

바닥판의 동적특성에 따른 소음진동 저감성능에 관한 연구

A Study on the Noise and Vibration Reduction Effect Depending on Dynamic Property of Slab

○황 재 승* 김 선 우** 송 진 규*** 서 재 란****
Hwang, Jae Seung Kim, Sun Woo Song, Jin Gyu Seo, Jae Ran

ABSTRACT

The vibration of slab causes a sudden change of air pressure in the interface between slab and air to create structure borne sound. Floor impact noise induced from the vibration of slab became one of the hottest social issues in these day, and it took the biggest parts of the cause of damage in environmental dispute.

Because the structure borne sound of slab is different from the dynamic characteristic of slab, it is required more precise vibroacoustic analysis. In this study, we was trying to understand by what mechanism the slab noise is induced from the slab vibration and the relationship between the dynamic propety of slab and the noise is shown by the numerical simulation.

1. 서 론

우리나라 국민 중 대부분은 층간소음을 비롯하여 공사장소음, 교통소음 등으로부터 받는 스트레스를 경험하였을 것이다. 2003년도 환경부 중앙환경 분쟁 조정위원회의 환경분쟁 조정현황에 따르면 소음진동문제가 가장 큰 피해 원인으로 나타나고 있으며, 최근 5년간 (1999-2003) 처리된 소음진동 피해 건수는 지속적으로 증가하는 경향을 보이고 있다.(<http://edc.me.go.kr>)

어린이의 뱀 또는 물건의 낙하(보행하중등)에 의하여 발생하는 바닥판의 진동은 바닥 접촉면 인접 공기에 순간적인 압력변화를 일으켜 바닥충격음을 생성하며, 이에 비롯되는 층간소음은 상하세대간의 다툼, 이주 주민의 발생등 분쟁과 민원이 빈번해지면서 사회적 문제로 나타나고 있다.

이러한 가운데 환경분쟁조정위원회에서는 공동주택 층간소음에 의한 정신적 피해보상을 요구하는 환경분쟁 사건에 대하여 처음으로 피해배상을 결정하기에 이르렀다. 또한, 층간소음의 정량적인 근거설정과 향후 원만한 해결 및 분쟁대상에 대한 일관성 있는 조정을 위하여 건설교통부에서는 「바닥충격음 차단성능기준」으로

* 전남대학교 건축학부 전임강사
** 전남대학교 건축학부 교수
*** 전남대학교 건축학부 조교수
**** 전남대학교 건축학부 석사과정

경량충격음(58 dB)은 2004년 4월 22일 이후부터, 중량충격음은 2005년 7월 1일부터 사업승인단계에서 적용하기로 함에 따라 관련업계는 대책마련에 부심하고 있는 실정이다.

바닥판의 고체전달음은 전달경로, 바닥구조의 특성에 따라 다르게 나타나며 특히, 중고주파대역의 진동에 의하여 발생하기 때문에 이론적인 접근보다는 주로 현장실험에 의존하여 배출소음이 평가되었다. 그러나 실험에 의한 음환경평가는 고가의 계측장비와 인력 및 시간이 소요되며 바닥구조 형식과 소음과의 관계를 일반화하여 적용하기 어렵고, 설계시 거주공간의 음환경 평가, 효율적인 실험계획이나 예비적인 실험결과 예측등 경제적이며 신뢰성 있는 음환경 평가를 위하여 실험적 접근방법과 병행하여 이를 보완하거나 대체할 수 있는 정밀한 해석적 접근방법이 요구되고 있다.

또한, 현재 국내 건설사에서 시공중인 바닥판 공법으로는 뜬바닥공법, 두께증가방식에 국한되어 있어 아직까지 경제적이고 효율적인 저감 대책으로 부족한 실정이며, 특히 중량충격음의 경우 내년 7월로 시행이 늦추어진 이유는 바닥판 두께를 현재의 벽식구조로는 134mm -240mm로 증가시킨다하더라도 중량충격음 기준 50dB을 만족할 수 없기 때문이다. 바닥판 두께증가 공법에 의존하여 바닥충격음 저감을 기대했던 업계로서는 자사 공동주택 브랜드 이미지 제고를 위하여 새로운 대안을 찾아야 하며, 시행처에서도, 바닥판 소음기준에 따른 표준 바닥구조 설계안이 제시되어야 하지만 그렇지 못한 것이 현실이다.

