질량형 댐퍼를 이용한 바닥판의 진동 및 소음 저감

Vibration and Noise Control of Slab Using the Mass Type Damper

황 재 승* • 박 성 철** • 김 홍 진***
Hwang, Jae-Seung • Park, Sung-Chul • Kim, Hong-Jin

ABSTRACT

It is proposed to analyze the vibration of slab with MTMD and vibration-induced noise. Substructure synthesis is introduced to develope the interaction between the slab and MTMD which are defined in different space and acoustic power is obtained from the velocity field of slab.

Numerical analysis is performed to show that the vibration and noise of slab can be reduced by MTMD. A living room of wall type apartment including the wall and MTMD is modeled and analyzed by FEM program. Numerical analysis shows that the vibration and noise control effect is different depending on the location and mass ratio of MTMD. Futhermore, noise is more effectively reduced when the vibration of higher modes of slab are reduced rather than lower modes.

Keywords: *MTMD, Substructure synthesis, acoustic power, vibration and noise control*

1. 서 론

2005년 1월 8일 공포된 주택성능등급표시제도에 따라 사업주체는 2006년 1월 9일부터 5개 성능 범주별로 주택의 성능에 대한 등급을 인정받아 이를 입주자 모집 공고안에 표시하여야 한다.(건설교통부 2006) 5개의 성능 범주 중 바닥충격음에 대한 성능등급은 경량충격음, 중량충격음으로 구별하여 각 4개의 등급기준으로 구분하며 표준 바닥구조를 적용하거나 성능인정을 받은 바닥구조를 사용하도록 되어 있다. 인정기관인 한국건설기술 연구원과 대한 주택공사로부터 현재까지 인정서를 부여받은 인정 바닥구조를 보면 경량, 중량충격음에 대하여 등급을 표시하고 있으며 경량충격음에 최우수등급인 1급을 받은 경우라 하더라도 중량충격음은 대부분 4급의 등급을 부여 받은 것으로 나타나고 있다.

우수한 경량충격음 성능에도 불구하고 중량충력음의 성능이 작게 나오는 것은 그만큼 중량충격음을 저감하는 것 자체가 어려운 것을 의미하며, 결과적으로 경량충력음을 저감시키고자하는 방법으로는 근본적으로 중량충격음을 저감시키는 것에 한계가 있음을 나타낸다. 바닥충격음이 바닥판의 진동에 영향을 받아 발생하는 것이지만 경량충격음은 상대적으로 고주파영역에서 발생하기 때문에 품질기준을 만족하는 완충재에 의해 효과적으로 저감되는 반면, 중량충격음은 저주파영역의 진동에 의해 영향을 크게 받기 때문에 완충재만으로 저감효과를 기대하기 어려우며, 바닥구조시스템을 구조적인 방법을 통하여 근본적으로 변경하거나 진동저감장치등을 이용하여 바닥판의 진동을 획기적으로 저감시킬 필요가 있다.

* 정회원 • 전남대학교 건축학부 교수 Email: jshwang@jnu.ac.kr
** 학생회원 • 전남대학교 대학원 건축공학과 석사과정
*** 정회원, 경북대학교 건설공학부 교수

본 연구에서는 바닥판의 진동을 저감시키기 위하여 사용된 진동제어장치가 소음의 일종인 중량충격음을 저감시키는 메커니즘을 고찰하고 제진장치에 의한 소음저감효과를 수치해석을 통하여 분석하고자 한다.

2. 제진장치가 설치된 바닥판의 진동 및 소음해석

2.1. 제진장치가 설치된 바닥판의 진동해석

제진장치에 의한 바닥판의 진동저감효과를 고찰하기 위하여 그림 1과 같이 제진장치가 설치된 바닥판을 고려한다. 제진장치로써는 질량형 타입의 수동형 다중동조질량감쇠기(MTMD)를 사용한다. MTMD는 단일 TMD와 같은 진동저감효과를 가지지만 동조가 정확히 안 된 경우에도 저감효과를 가지는 제진장치로 개발된 것이다.(Jangid, 1995) 본 연구에서는 소형으로 제작하여 바닥판의 작은 공간에도 효과적으로 설치할 수 있기 때문에 도입한 것이다. 제진장치는 바닥판의 상하부에 설치가 가능하나 시공의 편의성을 고려하여 맨바닥 위에 설치하는 것으로 가정하며 온돌배관 등 바닥 마감재에 대한 영향을 최소화하도록 설치한다.

