 크기의 선형요소를 사용하여 구조해석 모델과 음향해석 모델을 구성하였다. 최소 요소 크기는 음속이 콘크리트 보다 느린 공기를 기준으로 결정되며, 0.15m 요소 크기에 대한 최대 해석 주파수는 약 381Hz이고, 1/1 옥타브 밴드의 250Hz 중심주파수의 상한 주파수인 353Hz를 포함한다. 보다 작은 크기의 요소를 사용할 경우 옥타브 밴드 500Hz 중심주파수에 대한 상한 주파수인 707Hz까지 해석 가능하지만 500Hz의 음압레벨은 중량충격음의 크기를 결정하는 주요 주파수가 아니기 때문에 해석의 시간적 효율성을 고려하였을때 음향모델의 최소 요소 크기는 0.15m가 가장 적절하다.

2.1 구조해석 모델 지배방정식

진동하는 플레이트의 굽힘파(bending wave)는 가청 주파수 내에서 공기매질과 가장 큰 상호작용을 일으키며, 음향 방사 효율은 플레이트의 파수(wave number)와 공기의 파수가 동일할 때 가장 크고 에너지를 효과적으로 전달시킨다(Cremer, 2005).

따라서 구조기인 소음 예측을 위한 구조해석 모델은 외력 가진에 대한 휨모드 응답을 가장 정확하게 예측할 수 있어야 한다. 공동주택의 바닥과 벽의 폭 두께비가 작기 때문에 얇은 판으로 정의될 수 있으며, 진동하는 콘크리트 구조체의 진동 변형은 미소변형으로 선형탄성 거동으로 가정할 수 있다. 이러한 응력 조건에서 판의 거동은 얇은 판 이론을 적용하여 식 (3)과 같이 $x-y$ 평면에서 파동방정식(bending wave equation)으로 나타낼 수 있다(FAHY 2007).

$$D \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) u = q - m \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right) \quad (3)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (4)$$

여기서, D 는 휨강성(bending stiffness), E 는 영의 계수(Young's modulus), ν 는 프아송의 비(Poisson's ratio), 그리고 h 는 plate thickness를 의미한다.

구조해석 모델의 유한요소 운동방정식은 2차원 쉘요소를 사용하여 나타낼 수 있으며, 에너지 평형조건을 적용하여 식 (5)와 같은 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$[M]\{\ddot{w}\} + [C]\{\dot{w}\} + [K]\{w\} = \{f\} \quad (5)$$

여기서, $[M]$, $[C]$, 그리고 $[K]$ 는 각각 전체 좌표계의 질량행

렬, 감쇠행렬, 그리고 강성행렬을 나타내며, $\{w\}$ 와 $\{f\}$ 는 절점의 z 방향 변위와 외력을 의미한다.

2.2 음향해석 모델 지배방정식

음파는 유체 입자들의 압력변화 현상이며, 입자들이 압축과 팽창을 반복하면서 매질 내에서 전파된다. 음파는 입자의 진동방향과 파동의 전파방향이 동일한 종파(longitudinal wave)로 정의될 수 있으며, 공기를 통해 전파되는 음파는 공기매질의 미세한 압력변화로 식 (6)의 선형음파방정식(linearized acoustic wave equation)을 따른다.

$$\nabla^2 p' - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} = 0 \quad (6)$$

여기서, p' 와 c 는 각각 매질의 압력변화와 음속을 나타낸다.

정상상태에서 임의의 위치에서 음압은 주파수 영역에서의 파동방정식인 2차 헬름홀츠 방정식(second-order Helmholtz equation)의 지배를 받으며, 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla^2 p(x, y, z) + k^2 p(x, y, z) = -j\rho_0 \omega q(x, y, z) \quad (7)$$

여기서, p 는 음압, $k = \omega/c = 2\pi f$ 는 파동수, c 는 음속, ρ_0 는 매질의 질량밀도, 그리고 q 는 음원의 크기를 의미한다.

거실 내부의 공기 매질에 대한 유한요소 음향해석 모델은 8절점 6면체 요소를 사용할 수 있으며, 근사해는 압력의 단위를 갖고 각 절점의 자유도는 1을 갖는다. 식 (7)의 파동방정식을 만족하는 유한요소 음향해석 모델에 대한 전체좌표계에서의 운동방정식은 식 (8)과 같다.

$$([K] - \omega^2[M] + j\omega[C])\{p\} = \{F\} \quad (8)$$

여기서, $[K]$ 와 $[M]$ 은 각각 음향강성 행렬과 음향질량 행렬을 나타내며, $[C]$ 는 음향감쇠 행렬로 경계면에서의 임피던스값을 반영할 수 있다. 그리고 $\{F\}$ 는 음향가진 매트릭스로 임의의 위치에서의 음원크기 벡터와 경계면에서의 음압 및 음속 경계조건을 포함한다.