이와 같이, 관련 업계, 학계 뿐만아니라 사회적으로 비상한 관심이 집중되고 있는 바닥판의 중량충격음과 이에 대한 예측 및 저감기술은 층간소음으로 인한 환경분쟁에 대한 해결책을 제시함으로써 쾌적한 주거공간을 제공한다는 점 뿐만아니라, 중량충격음 저감을 위한 표준 바닥구조를 제시함으로써 관련업계의 중복투자등 소모적인 연구를 지양하여, 궁극적으로 사회, 경제적인 비용을 줄인다는 측면에서 중요성을 가지고 있다.

그러나, 지금까지의 층간소음저감 노력은 그것이 가지는 바닥구조, 전달경로등에 대한 수학적 모형화 및 해석의 한계에 비롯된 것이기는 하지만, 주로 현장실험위주의 음환경 평가와 개발된 저감재료에 대한 단편적인 성능시험에 머물러 이루어진 것이 사실이다. 이러한 접근방법은 구체적 실험조건 및 저감재료와 대상구조물의 특성이 주어진 경우에 한하여 성능이 주어지기 때문에, 이를 일반화하고 정량적으로 정립하여 새로운 저감시스템이나 공구법에 대한 예측 및 평가를 수행할 수 없었다. 바닥판 두께증가가 소음저감에 미치는 영향을 정밀하게 모형화된 이론적 방법에 기반하여 접근하였다면, 벽식구조의 특수성에 기인하는 것이기는 하지만, 134mm에서 240mm까지 증가시켜 실험을 수행하지 않았더라도 두께 증가방법이 소음저감에 비효율적일 수 있다는 것은 최소한 예측되었을 것이며, 이에 대한 사전인지를 통하여 새로운 대안 모색이 더욱 적극적으로 이루어졌을 것이다.

본 연구는 바닥판의 물성 및 동적특성이 배출 소음에 미치는 영향을 평가함으로써, 소음을 유발하는 진동요소 및 소음저감에 효율적인 바닥판 물성인자를 예측하는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여 판의 진동과 인접공간 음압의 상호작용에 의한 소음의 발생메커니즘을 고찰하고, 수치해석을 통하여 바닥판의 동적특성이 발생소음의 크기 및 저감에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 진동기인 소음

본 절에서는 단순지지된 바닥판과 바닥판 주변의 공기의 상호작용에 의한 음파의 생성과정을 수학적으로 고찰한 후, 예제를 통하여 바닥판의 동적특성이 음압에 미치는 영향을 평가한다.

2.1 바닥판과 공기의 상호작용에 의한 음파의 발생 메커니즘

본 연구에서 고려된 이론적 모델은 그림 1에 나타나 있다. 바닥판의 위쪽에 하중이 작용하고 이로 인한 바닥판의 진동이 바닥판 하부에 음압을 발생시킨다.

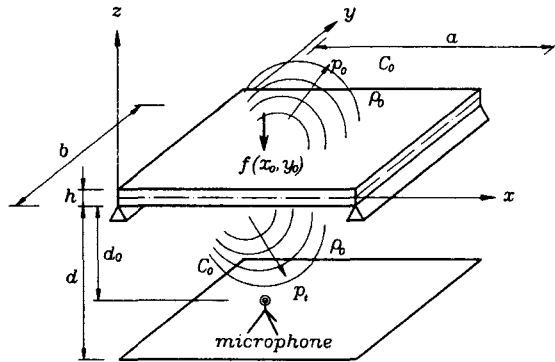


그림 1. 바닥판 진동 기인 소음

바닥판을 지배하는 파동방정식은 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 p_o}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p_o}{\partial z^2} = \frac{1}{c_o^2} \frac{\partial^2 p_o}{\partial t^2} \quad (1)$$

여기서, p_o 는 바닥판 진동에 의한 바닥판 위쪽의 압력이다. 위쪽 공기의 압력은

$$p_o(x, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P_o(k_x, \omega, z) \exp[-i(k_x x - \omega t)] dk_x d\omega \quad (2)$$

