음향모드를 고려한 공동주택 중량충격음 소음해석

Numerical Analysis of Heavy-weight Impact Noise for Apartment Units Considering Acoustic Mode

문 대 호†·박 홍 근*·황 재 승**·홍 건 호***·임 주 혁****

Dae-Ho Mun, Hong-Gun Park, Jae-Seung Hwang, Geon-Ho Hong and Ju-Hyeuk Im

(2012년 5월 3일 접수 ; 2012년 6월 26일 심사완료)

Key Words : Apartment House(공동주택), Heavy Weight Floor Impact Noise(중량충격음), Sound Radiation Analysis(소음해석), Room Mode, Acoustic Mode(음향모드), Standing Wave(정상파)

ABSTRACT

Numerical analysis was performed to investigate the heavy-weight impact noise of apartment houses. The FEM is practical method for prediction of low-frequency indoor noise. The results of numerical analysis, the shape of the acoustic modes in room-2 are similar to that of acoustic pressure field at the fundamental frequency of acoustic modes. And the acoustic pressure was amplified at the natural frequency of the acoustic modes and structural modes. The numerical analysis result of sound pressure level at 63 Hz and 125 Hz octave-band center frequency are similar to the test results, but at 250 Hz and 500 Hz have some errors. Considering most of bang-machine force spectrum exists below 100 Hz, the noise at 250 Hz and 500 Hz are not important for heavy-weight impact noise. Thus, the FEM numerical analysis method for heavy-weight impact noise can apply to estimate heavy-weight impact noise for various building systems.

1. 서 론

중량충격음은 옥타브 중심주파수로 500 Hz 이하의 저주파수의 바닥충격음을 대상으로 하며, 이 중량충격음의 발생원인은 대부분이 콘크리트 슬래브와 벽체와 같은 구조체의 진동에 의해 발생하는 소음이다. 중량충격음과 같이 구조물의 진동에 의해 발생

되는 방사소음(sound radiation)은 레일리(Rayleigh 1896)에⁽¹⁾ 의해 유도된 식 (1)을 통해 임의의 위치(r)에서의 음압(p)을 진동하는 표면의 속도(v_n)를 통해 계산할 수 있다.

$$p(r) = \frac{j\omega\rho_0}{2\pi} \int_s \frac{v_n(r_s) e^{-jkR}}{R} dS \quad (1)$$

여기서, r 은 수음점의 위치벡터, j 는 단위 복소수, ω 는 음원의 각주파수, ρ_0 는 공기의 밀도, r_s 는 진동체의 표면 위치벡터, R 은 진동하는 표면과 수음점의 거리를 의미한다.

황재승(2009)은⁽²⁾ 식 (1)을 이용하여 공동주택 구조형식(무량판구조, 라멘구조, 벽식구조)에 따른 중량충격음 발생특성을 예측하였다. 하지만 이를 통해 예측한 중량충격음은 구조체의 진동에 의해 방사되는 소음을 예측한 것으로 구조형식에 따른 구

† 교신저자; 정회원, 서울대학교 건축학과
E-mail : mundaeho@gmail.com
Tel : (02)880-7053, Fax : (02)882-7053

* 서울대학교 건축학과

** 정회원, 전남대학교 건축공학과

*** 호서대학교 건축공학과

**** 삼성물산 건설부문 주택사업본부

이 논문의 일부는 2009년 춘계 소음진동 학술대회에서 발표되었음.

조체 자체의 진동특성이 고려된 소음을 예측이 가능하지만 실내의 음향조건인 음의 반사(또는 음향 모드), 흡음 등의 영향을 고려한 소음 예측이 불가능 하였다.

실내에서 발생하는 중량충격을 해석을 위해서는 이러한 수식에 의한 방법 보다는 보다 정밀한 소음해석기법이 필요하며, 현재 대표적으로 사용되는 대표적인 소음해석기법은 통계적에너지해석(SEA, statistical energy analysis), 파워흐름해석법(PFA, power flow analysis), 유한요소법(FEA), 경계요소법(BEM) 등이 존재한다. 이러한 소음해석기법들 중에 유한요소법은 음향모드를 고려할 수 있고 저주파 대역 소음해석에 가장 적합한 소음해석기법이다.