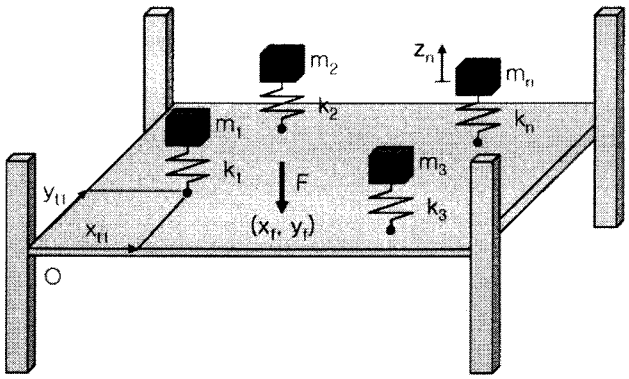


그림 1 MTMD 가 설치된 바닥판 및 충격하중

다음은 그림 1과 같이 n개의 MTMD가 설치된 바닥판이 충격하중 F를 받을 때의 운동방정식이다.

$$D\nabla^4 w + \overline{m}\frac{\partial^2 w}{dt^2} + \sum_{i=1}^{n} k_i \delta(x - x_{ti})\delta(y - y_{ti})(w(x_{ti},\ y_{ti},\ t) - z_i) = F\delta(x - x_f)(y - y_f) \quad (1)$$

$$m_1 \ddot{z}_1 + k_1(z_1 - w(x_{t1},\ y_{t1},\ t)) = 0 \quad (2)$$

$$\vdots$$

$$m_n \ddot{z}_n + k_n(z_n - w(x_{tn},\ y_{tn},\ t)) = 0 \quad (3)$$

여기서 $\overline{m}$는 바닥판의 단위면적당 질량, w는 바닥판의 수직변위, $(x_{ti},\ y_{ti})$는 i번째 TMD가 설치된 지점의 기준점 O로부터의 좌표값, (x_f, y_f)는 크기 F를 가지는 충격하중의 위치를 나타내는 좌표값, m_i, k_i z_i는 각각 i 번째 TMD의 질량, 강성, 수직변위, $\delta(.)$는 Dirac 델타함수를 나타내며, D, ∇^4 은 다음과 같이 나타내어진다. (Moheimani, 2003)

$$D=\frac{Eh^3}{12(1-\upsilon^2)}$$ E= Young 계수, h= 판두께, υ= 포아송비

$$\nabla^4=\frac{\partial^4}{\partial x^4}+2\frac{\partial^4}{\partial x^2\partial y^2}+\frac{\partial^4}{\partial y^4}$$

MTMD가 설치된 바닥판의 처짐을 다음과 같이 x, y 축에 대한 모드형상 X(x), Y(y)와 모드공간의 일반화좌표 $\theta(t)$로 나타낼 수 있다.

$$w(x,y,t)=\sum_{j=1}^{p} X_j(x)\,Y_j(y)\,\theta_j(t) \tag{4}$$

식(4)를 식(1)-(3)에 각각 대입하고 모드좌표계로 전환하여 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_j\ddot{\Theta}_j+\lambda_j^2M_j\Theta_j+\sum_{i=1}^{n}k_i\cdot X_j(x_{ti})\,Y_j(y_{ti})(w_i-z_i)=FX_j(x_f)\,Y_j(y_f) \tag{5}$$

$$m_i\ddot{z}_i+k_i(z_i-w_i)=0 \tag{6}$$

여기서 M_j λ_j 는 각각 j 번째 모드의 질량, 고유각속도를 나타내며, $w_i=w(x_{ti},y_{ti},t)$로써 i 번째 TMD가 설치된 지점에서의 바닥판의 진동변위를 간단히 나타낸 것이다. 또한 첨자 j는 모드를 나타내는 것이며 첨자 i 는 TMD의 순번을 나타낸다. 식 (5)는 다음 식(7)을 이용하여 모드형상을 간단한 기호로 나타내면 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi_{ij}=X_j(x_{ti})\,Y_j(y_{ti}) : \quad \text{TMD가 설치된 i 지점에서의 j 차 모드의 모드 형상값} \tag{7a}$$

$$\Phi_{fj}=X_j(x_f)\,Y_j(y_f) : \quad \text{충격하중이 작용하는 f지점에서의 j 차 모드의 모드 형상값} \tag{7b}$$

$$M_j\ddot{\Theta}_j+\lambda_j^2M_j\Theta_j+\sum_{i=1}^{n}k_i\Phi_{ij}(w_i-z_i)=F\Phi_{fj} \tag{8}$$