식과 같이 나타낼 수 있다. 이 때 $P_o(k_x, \omega, z)$ 는 $p_o(x, z, t)$ 의 푸리에 변환 함수, k_x 는 x-방향에서의 파동수(wave number), 그리고 ω 는 각주파수(angular velocity)이다. 압력함수를 지배방정식에 대입하여 정리하면 푸리에 변환 음파는 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$P_o(k_x, \omega, z) = A_o(k_x, \omega) \exp(-\sqrt{k_x^2 - k_o^2} z) \quad (z > 0) \quad (3)$$

여기서, $k_o = \omega/c_o$ 는 음향 파수, A_o 는 음파의 크기(amplitude)를 나타낸다. 또한, 바닥판 아래쪽 공기에서의 음파의 세기는 다음 식과 같다.

$$P_i(k_x, \omega, z) = A_1(k_x, \omega) \exp(-\sqrt{k_x^2 - k_o^2} z) \quad (z \leq -h) \quad (4)$$

바닥판에 작용하는 $f(x, t)$ 에 의한 판의 진동은 다음 방정식에 의해 지배된다.

$$D \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \nu \frac{\partial w}{\partial t} = -f(x, t) - (p_o)_{z=0^+} + (p_i)_{z=-h} \quad (5)$$

여기서, w 는 판의 처짐, $\nu = \zeta_o \nu_c$ 는 단위면적당 판의 감쇠, ν_c 는 임계감쇠, ζ_o 는 감쇠계수, $\mu = \rho_s h$ 는 단위면적당 판의 질량, ρ_s 는 밀도, h 는 판의 두께, 그리고 D 는 휨강성이다. 식(5)는 판의 운동방정식에 공기의 압력 상호간의 관계를 나타내는 운동방정식이 된다. 일반적으로 바닥판과 접하고 있는 고밀도 유체(물, 기름등)의 압력은 식(5)와 같이 운동방정식에 영향을 미치게 된다. 그러나 유체가 공기인 경우 바닥판에 미치는 영향이 매우 작아 이 영향을 무시하였으나, 정밀한 바닥판 진동기인 소음의 생성 메커니즘을 파악하기 위해서는 이 영향인자를 고려하였다.

양단이 단순지지일 때, 자유진동 방정식으로부터 고유치 함수의 중첩으로 판 처짐은 다음과 같다.

$$w(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} W_m(\omega) \sin\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \exp(i\omega t) d\omega \quad (6)$$

여기서, a 는 판 길이, m 은 판 진동의 모드번호이다. $W_m(\omega)$ 는 m 모드에서 판 처짐식의 진폭이다.

판의 변위는 다음과 같은 식으로 위쪽 공기에서의 압력과 연계되어 있다.

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = -1 \frac{1}{\rho_o} \left(\frac{\partial p_o}{\partial z} \right)_{z=0} \quad (7)$$

여기서, ρ_o 는 공기의 밀도이다.

앞에서 구한 위쪽 공기의 압력과 판의 처짐을 (7)에 대입하면 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \rho_o \omega^2 W_m(\omega) \sin\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \exp(i\omega t) d\omega \\ &= -\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_o(k_x, \omega) \sqrt{k_x^2 - k_o^2} \exp[-i(k_x x - \omega t)] dk_x d\omega \end{aligned} \quad (8)$$

윗 식에 $\exp[i(k_x x - \omega t)]$ 을 곱하고 $x = (-\infty, \infty)$, $t = (-\infty, \infty)$ 구간에서 적분하면 음파의 크기를 구하고 이를 공기에 압력에 대입하면 판위와 아래의 공기압력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_o(x, z, t) = -\frac{1}{(2\pi)^{3/2}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-\sqrt{k_x^2 - k_o^2} z)}{\sqrt{k_x^2 - k_o^2}} \times \sum_{m=1}^{\infty} \rho_o \omega^2 W_m(\omega) a_m(k_x) \exp[-i(k_x x - \omega t)] dk_x d\omega \quad (9)$$

$$p_t(x, z, t) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp[\sqrt{k_x^2 - k_o^2} (z+h)]}{\sqrt{k_x^2 - k_o^2}} \times \sum_{m=1}^{\infty} \rho_o \omega^2 W_m(\omega) a_m(k_x) \exp[-i(k_x x - \omega t)] dk_x d\omega \quad (10)$$