이 연구는 이러한 유한요소법을 이용하여 실내에서 존재하는 음향모드를 고려한 공동주택 거실에서의 중량충격을 예측하였으며, 중량충격 실험결과와 해석결과를 비교하여 유한요소법을 이용한 중량충격 해석에 대한 정확도를 검증하였다.

2. 해석모델

2.1 일반사항

해석대상구조물은 지하 1층 지상 2층의 주거성능 실험동이다. 한 층에 총 3개 세대로 구성되어 있으며, 실의 크기는 30~40평형의 공동주택에서 일반적으로 사용되는 거실과 방의 크기로 되어 있다. 세대 간은 콘크리트 내력벽을 이용하여 분리하였다. 충격 원으로 가진하는 2층은 바닥 충격을 실험을 위해 거실과 방들은 슬래브 두께를 달리하여 거실-1(0.24 m), 거실-2(0.21 m), 거실-3(0.180 m), 침실-1(0.18 m), 침실-2(0.21 m)로 각각 다르게 시공되어 있다. 벽체의 두께는 180 mm이다. Fig. 1에 실험과 해석에 사용된 구조물의 2층 평면도(가진층)를 나타내었다. 그림에서 #1과 #2는 실험결과와 해석결과를 비교하기 위해 사용된 2개의 가진점을 나타낸다.

실험과 해석에 사용된 수음실은 침실-2이며, 실의 크기는 4.45 m × 3.88 m, 높이 3 m이다. 실의 벽체는 벽지로 마감이 되어있으며, 천장은 천장마감이 설치되어 있지 않았다. 바닥은 마감이 되어있지 않은 맨바닥 콘크리트 슬래브 조건으로 콘크리트슬래브 두께는 0.21 m이다.

중량충격 측정실험과 소음해석은 ‘공동주택

Fig. 1 2st floor plan of apartment unit

바닥충격 차단구조 인정 및 관리기준 2005'와 KS F 2810-2, KS F 2863-2를 만족한다.

구조물의 진동과 소음을 계산하기 위한 유한요소 해석프로그램은 ABAQUS CAE와 LMS Virtual Lab Acoustics를 사용하였다. ABAQUS CAE는 구조해석 모델링과 모드해석에 사용되었으며, LMS Virtual Lab은 이 모드해석결과를 이용하여 구조물의 진동응답 해석과 소음해석에 사용되었다.

2.2 구조해석 모델

침실-2의 중량충격은 콘크리트 슬래브의 진동뿐만 아니라 벽체의 진동에 의해서도 발생된다. 따라서 진동해석모델은 침실-2의 콘크리트 슬래브와 벽체를 포함하였다. 그리고 침실-2의 콘크리트 슬래브의 지지조건을 실제와 가깝도록 인접한 실의 콘크리트 슬래브와 상·하 세대 벽체 모듈을 모델링에 포함하였다.

침실-2의 바닥진동모드에 크게 영향을 주지 않는 내력벽은 x, y, z방향을 구속하고 휨 변형을 풀어준 구속조건을 사용하였으며, 침실-2와 멀리 떨어진 거실-1은 모델링에서 제외하였다.

해석에 사용된 요소(element)는 0.15 m 크기의 쉘요소를 사용하였으며, 요소의 두께는 실제 구조물의 두께와 동일하다. 콘크리트 재료에 대한 물성은 콘크리트 탄성계수 $E_c = 4700 \cdot \sqrt{f'_c} \text{MPa} = 23 \text{GPa}$

$f_c' = 24 \text{ MPa}$, 감쇠비 $\xi = 5\%$, 질량밀도 $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$, 그리고 푸아송 비 $\nu = 0.167$ 를 사용하였다.

2.3 소음해석 모델

소음해석에 사용되는 공기모델의 요소의 크기는 식 (2)같이 음압 해석하는 주파수대역과 관련되며, 최대 해석주파수에서의 음압을 표현하기 위해서는 육면체 요소(eight-node hexahedron)을 사용할 경우 음파의 한 파장 안에 적어도 6개 요소가 존재해야 한다.

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

여기서, $\lambda_{\min}$ 은 음파 파장의 최소길이, $f_{\max}$ 는 해석하고자 하는 최대 주파수 그리고 c 는 음속 340 m/s 를 나타낸다.