3. 유한요소법을 이용한 구조체 가속도 응답과 바닥충격음 예측

3.1 실험 개요

실제 시공중인 공동주택의 거실을 대상으로 바닥 진동모드,

고무공 가진에 대한 바닥 가속도와 바닥충격음을 계측하였으며, 이 실험결과를 바탕으로 유한요소해석 모델의 입력 물성을 도출하고 최종 수치해석 모델의 정확성을 검증하였다.

Fig. 3에 거실의 구조 평면도에 측정위치를 나타내었다. 실험된 공동주택은 공동주택 시공현장으로 바닥 마감 구조가 (경량기포 콘크리트, 완충재, 마감물탈 등)이 설치되기 이전의 상태로 콘크리트 슬래브, 콘크리트 벽, 욕실 및 다용도실 비구조벽(조적벽돌), 그리고 단열재가 시공된 상태이며, 천장 및 각 실의 방문 등은 시공되지 않았다. 거실은 84m^2 평형 형태로 주방과 거실을 구획하는 벽이 없는 일자형 형태로 되어 있으며, 수음실과 음원실 모두 거실 발코니가 없는 확장형 평면으로 되어 있다. 거실의 크기는 $4.5 \times 5.1 \times 2.7$ (층고)m이며, 슬래브 두께는 210mm이다. 콘크리트 벽 두께는 세대간 벽은 250mm, 세대내벽은 180-200mm 두께로 시공되었다.

실험은 거실에 대해 바닥진동모드, 가속도 및 음압 주파수 응답함수, 그리고 바닥충격음(고무공 가진)을 계측하였다. 바닥 진동모드 분석은 거실과 주방을 포함한 바닥판을 25개 측정점으로 구획하고 충격가진법(roving hammer)을 이용하여 분석하였다. 바닥충격음 및 주파수 응답함수 측정시 가진점은 Fig. 3의 P1~5이며, 가속도계와 마이크로폰 위치는 P1과 P2에 각각 2개씩 설치하였다. 가속도계는 천장 콘크리트 슬래브 하부에 설치하였으며, 마이크로폰은 바닥으로부터 1.2m 높이에 설치하였다.

Fig. 3 Structural plan and measurement points of tested living room

3.2 유한요소 수치해석 모델

구조진동해석과 음향해석은 LMS virtual.lab acoustics 13.1을 이용하였다. 진동응답과 음압응답은 1-800Hz에 대해 1N의 unit force에 대한 응답인 주파수 응답함수를 계산하였으며, 이 계산결과에 뱅머신과 고무공의 충격력 스펙트

럼을 곱하여 뱀머신과 고무공 가진에 대한 구조체 진동응답과 수음실 음압응답을 계산하였다(Mun *et al.*, 2014).

구조체 진동응답은 모드해석 결과를 바탕으로 모드 중첩법(modal superposition structural response case)을 이용하여 계산하였으며, 구조진동 모드는 1000차 모드까지 계산되었고 1000차 모드에서 고유진동수는 약 600Hz이다. 음압응답은 1Hz 단위로 계산된 구조체 속도응답 결과를 음향해석 모델의 경계조건으로 적용하여 direct solver를 이용하여 계산하였다. 구조해석 모델과 음향해석 모델을 각각 Fig. 4(a)와 (b)에 나타내었다.

구조해석 모델은 1개 세대를 전체 모델링하여 연속된 콘크리트 슬래브와 콘크리트 벽에 대한 지지조건을 반영하였다. 콘크리트 슬래브와 콘크리트 벽은 4 node shell 요소를 사용하여 모델링하였으며, 콘크리트 물성은 $E=23 \times 10^9$ (Pa), $\rho=2400$ (kg/m³), $\nu=0.167$ 을 사용하였다. 콘크리트 슬래브 및 콘크리트 벽의 두께는 구조평면도에 기입된 수치와 동일한 수치를 사용하였다. 진동응답에 대한 감쇠는 3~4% 모달 댐핑을 사용하였다.

음향해석 모델은 거실을 포함하여 거실과 인접한 주방, 복도, 현관까지 모델링하였다. 실험조건에서 방문은 시공되지

(a) Structural FE model

(b) Acoustic FE model

Fig. 4 FE model for structural vibration and acoustic response analysis

않아 거실과 방이 연결된 음향해석 모델을 사용해야 하지만 해석모델이 커질 경우 계산시간이 증가되기 때문에 해석하고자 하는 주요 관심 주파수인 100Hz 이하에서 방문의 개방여부는 바닥충격음 변화에 큰 영향을 주지 않을 것으로 가정하고 방은 음향해석 모델에서 제외하였다. 음향해석 모델은 8 node linear acoustic hexahedral 요소를 사용하여 모델링하였으며, 요소의 최대 크기는 0.15m이다. 공기 물성을 적용하여 음속 $c=340$ (m/sec), 공기의 밀도 $\rho=1.225$ (kg/m³)를 사용하였다. 수음실 벽과 바닥 표면의 흡음 조건에 대해 absorbent panel property로 20,000~120,000 (kg/m²/s)의 임피던스 값을 각 주파수별로 다르게 적용하여 입력하였다.