최종적으로, 주어진 진동수에 의해, 바닥판 아래쪽으로 d_o 만큼 떨어진 곳에서의 음파의 압력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[p_t(x, z)]_{z=-(h+d)} = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-\sqrt{k_x^2 - k_o^2} d_o)}{\sqrt{k_x^2 - k_o^2}} \times \sum_{m=1}^{\infty} \rho_o \omega^2 W_m(\omega) a_m(k_x) \exp(-ik_x x) dk_x \quad (11)$$

2.2. 해석 예제

본 절에서는 바닥판 진동에 기인하는 소음의 생성 메커니즘을 수치해석을 통하여 나타내고 있다. 진동수 영역에서의 해석을 수행하였으며, 진동수 영역에서의 바닥판의 진동, 음파의 크기를 구하였다. 바닥판 가진 형태는 충격하중을 사용하였다. 바닥판은 one way로 거동한다고 가정하였으며, 양변이 단순지지 되었다고 가정하였다. 다음 표 1은 수치해석에 사용된 바닥판과 공기의 재 계수를 나타낸다.

<표 1 수치해석에 사용된 재계수>

항 목	기 호	값
바닥판의 길이	a	350 cm
바닥판의 두께	h	15 cm
콘크리트의 탄성계수	E	1.4×10^{11} dyne/cm ²
콘크리트의 포아송 계수	σ	0.3
바닥판의 감쇠비	ζ_o	0.02
콘크리트의 밀도	ρ_c	2.4 g/cm ³
공기의 밀도	ρ_o	$1.5 \cdot 10^{-3}$ g/cm ³
공기중의 음속	c_o	34,000 cm/sec

다음 표 2는 고유치해석에 의한 바닥판의 각속도, 진동수 및 파동수(wave number)를 3차 모드까지 나타낸 것이다. 그림 2는 바닥판 각 모드의 전달함수를 나타낸다.

1차 모드의 진동이 가장 크게 나타나며, 2차 3차 차례로 응답이 줄어드는 것을 알 수 있다. 이것은 바닥판의 진동에 대한 기여도를 나타내는 것으로 바닥판의 진동을 지배하는 모드는 1차 모드임을 알 수 있다. 다음 그림 3은 바닥판 길이의 1/3, 1/2지점에 대한 바닥판의 응답특성을 나타내는 전달함수를 비교한 것이다.

<표 2. 바닥판의 동적 특성>

모드 \ 계수	각속도 (radian/sec)	진동수 (Hz)	파동수 (kx)
1차 모드	88.33	14.06	0.009
2차 모드	353.31	56.23	0.0180
3차 모드	794.96	126.52	0.0269

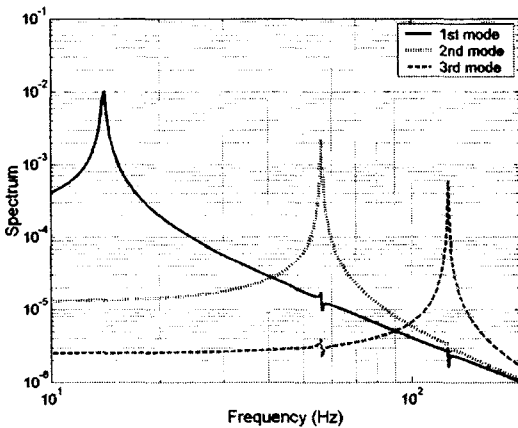


그림 2 각 모드의 전달함수

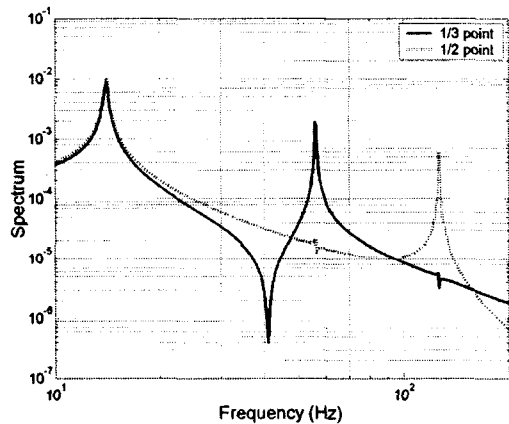


그림 3 계측위치에 따른 응답 전달 함수
($x = 1/3 a$ 지점, $x = 1/2 a$ 지점)

바닥판 길이의 1/3 지점에서의 응답 전달함수는 실선으로 나타나며 3차 모드 진동성분이 없이 나타나며, 1/2 지점에서의 전달함수는 점선으로 2차 모드의 진동성분이 나타나지 않는다. 또한 어느 지점이냐에 상관 없이 1차 모드의 진동성분이 우세하게 나타나는 것을 알 수 있다.