중량충격음의 경우 해석범위는 옥타브 중심주파수로 500 Hz 까지 계산되어야 하므로 해석범위는 $1 \sim 708 \text{ Hz}$ 이어야 한다. 하지만 이러한 해석범위까지 해석하기 위해서는 요소크기가 매우 작아져 절점수 많아지기 때문에 고성능 컴퓨터와 많은 시간이 필요하다. 또한 Fig. 3에서 처럼 중량충격원인 뱅머신의 주요 충격력 성분이 125 Hz 이하에서 존재하기 때문에 그 이상의 주파수에 대한 소음은 상대적으로 음의 크기가 작기 때문에 큰 의미를 갖지 않는다. 따라서 소음해석은 옥타브 중심주파수로 125 Hz 까지를 중요 소음해석 범위로 고려하고, $1 \sim 400 \text{ Hz}$ 에 대해 소음해석을 하였다.

침실-2의 공기 매질은 요소크기 0.3 m 의 육면체 요소(solid element)를 사용하여 모델링 하였으며, 식 (2)에 따라 해석결과에 대한 최대 신뢰주파수는 189 Hz 이다.

공기의 물성은 밀도 $\rho_0 = 1.225 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ 를 사용하였으며, 흡음을 고려하기 위해 복소수음속(complex speed of sound) $c = 340 + 1i \text{ (m/sec)}$ 를 전주파수에 동일하게 사용하였다. 복소수음속은 감쇠계수 η 를 사용하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며, 이 경우 사용된 감쇠계수 $\eta = 0.006$ 이다. 공기중의 감쇠를 고려한 매질에서 파동수는 복소수 음속을 적용하여 식 (4)와 같이 복소수파동수 k (complex wave number)로 나타내어진다⁹⁾.

$$c = c_0(1 + j\eta/2) \quad (3)$$

$$k = \frac{\omega}{c_0(1 + j\eta/2)} \quad (4)$$

여기서 c 는 공기의 복소수음속, c_0 는 복소수음속의 실수부, ω 는 각주파수를 의미한다.

이 연구에서는 중량충격음과 관련이 깊은 100 Hz 이하의 주파수에서의 소음은 흡음의 영향이 적은 것을 고려하여 침실-2에서의 흡음을 해석하였으며, 향후 중량충격음 해석의 정확성 향상을 위해서는 각 주파수별 실의 잔향시간과 손실계수 또는 흡음계수의 관계를 찾아 음향해석에 반영되어야 한다.

음압측정 지점은 실험에서 사용한 수음점과 동일한 위치인 바닥에서 1.2 m 높이의 실의 중앙부분 1개 지점과 벽체에서 0.75 m 떨어진 4개 지점을 선정하였다.

Fig. 2 Bang-machine impact force wave

Fig. 3 Bang-machine Impact force spectrum

2.4 뱅머신 충격력

해석에 사용된 뱅머신 충격력 스펙트럼은 한국표준과학연구원의 뱅머신 교정 결과를 사용하였다. 뱅머신의 시간이력 충격력은 0.244 ms간격(sampling frequency : 4096 Hz)으로 1초간 측정되었으며, 충격력 스펙트럼은 시간이력 충격력 데이터를 고속푸리에 변환(FFT, fast fourier transform)하여 계산된 값을 사용하였다. 노이즈의 영향을 최소화하기 위해 충격이 가해지는 구간만 크기가 1이고 나머지 구간은 0인 window function을 사용하였다. Figs. 2, 3에 뱅머신 충격력파형과 충격력스펙트럼을 나타내었다.

3. 진동해석결과

진동해석은 충격력이 구조체 내력에 비해 크지 않아 탄성해석 범위에서 해석 가능하다. 진동응답 해석방법은 주파수도메인에서 구조물의 진동모드 중첩법을 이용하는 모드기반 충격응답해석(modal based forced response analysis)법을 이용하였다. 구조물의 모드 해석 범위는 소음해석 주파수범위의 2배인 800 Hz 이상으로 하였다. 진동해석모델의 1~5차 모드형상(mode shape)과 고유진동수(natural frequency)를 Fig. 4에 나타내었다. 해석에 사용된 충격력 가진 위치는 실험과 동일한 위치로 실의 중앙부와 출입문쪽 모서리부 2개 지점을 선정하였다.