3.3 진동모드 및 음향모드 수치해석 결과

Fig. 5에 거실과 주방을 포함한 파다판에 대한 25개 측정점의 모달테스트 실험결과와 진동모드 해석결과를 비교하여

Mode	Experimental	FEA
1	24, 27Hz	25.4Hz
2	34Hz	33.9Hz
3	45, 49Hz	44.2Hz
		48.3Hz

Fig. 5 Comparison of measured and FE model mode shapes

내타내었다.

모달 테스트 실험결과 Fig. 5에서 1차 모드 응답은 24, 27Hz의 두개 고유진동수를 갖는 것으로 나타났으며, 해석결과에서는 그 중간 값인 25.4Hz에서 1차 모드 고유치가 계산되었다(실험결과에서 동일한 모드형상이 두개의 서로 다른 고유진동수에서 발생하는 현상은 인접한 상하 세대 거실 슬래브에 대한 응답이 반영되었기 때문이다.). 거실의 2차 모드는 실험결과와 해석결과가 동일하였으며, 34Hz의 고유진동수를 나타내었다. 3차 모드 고유진동수는 실험결과 45, 49Hz에 나타났으며, 해석결과는 동일한 모드형상이 실험결과와 유사한 44, 48Hz에서 나타났다. 4, 5차 모드의 고유진동수는 실험결과 67, 71Hz에서 발생되었으며, 해석결과는 실험결과보다 다소 낮은 65, 67Hz에서 나타났다.

모드형상에 대한 실험결과와 수치해석결과의 유사성은 식 (8)을 통해 계산되는 Modal Assurance Criteria(MAC) value 이용하여 평가될 수 있으며, MAC value가 1에 가까울수록 모드형상이 유사함을 의미한다.

$$MAC = \frac{|\{\Psi_i^a\}^T \{\Psi_j^t\}|^2}{(\{\Psi_i^a\}^T \{\Psi_i^a\})(\{\Psi_j^t\}^T \{\Psi_j^t\})} \quad (9)$$

여기서, $\{\Psi_i^a\}$ 은 수치해석 모델의 i 번째 모드형상 벡터, $\{\Psi_j^t\}$ 은 실험결과의 j 번째 모드형상 벡터를 나타낸다.

Table 1과 Fig. 6에 각각 1-5차 모드 형상에 대한 MAC value와 이 값에 대한 3차원 막대그래프를 나타내었다.

1~3차 모드에 대한 MAC value는 0.97~0.99로 나타나 해석모델의 모드 형상이 실험결과와 매우 유사하게 나타났다. 4, 5차 모드는 유사한 모드형상이 서로 다른 고유진동수에서 발생하는 모드로 MAC value는 4, 5차 모드 각각 0.92, 0.89로 나타났다. 고차모드로 갈수록 MAC value는 낮게 나타났다.

Fig. 6 3D presentation of MAC data

Table. 1 Numerical presentation of MAC data

Mode	1	2	3	4	5
1	0.9935	0.0110	0.0128	0.0016	0.0061
2	0.0000	0.9849	0.0001	0.0062	0.0089
3	0.0152	0.0145	0.9730	0.1759	0.0640
4	0.0006	0.0113	0.2437	0.9289	0.6862
5	0.0046	0.0006	0.1220	0.8948	0.8927

Fig. 7은 거실의 주요 음향모드에 대한 형상과 고유진동수를 나타내었다. 음향모드의 차수가 낮을수록 음압이 크게 발생하는 위치는 거실과 주방의 단부와 코너부에 넓게 분포되고 있다.

Fig. 8은 고무공으로 거실 중앙을 가진하였을 때 거실 중앙수음점 P1과 코너수음점 P2에서의 음압 파워스펙트럼과 피크 주파수에 해당하는 음향모드를 나타낸 그래프이다. 실험결과의 피크 음압이 발생하는 주파수와 Fig. 7의 음향모드 고유진동수가 비교적 유사하였다.

Fig. 7 Acoustic mode shapes and natural frequencies

Fig. 8 Power spectrum of acoustic pressure and floor acceleration in the case of impact on floor center P1

3.4 구조해석 모델 진동모드 감쇠비

모달 테스트를 통해 계산된 진동 모드 감쇠비는 2~5% 수준이었다. 구조해석 모델에 대한 모달감쇠비를 1, 2, 3, 4, 5%로 가정하고 가속도 주파수 응답과 고무공 가진에 대한 가속도 응답을 실험결과와 비교하여 구조해석 모델에 대한 모드 감쇠비를 도출하였다.