이에 비하여 음파의 크기를 나타내는 전달함수는 진동에 비하여 다른 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 그림 4는 바닥판 길이 각각 1/3, 1/2 지점에서 바닥판 아래 2.54 cm(d_0)에서의 음압 스펙트럼의 크기를 나타내는 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 바닥판 진동의 크기에서와 달리 2차 3차 모드의 진동으로부터 기인하는 음압의 크기가 더욱 우세한 것을 볼 수 있다.

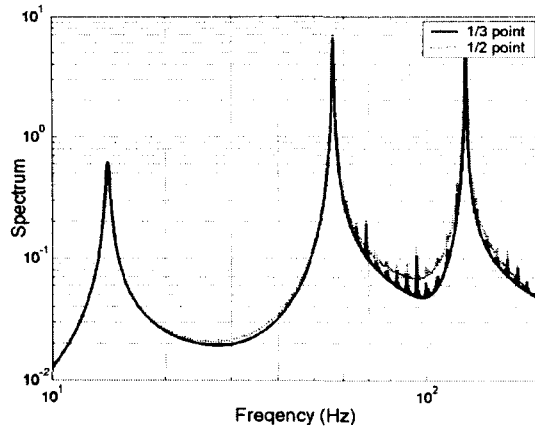


그림 4 계측위치에 따른 소음의 전달함수
($x=1/3$ a 지점 , $x = 1/2$ a 지점 $d_0=2.54$ cm)

다음은 구조물의 감쇠비, 두께, 강성에 따라 바닥판에서 방사되는 음압의 스펙트럼을 나타낸다. 그림 5, 6은 각각 평판의 감쇠비가 2%, 10%일 때의 가속도와 음압스펙트럼을 나타내는 것으로 가속도와 음압 모두 각기 모드 피크값에서 10~15dB 정도 줄어드는 것을 알 수 있다. 가속도계 및 마이크로폰의 위치는 바닥판길이(a)의 5/12지점, 평판폭(b)의 중앙점이며, 판 아래 2.54cm 지점이다. 그림 7은 바닥판의 두께 $h=15$ cm에서 $h=20$ cm로 증가시킬 때의 방사소음의 음압 스펙트럼을 나타내는 것으로 고유주파수가 오른쪽으로 증가하였으며, 각 모드 피크값에서 2~5dB 정도 줄어드는 것을 알 수 있다. 그림 8은 판의 강성을 2배 증가시킨 것으로 두께를 증가시킬 때보다 효과가 더 작게 나타났다. 수치해석결과 바닥판의 진동에서 기인하는 소음은 중고주파영역에서 크게 나타나는 경향이 있으며, 바닥판의 감쇠를 증가시키는 경우 가장 큰 저감효과를 가지는 것으로 나타났다. 그러나, 실 구조물에 대한 정확한 방사소음 예측과 효과적인 바닥판의 소음진동저감을 위한 더 많은 연구가 필요하다.