식 (1)에서 소음의 크기는 진동하는 구조물의 표면속도(surface normal velocity)의 크기에 비례한다. Fig. 5는 실의 중앙부와 모서리부 가진에 대해 최대 속도응답이 발생한 주파수에서의 속도크기를 나타낸 그림이다. 최대 속도응답을 보인 주파수에서의 속도응답 형상은 가진 위치에 관계없이 1차 모드 성분이 강하게 나타나고 있으며, 그 최대속도응답이

(b) 2nd mode, 114.74 Hz

(c) 3rd mode, 183.67 Hz

(d) 4th mode, 216.55 Hz

Fig. 4 Structural mode shape and natural frequency

(a) Max. velocity = 1.86×10^{-5} m/s at 51 Hz

(b) Max. velocity = 5.97×10^{-5} m/s at 52 Hz

Fig. 5 Max. surface normal velocity amplitude shape

(a) 1st mode, 51.87 Hz

발생한 주파수 또한 1차모드 고유진동수인 51 Hz와 동일하였다.

3.2 음향모드가 중량충격음에 미치는 영향

침실-2에서의 음향모드 고유주파수는 100 Hz 이하의 저주파영역에서는 흡음의 영향이 크지 않기 때문에 주변을 모두 강체벽인 경계조건을 사용하여 식 (5)를 통해 계산할 수 있다⁽³⁾.

$$f_n = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \quad (5)$$

여기서 n_x, n_y, n_z 는 각각 x, y, z 방향의 모드 차수이며, L_x, L_y, L_z 는 각각 x, y, z 방향 실의 길이를 나타낸다.

Fig. 6에 침실-2의 주요 음향모드를 나타내었다. 붉은색 부분은 상대적으로 음압이 큰 부분을 나타내고 있으며 푸른 부분은 상대적으로 음압이 작은 부분을 나타낸다. 음향모드에서 음압이 가장 크게

나타나는 부분은 일반적으로 실의 모서리부분과 실의 표면인 바닥, 벽 그리고 천장부분이다. 저주파 대역에서는 일반적으로 실의 중앙부에서는 음압의 크기가 상대적으로 작게 분포되고 있다.

Fig. 6에서 최대음압이 발생하는 위치를 살펴보면 벽체의 진동과 가장 관련 있는 음향모드는 (a)와 (b)이며, 바닥진동과 가장 관련 있는 음향모드는 (c)인 것을 확인할 수 있다. 이러한 음향모드에 해당되는 주파수의 소음은 공진을 일으켜 음향모드가 존재하지 않는 주파수보다 소음의 크기가 증폭된다. 특히 중량충격음 저감 시 63 Hz대역의 소음저감이 가장 어려운 것으로 보고되었는데, 그 이유는 공동주택의 높이가 대부분 2.7~2.9 m로 지어져 있고 이 수직방향에 해당되는 Fig. 6(c)와 같은 음향모드가 바닥진동에 의한 소음을 증폭시키기 때문이다.

구조체 진동과 음향모드의 관계를 살펴보기 위해 뱅머신으로 침실-2의 중앙부를 가진 할 경우 속도 응답의 크기가 가장 큰 51 Hz에서의 음장해석결과와 침실-2의 수직방향 음향모드가 존재하는 57 Hz에서의 음장해석결과를 Table 1에 비교하였다.

최대진동속도는 1차모드의 고유진동수인 51 Hz에서 가장 크게 나타났으며, 침실-2의 수직방향 1차

Fig. 6 Acoustic mode shape and natural frequency

Table 1 Surface normal velocity, acoustic modes and acoustic pressure field

	51 Hz	57 Hz
Normal velocity	<p>Max velocity : 1.95×10^{-4} (m/s)</p>	<p>Max velocity : 6.85×10^{-5} (m/s)</p>
Acoustic mode	No acoustic mode exists at 51 Hz
Pressure field	<p>Max. sound pressure level : 64.09 dB</p>	<p>Max. sound pressure level : 80.52 dB</p>

음향모드가 존재하는 57 Hz에서의 구조물의 최대진동속도보다 3배 이상 크게 나타났다. 하지만 Table 1의 음향해석결과를 보면 침실-2의 수직방향 1차음향모드가 존재하는 57 Hz에서 최대음압레벨은 80.52 dB로 최대속도가 발생하는 51 Hz에서의 최대음압레벨보다 크게 나타났다. 그리고 최대음압레벨이 발생한 57 Hz에서의 음향형태는 1차음향모드형태와 유사하게 나타났다.