모드 감쇠비는 각 모드에 대한 감쇠력을 나타내기 위한 모드별로 독립된 계수이며, 각 모드 차수별로 다른 값을 나타낸다. n 번째 고유모드에 대한 운동방정식은 식 (10)으로 나타낼 수 있으며, 식 (10)은 2차 미분방정식으로 각 모드 차수별로 m_n , c_n , k_n , P_n 은 독립된 상수 계수를 갖는다. 식 (11), (12)는 각각 식 (10)에 대한 n 차 모드의 고유 진동수와 모드 감쇠비이며, 이들은 질량행렬과 강성행렬에 영향을 받는다.

$$m_n \ddot{q}_n + c_n \dot{q}_n + k_n q_n = P_n \quad (10)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_p}{m_p}} \quad (11)$$

$$\zeta_n = \frac{c_n}{2\sqrt{m_n k_n}} = \frac{\eta_n}{2} \quad (12)$$

여기서, m_n 는 n 번째 모드의 질량, c_n 는 n 번째 모드의 감쇠, k_n 는 n 번째 모드의 강성, P_n 은 n 번째 모드의 외력, 그리고 η_n 은 n 번째 모드의 손실계수(loss factor)이다.

Fig. 9와 10은 각각 거실 중앙 가진점 P1에서 계측된 가속도 주파수응답함수와 고무공 가진에 대한 가속도 레벨을 나타낸 그래프이다. 실험결과와 1~5% 모드감쇠비를 적용한 해석결과를 같이 비교하였다. 스펙트럼의 형상과 최대 응답 크기를 고려할 때 3~4% 모드 감쇠비가 실험결과와 가장 유사한 결과를 나타내고 있다.

Fig. 9 Acceleration frequency response function according to modal damping(impact P1-receive P1)

Fig. 10 Acceleration level according to modal damping(rubber ball, impact P1-receive P1)

3.5 음향해석 모델의 표면 흡음

음향해석 모델의 흡음 조건은 경계면에서의 특성 임피던스(characteristic impedance)를 이용하여 구현할 수 있다. 거실 표면의 임피던스는 식 (13)을 통해 공기매질과 거실 표면 매질에 대한 반사계수 R 를 이용하여 계산될 수 있다. 반사계수 R 은 기존 문헌의 콘크리트 흡음률(absorption coefficient; 입사되는 음향파위에 대한 흡음되는 음향파위의 비)을 통해 계산될 수 있다.

$$R = \frac{Z - \rho_0 c_0}{Z + \rho_0 c_0} \quad (13)$$

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (14)$$

여기서, R 은 반사계수(reflection coefficient), Z 은 패널임피던스(panel impedance), $\rho_0 c_0$ 는 음향특성임피던스(acoustic characteristic impedance; 413kg/m²/s at 20°C), 그리고 α 는 흡음계수(absorption coefficient)를 나타낸다.

하지만 식 (13)을 이용하여 계산되는 임피던스는 평면파가 표면에 수직으로 입사되는 조건을 통해 계측되기 때문에 바닥충격음의 수음실 환경조건과는 다른 특성을 지닌다. 따라서 본 연구에서는 250Hz의 콘크리트의 흡음계수 0.02에 대응되는 임피던스 8000을 기준으로 바닥-천장-벽에 대한 표면 임피던스를 2000, 4000, 8000, 16000으로 변화시켜 바닥충격음을 예측하고 실험결과와 비교하여 주파수 특성을 갖는 임피던스 값을 도출하였다. 음향해석 모델에 입력된 구조체 속도응답 해석결과는 3.4절에서 도출된 3~4% 모드감쇠비를 적용하고 슬래브의 가속도 진동응답에 대한 실험결과

와 수치해석 결과가 가장 유사한 구조해석 모델을 이용하였다.

Fig. 11은 거실 중앙점 P1을 고무공으로 가진한 경우에 대한 중앙수음점 P1과 코너수음점 P2에서의 바닥충격음 레벨을 나타낸 그래프이며, 실험결과와 임피던스 값을 2000, 40000, 80000, 160000으로 적용한 수치해석 결과를 비교하여 나타내었다.

Fig. 11(a), (b)에서 패널임피던스의 크기가 작을수록 음압 레벨이 감소하는 특성이 반영되어 나타나고 있으며, 실험결과와 해석결과가 유사하게 나타나는 임피던스 값은 주파수마다 다른 특성을 갖고 있다. 낮은 주파수에서는 높은 임피던스값이 해석결과와 유사하며, 높은 주파수에서는 낮은 임피던스값이 해석결과와 유사하게 나타났다. 31.5Hz이하 주파수에서는 임피던스 값에 따른 바닥충격음 레벨 변화가 없는 것으로 나타나 구조체 진동에 의한 직접음만 수치해석결과에 반영되었음을 확인할 수 있다.