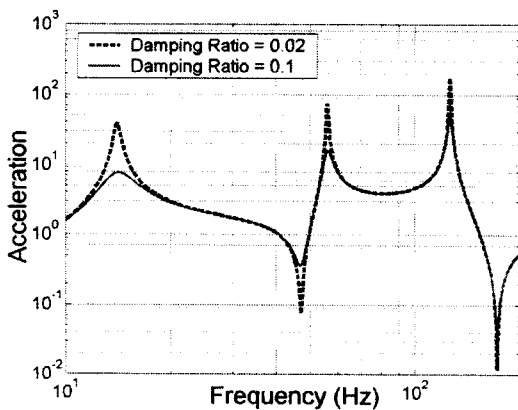


그림 5 바닥판 감쇠에 따른 가속도 저감효과

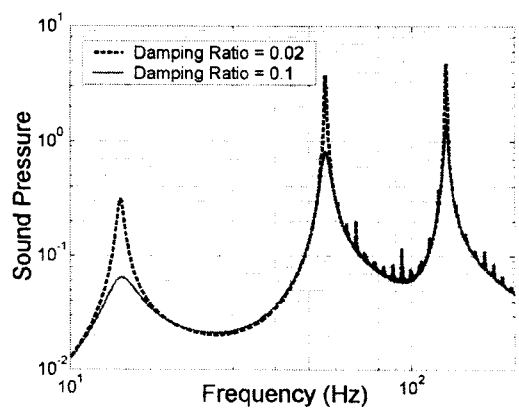


그림 6. 바닥판 감쇠에 따른 음압 저감효과

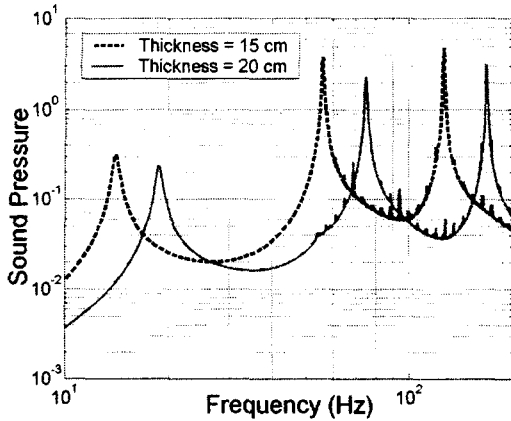


그림 7. 바닥판 두께에 따른 음압 저감효과

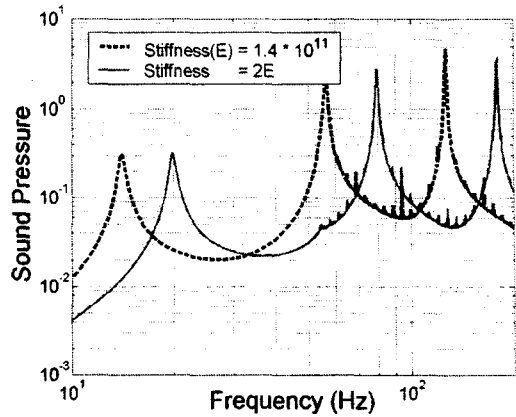


그림 8. 바닥판 강성에 따른 음압 저감효과

3. 결 론

바닥판 진동에 기인하는 소음의 발생메커니즘을 단순 지지된 1방향 바닥판에 대하여 고찰하였다. 또한 바닥판의 진동에 의하여 발생하는 음압의 크기와 바닥판의 동적특성과의 관계를 수치해석을 통하여 평가하였다. 수치해석결과 구조물의 감쇠비 증가가 소음 저감에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 바닥판의 두께증가는 저감효과는 가지고 있으나 감쇠비 증가에 의한 효과보다 작게 나타나는 경향이 있었다. 바닥판의 강성증가는 소음저감에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 나타났는데, 이것은 음압의 크기가 진동가속도에 비례하는 특성 때문에 강성의 증가가 가속도의 증가로 나타나고 이것이 다시 소음에 영향을 미친 것으로 판단된다. 이로부터, 바닥충격음을 저감하기 위해서는 바닥판의 동적특성 중 감쇠비의 영향이 가장 큰 것을 알 수 있었다.

그러나, 본 연구는 단순지지된 바닥판에 대한 수치해석결과에 기반한 것이기 때문에, 벽식 공동주택에 곧바로 적용하기는 어렵다고 판단되며 이에 대한 후속연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 LG 건설의 연구비지원으로 수행되었으며, LG건설 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Rudolph Szilard, 1974, Theory and Analysis of Plates : Classical and Numerical Methods., Prentice Hall.
- (2) Roy R. Craig, Jr., 1981, Structural Dynamics: An Introduction to Computer Methods,
- (3) Miguel C. Junger and David Feit, 1994, Sound, Structures, and Their Interaction, 2nd Edition, MIT Press.
- (4) Sung-Hwan Ko, Sangwoo Pyo, Woojae Seong, 2001, Structure-Borne and Flow Noise Reduction (Mathematical Modeling), Seoul National University Press.
- (5) Leo, L. B., and Eric, E. U., 1992, Noise and Vibration Control Engineering, John Wiley & Sons, Inc., New York.