침실-2의 5개 수음점에서의 평균음압레벨은 수직방향 1차모드가 존재하는 57 Hz에서 79.5 dB로 가장 크게 나타났으며, 두 번째 음압레벨이 큰 주파수는 실의 단변방향(3.86 m)에 대한 음향모드가 존재하는 주파수로 음압레벨은 74.5 dB로 나타났다. 이러한 결과를 통해 벽식구조 공동주택의 경우는 바닥의 진동과 수직방향음향모드에 의한 바닥충격음 증폭뿐만 아니라 벽체진동과 실의 길이방향 음향모드에 의한 소음증폭도 발생됨을 알 수 있다(Fig. 7 참조).

이 해석결과를 통해 중량충격음의 각 주파수별 최대음압레벨은 구조체의 진동속도크기 보다는 음향모드의 영향을 더 크게 받으며, 구조체 진동이 크게 발생하는 주파수에서 음향모드가 존재할 경우 실내의 음압은 더욱 크게 증폭된다는 것을 알 수 있다.

이러한 영향으로 인해 슬래브의 고유진동수와 수직방향 음향모드의 고유진동수가 비슷할 경우 중량충격음의 증폭효과는 더욱 크게 될 것이다.

일반적으로 20~30평형 공동주택의 거실의 고유진동수는 30~40 Hz를 보이는 것이 비해 안방이나 작은방의 고유진동수는 50~60 Hz로 63 Hz 옥타브 중심주파수에 근접한 고유진동수를 갖고 있으며,

더욱이 대부분의 공동주택은 층고가 2.7 m 내외의 높이로 시공되기 때문에 바닥진동소음과 연관이 가장 깊고 음 에너지가 가장 큰 수직방향의 1차 음향모드 고유진동수는 63 Hz 옥타브 중심주파수에 근접한다. 이러한 영향으로 인해 공동주택의 안방이나 작은방에서의 중량충격음이 거실에서의 중량충격음보다 크게 발생된다.

음향모드가 중량충격음 발생에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 침실-2의 뱅머신 중앙가진에 대한 5개의 수음점에서의 음압레벨을 유한요소해석법(FEM)과 구조체의 방사소음해석에 주로 사용되는 경계요소법(BEM) 두 가지 수치해석방법을 사용하여 계산하고 비교하였다. 해석조건을 동일하게 하기 위해 구조물 벽체의 속도응답결과는 유한요소법과 경계요소법의 음향해석모델의 경계조건 설정과정에서 제외하였다. 해석에 사용된 요소의 크기는 구조해석모델은 0.15 m, 음향해석모델은 0.3 m로 기존해석모델과 동일한 값을 사용하였다.

Fig. 7은 두 가지 해석방법에 의한 음압레벨해석결과를 최대 400 Hz의 주파수영역에서 1 Hz 단위로 나타낸 그래프이다. 붉은실선은 경계요소법을 이용하여 계산된 결과를 의미하고 검정점선은 유한요소법을 이용한 계산된 결과를 나타낸다.

경계요소법을 이용하여 해석한 결과는 충격력과 구조물이 공진을 일으키는 주파수영역에서만 음압이 크게 발생하는 형태를 보이고 있지만 유한요소법을 이용한 해석결과는 경계요소법을 이용하여 계산된 결과를 기준으로 음압이 더 증폭되어 뽕죽하게 솟아오르는 부분이 발생되었다. 이렇게 뽕죽하게 솟아오르는 부분은 음향모드가 존재하는 주파수와 일치되며, 음향모드에 의해 음압이 증폭되는 현상을 나타낸다.