실험결과와 해석결과를 비교하여 도출한 음향해석 모델의 임피던스 값은 Fig. 12와 같다. 임피던스 값은 수치해석 주

파수 스텝과 동일하게 1Hz 단위로 입력하였으며, 31.5, 63, 125, 250, 500Hz 중심주파수에서의 임피던스 값을 각각 140000, 120000, 120000, 60000, 60000으로 설정하고 중심주파수 사이 값은 선형보간하였다. 125Hz 이하에서는 흡음의 영향이 크지 않음을 고려하여 125Hz 이하 주파수에서는 125Hz의 임피던스 값 또는 이보다 큰 값을 적용하였다(Jeong *et al.*, 2014).

Fig. 12 acoustic panel impedance for concrete surface(rough finish)

4. 실험결과 및 예측결과 비교

4.1 바닥 가속도 레벨

Fig. 13은 고무공 가진에 대한 가속도레벨을 실험결과와 수치해석 결과를 비교한 그래프이며, P1과 P2의 측정점에 대해 나타내었다. 진동해석모델의 모드감쇠비는 1, 2차모드에 대해 3%를 적용하고 그 이상 진동모드에 대해서는 4%를 적용하였다.

Fig. 13(a), (b)의 거실 중앙 P1가을 가진한 경우에 대한 거실 중앙 P1과 코너 P2에서의 가속도레벨은 실험결과와 해석결과가 유사하게 나타났다. Fig. 13(c)의 거실 코너 P2를 가진한 경우에 대한 거실 코너 P2에서의 응답은 100Hz 이상 주파수에서 해석결과가 실험결과보다 다소 크게 나타났다.

4.2 음압 주파수 응답함수(Acoustic FRF)

Fig. 14는 가진점 P1, P2 대한 수음점 P1, P2에서의 음압 주파수 응답함수를 나타낸 그래프이며, 실험결과와 수치해석 결과를 비교하여 나타내었다. 음향해석 모델은 흡음 조건으로 Fig. 12의 임피던스 조건을 거실 음향모델의 천장-바닥-벽에 부여하고 Fig. 13의 구조해석 모델에 대한 속도 응답 결과를 경계조건으로 적용하였다.

(a) Receive point P1

(b) Receive point P2

Fig. 11 Rubber ball impact sound pressure level according to acoustic impedance

(a) Impact P1-receive P1

(b) Impact P1-receive P2

(c) Impact P2-receive P2

Fig. 13 Comparison between experimental and numerical results on acceleration level

Fig. 14(a)~(d)의 그래프에서 수치해석결과는 각 음향모드 고유진동수에서의 피크 응답 크기와 주파수를 비교적 유사하게 예측하였으며, 음압 주파수 응답함수의 가진점과 수음점에 대한 주파수 특성까지 유사하게 예측하였다. 하지만 13, 40Hz에서 응답은 실험결과와 다르게 나타났으며, 특히 중앙 수음점에서 수치해석결과의 오차가 크게 발생되었다.

4.3 바닥충격음 레벨

중량충격음은 1/3 옥타브 또는 1/1 옥타브 밴드 최대음압

(a) Impact P1-receive P1

(b) Impact P1-receive P2

(c) Impact P2-receive P1

(d) Impact P2-receive P2

Fig. 14 Comparison between experimental and numerical results on acoustic pressure frequency response function

레벨($L_{i,Fmax}$)을 측정하도록 규정되어 있다. 최대 음압레벨은 밴드패스 필터를 통과한 파형에 대해 빠른(Fast, 125ms) 시정계수를 적용한 지수평균 값에 대한 최대값을 의미한다.

하지만 유한요소 수치해석을 이용하여 계산되는 구조체 진동과 음압응답은 1Hz 주파수 정밀도(frequency resolution)의 FRF와 고무공 또는 땀머신 충격원의 FFT 스펙트럼을 사용하기 때문에 실험조건과 주파수 분석 조건이 다르다.

수치해석 결과의 FFT 스펙트럼은 충격원이 바닥을 가진하는 순간 발생하는 진동 및 음압신호에 대해 보다 세밀한 주파수 구간에서 응답을 예측하고 분석하여 진동모드 또는 음향모드의 응답까지 예측할 수 있다. 하지만 이 스펙트럼을 옥타브 밴드로 환산한 결과는 결과적으로 옥타브 밴드패스 필터 통과한 신호의 RMS값이기 때문에 최대 음압레벨과는 Fig. 15와 같은 차이를 발생시킨다. Fig. 15의 그래프는 실험된 공동주택의 중앙 거실에 대한 수음실 P2 위치에서의 음압 신호를 FFT 분석한 ESD spectrum과 이 스펙트럼을 1/3 옥타브 밴드로 환산한 스펙트럼, 그리고 1/3 옥타브 밴드 최대 음압레벨(L_{Fmax}) 스펙트럼을 비교한 그래프이다.