4. 벽체진동이 중량충격음에 미치는 영향

현재 해석대상 구조물의 구조형식은 내력벽식 구조로 벽체진동에 의한 소음이 더해져 바닥충격음에 가장 취약한 구조물이다. 벽체 진동이 소음에 미치는 영향을 알아보기 위하여 유한요소법을 사용하여 뱅머신가진에 대한 벽체의 진동속도는 '0'으로 하고 슬래브 진동에 의한 소음만을 해석하였다. Fig. 8에 슬래브만의 진동에 의한 소음해석결과와 슬래브와

Fig. 7 Sound pressure level with/without considering acoustic mode

벽체의 진동에 의한 소음해석결과를 비교하여 나타내었다. 그래프의 40 Hz 이상부터는 슬래브와 벽체의 진동에 의한 음압레벨이 슬래브만의 진동에 의한 음압레벨 보다 크게 나타나고 있으며, 두 차이는

순수하게 벽체진동에 의해 중량충격음이 증가되었음을 의미한다. 단일수치평가량은 슬래브만의 진동에 의한 중량충격음은 51 dB, 벽체진동이 포함된 중량충격음은 54 dB을 나타내어 벽체 진동에 의해 단일수치평가량이 3 dB 증가되었다.

Fig. 8 Sound pressure level with/without vibrating wall

(a) Impact at the center point(#1)

(b) Impact at the corner point(#2)

Fig. 9 Sound pressure level of numerical analysis results and the test results

5. 해석결과와 실험결과 비교

Fig. 9(a)와 (b)는 침실-2의 중앙가진(#1-Fig. 1)과 코너가진(#2-Fig. 1)에 대한 중량충격음 해석결과와 현장실험결과를 1/3 Octave에 대해 비교한 그래프이다. 1/3 Octave에서 해석된 음압의 결과와 실험결과는 형태가 비슷하게 나타나지만 각 중심주파수 별로 5~10 dB 차이가 발생한다. 이러한 해석오차는 해석모델의 경계조건, 콘크리트 물성, 흡음조건 등을 실제 구조물과 동일하게 모델링 하는 것이 어렵고, 중량충격음 측정시 수음점의 위치, 가진점의 위치,

(a) Impact at the center point(#1)

(b) Impact at the corner point(#2)

Fig. 10 Sound pressure level of numerical analysis results and test results

평균화 방법 등의 측정오차 때문이다.

해석결과와 실험결과를 실제 중량충격을 차단성능 평가에 사용되는 1/1 Octave로 변환하면, 음압레벨을 옥타브 중심주파수 대역에서 에너지평균값으로 나타낼 수 있기 때문에 해석적인 한계에 의해 발생된 해석오차와 측정의 불확실성에서 발생하는 측정오차가 감소된다.

Fig. 10(a)와 (b)는 뱅머신의 중앙점 가진과 모서리 가진에 대한 중량충격음의 실험결과와 해석결과를 1/1 Octave에 대해 비교하여 나타낸 그래프이다. 1/1 Octave에 대한 해석결과는 63 Hz와 125 Hz에서의 최대음압레벨은 중앙부가진과 모서리가진 모두 비교적 유사한 결과를 나타내었다.

6. 결 론

유한요소 해석방법을 이용하여 맨바닥 콘크리트 슬래브의 중량충격음을 수치해석을 통해 예측하였다. 유한요소 해석법을 이용한 중량충격음 해석을 통해 음향모드가 실내 음장에 어떠한 영향을 주는 지 살펴보았다. 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 유한요소법을 이용한 공동주택의 중량충격음 소음해석은 표준중량충격원의 충격력과 중량충격음이 100 Hz 이하에서 대부분이 분포하기 때문에 중량충격음 예측을 위한 소음해석 주파수제한을 받지 않는다.

(2) 음향모드가 존재하는 주파수 대역에서 음향모드의 영향으로 음압이 증폭되며, 특히 공동주택의 높이방향 1차원모드(axial mode)는 바닥진동에 의한 소음을 더욱 크게 증폭시킨다. 또한 국내 공동주택의 높이(2.6~2.8 m)에 대한 1차원 모드는 고유주파수가 60~65 Hz로 옥타브밴드 중심주파수인 63 Hz의 소음에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

(3) 유한요소법을 이용한 중량충격음 예측결과는 옥타브밴드에서 63 Hz와 125 Hz 중심주파수에서는 실험결과와 매우 유사하였지만 250 Hz 이상의 주파수에서는 다소 차이가 발생하였다. 이러한 해석오차는 해석모델의 물성 중 뱅머신 충격원의 충격력 크기, 구조물의 감쇠비, 침실에서의 흡음, 현장 측정오차 등에 의해 발생된 것으로 판단된다. 향후 250 Hz 이상의 중량충격음 예측의 정확성을 향상을 위해서는 500 Hz 옥타브밴드 중심주파수 이하에서 위

와 같은 물리적 특성을 해석모델에 반영시킬 필요가 있다.