FFT 분석결과를 1/3 옥타브 밴드로 환산한 FFT synthesis 음압레벨과 최대 음압레벨 L_{Fmax} 는 각 중심주파수에서 약 4~6dB 차이를 나타내고 있다. 이러한 레벨 차이는 임펄스 성분의 중량충격음 신호가 갖는 파고율(crest factor)이 크기 때문에 발생되며, 이 파고율은 각 중심주파수에서 분석되는 신호마다 모두 다른 값을 갖는다.

본 연구의 수치해석 결과는 1초의 시간이력에 대한 ESD 스펙트럼이기 때문에 Fig. 15와 같이 최대 음압레벨로 환산하기 위해 ESD 스펙트럼을 밴드합을 통해 1/3 옥타브 밴드로 환산하고 각 중심주파수 예측 값에 5dB의 보정치를 더하여 바닥충격음 최대 음압레벨로 환산하였다.

Fig. 16은 고무공 가진에 대한 각 가진점과 수음점에서의 바닥충격음 최대 음압레벨에 대해 실험결과와 예측결과를 비

Fig. 15 Impact sound pressure spectrum level analyzed by using FFT, FFT synthesis, and 1/3 octave band pass filter(L_{Fmax})

(a) Impact P1-receive P1

(b) Impact P1-receive P2

(c) Impact P2-receive P1

(d) Impact P2-receive P2

Fig. 16 Comparison between experimental and numerical results on 1/3 octave floor impact sound pressure level

Table. 2 Prediction results and deviation level from measured results(prediction-measured)

1/1 Octave	Impact P1	Impact P2	Impact P3	Impact P4	Impact P5	Average
31.5	78.9 (-1.7)	65.3 (-9.0)	64.7 (-9.5)	69.7 (-5.0)	70.7 (-3.9)	69.9 (-5.8)
63	68.4 (+3.2)	64.6 (+2.2)	64.2 (+2.3)	66.1 (+0.2)	67.8 (+1.5)	66.2 (+1.9)
125	68.1 (-0.7)	67.4 (+2.9)	65.3 (+0.9)	68.8 (-0.6)	69.2 (+0.5)	67.8 (+0.6)
250	61.8 (+1.9)	62.9 (+2.5)	61.6 (+1.4)	62.8 (+2.6)	62.5 (+3.1)	62.3 (+2.3)
500	52.1 (+1.7)	50.7 (+3.4)	52.6 (+5.6)	49.3 (+1.7)	48.8 (+1.7)	50.7 (+2.8)

교한 그래프이다. Fig. 16(a)의 중앙가진-중앙수음점 바닥 충격음 레벨은 40Hz 이하에서 해석결과가 실험결과보다 낮게 나타났으며, 그 이상 주파수에서는 유사하게 나타났다. (b)의 중앙가진-코너수음점 바닥충격음 레벨은 전주파수 대역에서 실험결과와 해석결과가 유사하였다. (c)의 코너가진-중앙수음점 바닥충격음 레벨은 40Hz 이하에서 해석결과가 실험결과보다 낮게 나타났으며, 50Hz에서는 해석결과 실험결과보다 높게 나타났다. 63Hz 이상 주파수에서는 실험결과와 해석결과가 유사하게 나타났다. (d)의 코너가진-코너수음점 바닥충격음 레벨은 40Hz 이하에서 해석결과가 실험결과보다 작고 50Hz 이상에서는 해석결과가 실험결과보다 큰 음압레벨로 나타났다.

Table 2는 1/1 옥타브 밴드의 수음실 평균 최대음압레벨 예측결과를 나타내며, 예측결과와 실험결과의 차이를 같이 나타내었다. 중앙점 P1 가진 조건에서 실험결과와 수치해석 결과의 오차는 최대 3.3dB로 63Hz에서 발생되었으며 이때 단일 수치 평가량은 51dB 로 동일하였다. 코너 P2 가진점에 대한 오차는 최대 7dB로 31.5Hz에서 발생되었고 63Hz에서의 편차도 5.6dB로 크게 나타났다. 실험결과와 예측결과의 음압레벨 편차는 31.5Hz의 낮은 주파수에서 크게 발생되었으며, 63Hz 이상 최대 3.2dB, 평균 2dB 편차를 나타내었다.

5. 고 찰

시공중인 맨바닥 콘크리트 슬래브 상태의 공동주택 거실을 대상으로 유한요소법을 이용하여 바닥 가속도 및 음압을 예측하는 기법과 수치해석모델의 정확성을 실험결과와 비교하여 검증하였다.

3.5절에서 흡음특성을 수치해석 모델에 반영하기 위해 바닥 및 벽과 음향해석 모델이 접하는 부위에 패널 임피던스값

을 부여하였다. 거친 콘크리트 표면의 250Hz의 흡음률을 기준으로 임피던스 값을 계산하여 적용하였고, 이 임피던스 값을 적용한 수치해석 모델의 예측값이 측정값과 유사하게 나타나 다양한 흡음률을 갖는 실제의 공동주택 표면마감에 대한 흡음 특성을 수치해석 모델에 적용할 수 있는 가능성을 보여주었다.