(4) 중량바닥충격음 차단성능 측정방법은 1/3옥타브밴드패스 필터를 사용하는 실시간주파수분석장비를 이용하여 각 중심주파수에서의 최대값을 측정하는 반면, 이 해석방법에 사용된 뱅머신 충격력은 1초간 측정된 뱅머신의 충격력파형을 FFT를 사용하여 1 Hz 단위로 나타낸 충격력스펙트럼을 사용하였다. 중량바닥충격음과 뱅머신의 충격력은 임펄스형태의 신호특성을 갖기 때문에 위와 같은 주파수 분석방법 차이로 이 논문에서 비교한 실험결과 및 해석결과는 다소 차이가 발생할 수 있다. 따라서 실험조건과 동일한 해석조건이 되기 위해서는 해석에 사용되는 뱅머신의 충격력이 1 Hz 단위 밴드패스필터(narrow band pass filter)를 사용한 실시간주파수 분석장비를 이용하여 계측되어야 하며, 수개의 충격력 신호에 대한 평균화 방법은 최대값(peak hold)을 사용하여야 한다.

(5) 이 논문에서는 해석결과 및 실험결과를 비교함에 있어 1개의 가진점에 대한 5개 수음점에서의 산술평균음압결과를 비교하여 해석결과의 정확성을 나타내었다. 하지만 해석결과의 정확성검증과 해석오차에 대한 원인 분석을 위해서는 각 수음점에 대한 음압결과비교와 1 Hz단위의 세밀한 주파수범위에서의 음압결과비교가 필요하다. 이 경우 해석결과비교를 위한 5개의 수음점 위치는 중량충격음 측정시 수음점 위치에 따른 음압측정결과와의 편차가 크기 때문에 수음점 위치를 정확하게 고정하여 측정되어야 한다.

(6) 유한요소법을 이용한 중량충격음 예측방법을 통해 기존 실험연구만으로 불가능한 실의크기, 구조시스템, 슬래브 두께 등 다양한 변수에 대해 중량충격음 발생특성을 분석할 수 있으며, 향후 이 해석방법을 이용하여 중량충격음 저감에 최적인 구조시스템 개발 및 검토가 가능하다.

참 고 문 헌

- (1) Rayleigh, B. J. W. S., 1896, The Theory of Sound, Macmillan.
- (2) Hwang, J.-S., Moon, D.-H., et al., 2009, The Numerical Analysis of Heavy Weight Impact Noise

for an Apartment House, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 2, pp. 162~168.

(3) Chung, J. Y., Lee, S. W., Im, J. B. and Jeong, G. C., 2008, Research about Correlation of Slab Vibration Mode and Heavy-weight Floor Impact Sound, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, p. 842

(4) Seo, S. H. and Jeon, J. Y., 2005, 2-Dimensional Floor Impact Vibration Analysis in Bare Reinforced Concrete Slab Using Finite Element Method, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 5, pp. 604~611.

(5) Han, K. M. and Park, S. S., 2007, Study on Structural-acoustic Characteristics of Apartment Buildings Slab Systems with It's Composites, Architectural Institute of Korea, Vol. 23, No. 4, pp. 3~10.

(6) Hwang, J. S., Hong, G. H. and Park, H. G.,

2008, Vibration and Noise Control of the Simply Supported Slab Using the Multi-tuned Mass Damper, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 10, pp. 1006~1013.

(7) Frank Fahy and Paolo Gardonio, 2007, Sound and Structural Vibration(Radiation, Transmission and Response), ELSEVIER.

(8) Kinsler, L., Frey, A. R. and Coppens, A. B., 2000, Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons, Inc.

(9) Eugen J. Skudrzyk, 1971, The Foundations of Acoustics: Basic Mathematics and Basic Acoustics, Springer-Verlag, p. 31.

(10) LMS International, Numerical Acoustics Theoretical Manual, LMS Engineering Innovation.

(11) LMS International, LMS Virtual.Lab REV8A Acoustic Training, LMS Engineering Innovation.