4장에서 가속도 및 음압 주파수 응답함수를 이용하여 시스템의 응답을 예측하고 최종 바닥충격음 레벨을 계산할 때 해당되는 충격력 스펙트럼만 곱하여 사용하였다. 이러한 계산방법은 시스템의 선형특성을 이용하는 방법으로 1회의 수치해석만으로 향후 다양한 충격원에 대한 진동 및 음압예측 뿐만 아니라 시스템 특성 및 음향파워, 인텐시티 등을 곱하기 연산만으로 계산가능하다. 이러한 주파수 응답함수를 이용한 바닥충격음 예측은 Mun(2014)의 연구에서도 실험적으로도 증명이 되었다.

4.3절의 바닥충격음 예측에서 40Hz 이하 주파수에서 중앙수음점의 바닥충격음 예측값이 실험값보다 작게 나타났으며, 오차도 다른 주파수 대역보다 크게 발생되었다. 이 40Hz 이하 저주파수 영역에서의 음압레벨은 슬래브의 1, 2차 모드 진동응답이 발생하는 영역이기 때문에 보다 정확한 예측이 필요하다. 예측오차가 크게 발생한 원인으로 중앙 수음점은 음향 모드응답이 작게 나타나는 위치에 수음점이 존재하기 때문이며, 수학적으로 이 측정점의 음압은 음향모드에 의한 음압 증폭이 제외된 슬래브 진동에 의한 직접음만 계산되어 진다.

하지만 예측된 Fig. 13에서 슬래브 가속도 응답은 40Hz 이하 주파수에서 1차 25Hz와 2차 45Hz 진동모드 응답이 있지만 Fig. 14(a), (c)의 중앙 수음점의 음압레벨 측정결과에서는 1, 2차 진동모드 주파수에서의 음압보다는 음향모드가 존재하는 40Hz에서의 음압레벨이 크게 나타나고 있다.

실제 공동주택의 음향조건은 방문이 설치되어 있지 않기 때문에 거실과 방이 오픈된 공간으로 되어 있지만 수치해석 모델에서는 수치해석 모델 크기를 줄이기 위해 방문이 닫힌 조건으로 모델링되었다. 음향모드 밀도가 낮은 저주파대역에서의 예측결과는 각각의 음향모드에 의한 영향을 크게 받기 때문에 수치해석 모델의 정확도 향상을 위해서는 보다 실제와 가까운 음향해석 모델로 모델링될 필요가 있다.

Fig. 17은 거실 중앙점 P1을 가진하였을 때 P1과 P2 측정점에서의 가속도(a) 및 음압(c) 측정결과를 나타낸 그래프이며, 40Hz 1/3 옥타브 밴드 중심주파수를 통과한 파형을 비교하여 오른쪽(b, d)에 각각 나타내었다. 40Hz 중심주파수를 통과한 Fig. 17(d)의 음압파형 그래프에서 코너 수음점 P1에서의 음압은 슬래브 진동이 감소되는 시간에 음압이 더욱 증폭되어 나타나고 있다. 이러한 음압증폭은 실내에 발

Fig. 17 Comparison between experimental and numerical results on 1/3 octave floor impact sound pressure level

생된 음파가 반사파에 의해 공진되면서 나타나는 현상으로 음향모드에 지배를 받는다. 중앙 수음점에서의 음압 파형은 (b)의 가속도 파형과 유사하여 감쇠가 비교적 크게 나타나고 있지만 (d)의 화살표로 표시한 영역에서와 같이 미세한 공진 구간이 존재하며, 이러한 공진에 의해 Fig. 14(a), (c)의 40Hz 음압 피크 응답이 나타나게 되어 진다.

수치해석 오차는 해석 모델의 정확성뿐만 아니라 공동주택의 시공오차에서도 기인된다. 즉 콘크리트 재료의 탄성계수와 같은 물성이나 슬래브 두께 등에 의한 시공오차에 의해 동일한 평면을 갖는 세대 내에서 바닥진동 및 바닥충격음의 편차가 발생되기 때문이다. Baek(2014)의 연구에서 연속한 6개 수직세대의 바닥충격음과 슬래브 고유진동수를 분석하였으며, 세대간의 바닥충격음 레벨 편차는 31.5~500Hz 중심 주파수 대역에서 2~4dB 편차를 나타내었다. 특히 31.5Hz 저주파 대역에서 4dB의 최대 편차를 나타내었다. 1차 모드 고유진동수는 각 세대별로 26~32Hz 범위에서 존재하였다.

본 연구의 수치해석 모델은 1개 세대의 실험결과를 이용하여 도출된 값으로 시공오차에 의한 편차 범위에 대해 반영되지는 못하였다. 향후 해석모델에 대한 정확한 물성 파악을 위해서는 수직으로 인접한 세대들의 시공 편차, 각 세대의 진동 및 바닥충격음 실험 결과 및 평균치 등을 조사하고 이에 따라 해석모델이 업데이트되어야 한다.

5. 결 론

유한요소법을 사용하여 공동주택의 구조해석모델과 음향해

석모델을 개발하고 바닥진동과 진동에 의해 발생하는 실내 음압을 예측하였다. 본 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

- (1) 바닥충격음 예측을 위한 유한요소 해석모델의 요소 물성으로 구조적으로 사용되는 탄성계수, 밀도, 감쇠비 등을 사용하여 입력하였으며, 수치해석을 통한 구조체의 진동 및 수음실의 음압레벨 예측결과는 비교적 실험결과와 유사하게 나타났다.
- (2) 구조기인 소음예측을 위해서는 구조체의 진동해석에 대한 신뢰성이 확보되어야 하며, 신뢰성 확보를 위해 진동해석 모델은 슬래브 및 벽체 플레이트의 구속조건을 적절히 반영하기 위해 최소한 1개 세대 전체를 모델링에 반영해야 한다.
- (3) 40Hz 이하 주파수에서 중앙수음은 노달라인(Nodal line)에 위치하고 음향모드 밀도가 낮기 때문에 수치해석 모델의 정확도를 향상시키기 위해서는 음향모델의 형상과 물성이 보다 정밀하게 모델링될 필요가 있다.
- (4) 유한요소 수치해석을 통한 예측값과 실험값의 편차는 공동주택 시공오차에 기인한 편차범위 내에서 존재하였지만 수치해석 모델에 대한 정확한 검증을 위해서는 수직으로 인접한 세대들의 시공오차 및 재료 물성 등을 조사하여 평균값에 대해 검증되어야 한다.
- (5) 유한요소 수치해석 모델을 사용하여 공동주택의 재료 물성, 구조요소 크기, 평면 형상과 같은 다양한 바닥충격음 영향요인 분석이 가능하며, 이러한 분석을 통해 바닥충격음이 작게 발생할 수 있는 공동주택 설계가 가능하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 주거환경연구사업의 연구비지원(15RERP-B082204-02)에 의해 수행되었습니다.

References

- Baek, G.O., Mun, D.H., Han, H.K., Park, H.G. (2015) Analysis of Heavy-weight Floor Impact Noise and Vibration of Concrete Slabs in a Residential Building, *The World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics*.
- Cremer, L., Heckl, M., Petersson, B.A.T. (2005) *Structure-Borne Sound: Structural Vibrations and Sound Radiation at Audio Frequencies*, 3rd Edition, Springer-Verlag, Berlin, pp.461~464.
- Fahy, F., Gardonio, P. (2007) *Sound and Structural*

Vibration(Radiation, Trasmission and Response),
Second Edition, ELSEVIER, pp.26~29.

Jeong, J.H., Lee, B.K., Yeon, J.O., Jeon, J.Y.
(2014) Floor Impact Sound Pressure Level
Characteristics by the Change of Reverberation
Time in Mock-up Test Rooms, *Trans. Korean Soc.
Noise & Vib. Eng.*, 24, pp.339~347.

Lyon, R.H., Maidanik, G. (1962) Power Flow
Between Linearly Coupled Oscillators, *Journal of the
Acoustical Society of America*, 34, pp.623~639.

LMS International Numerical Acoustics Theoretical

Manual, LMS Engineering Innovation.

Mun, D.H., Park, H.G., Hwang, J.S. (2014)
Prediction of Concrete Slab Acceleration and Floor
Impact Noise Using Frequency Response Function,
Trans. Korean Soc. Noise & Vib. Eng., 24(6),
pp.483~492.

**Mun, D.H., Park, H.G., Hwang, J.S., Hong, G.H,
Im, J.H** (2012) Numerical Analysis of Heavy-
weight Impact Noise for Apartment Units Consi-
dering Acoustic Mode, *Trans. Korean Soc. Noise &
Vib. Eng.*, 22(7), pp.676~684.

요 지

본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 공동주택의 중량충격음을 예측하기 위해 구조해석 모델과 음향해석 모델을 개발하고 예측결과와 실험결과를 비교하여 정확성을 검증하였다. 패널 임피던스 값을 사용하여 거실의 적절한 흡음 특성을 반영할 수 있었으며, 수치해석에 주파수 응답함수 특성을 적용하여 1회 수치해석만으로 다양한 충격원에 대한 응답을 예측할 수 있도록 하였다. 구조진동에 의한 실내 소음해석은 유한요소 수치해석 기법이 진동 및 음향모드에 대한 응답을 비교적 정확하게 예측할 수 있도록 하였으며, 본 연구의 예측결과는 실험결과와 비교적 유사한 값을 나타내었다. 향후 정확도가 보다 향상된 수치해석 모델개발을 통해 바닥충격음 저감에 효과적인 공동주택 설계가 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 유한요소, 구조기인 소음, 중량충격음, 바닥충격음, 음향모드, 주파수 응답함수