식(5)은 각각의 모드가 n개의 TMD에 의해 영향을 받는 것을 의미하며 식 (6)은 각각의 TMD가 바닥판의 설치된 위치에 따라 바닥판의 변위와 상호 연계되어 있는 것을 의미하고 있다. 해석의 편의를 위하여 유한개(p)의 모드까지와 n개의 TMD를 고려하여 식(5), (6)을 행렬로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M\ddot{q}+Kq=f \tag{9}$$

여기서 M, K q, f는 다음과 같이 정의 되는 행렬 및 벡터이다.

$$q=(\theta_1\ \theta_2\ \cdots\ \theta_p\ \ z_1\ z_2\ \cdots\ z_n)^T \tag{10}$$

$$f=(F\Phi_{f1},\ F\Phi_{f2},\ \cdots,\ F\Phi_{fp},\ 0.0,\cdots,0)^T \tag{11}$$

$$\boldsymbol{M}=\text{diag}(M_1\ \ M_2\ \cdots\ M_p\ \ m_1\ \ m_2\ \cdots\ m_n) \quad \text{diag : 대각화 기호} \tag{12}$$

$$
\boldsymbol{K} = \begin{bmatrix}
w_1^2 M_1 + k_1 \Phi_{11}^2 + k_2 \Phi_{21}^2 + \cdots + k_n \Phi_{n1}^2 & k_1 \Phi_{11} \Phi_{12} + k_2 \Phi_{21} \Phi_{22} + \cdots + k_n \Phi_{n1} \Phi_{n2} & \cdots & k_1 \Phi_{11} \Phi_{1p} + k_2 \Phi_{21} \Phi_{2p} + \cdots + k_n \Phi_{n1} \Phi_{np} & -k_1 \Phi_{11} & -k_2 \Phi_{21} & \cdots & -k_n \Phi_{n1} \\
 & w_2^2 M_2 + k_1 \Phi_{12}^2 + k_2 \Phi_{22} \Phi_{22} + \cdots + k_n \Phi_{n2} \Phi_{n2} & \cdots & k_1 \Phi_{12} \Phi_{1p} + k_2 \Phi_{22} \Phi_{2p} + \cdots + k_n \Phi_{n2} \Phi_{np} & -k_1 \Phi_{12} & -k_2 \Phi_{22} & \cdots & -k_n \Phi_{n2} \\
 & & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\
 & \text{Symmetric} & & w_p^2 M_p + k_1 \Phi_{1p}^2 + k_2 \Phi_{2p} \Phi_{2p} + \cdots + k_n \Phi_{np} \Phi_{np} & -k_1 \Phi_{1p} & -k_2 \Phi_{2p} & \cdots & -k_n \Phi_{np} \\
 & & & & k_1 & 0 & \cdots & 0 \\
 & & & & & k_2 & \cdots & 0 \\
 & & & & & & \ddots & \vdots \\
 & & & & & & & k_n
\end{bmatrix} \tag{13}
$$

2.2. 바닥판의 진동에 의한 소음배출

바닥판의 진동에 의해서 배출된 소음의 임의의 지점(r)에서의 음압(P)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.(Junger, 1994)

$$P(r) = -\frac{ik\rho c}{4\pi} \int_s G(r|r_s)\, V(r_s)\, ds(r_s) \tag{14}$$

여기서 i는 단위 복소수, r은 음장을 알고자하는 공간 내 임의의 점을 나타내는 변위벡터, k, ρ,c는 각각 wavenumber, 공기밀도, 음속을 나타내며 r_s 는 바닥판 내 임의 점을 나타내는 변위벡터, $G(r|r_s)$는 바닥판내의 진동이 임의공간지점 r의 음압에 미치는 영향을 나타내는 Green 함수, V는 바닥판의 진동속도(속도장)를 나타낸다. 음의 파워(acoustic power)는 음 압력과 그 지점의 속도의 곱으로 나타내며 음이 투과되는 공간내 임의의 평면(S)에서의 값은 다음과 같다.

$$\Pi_{av} = \frac{1}{2} \int_s P(r) \cdot V(r)\, ds(r) \tag{15}$$

식(14)를 식(15)에 대입하고 정리하면 음의 파워는 다음과 같다.

$$\Pi_{av} = -\frac{i\omega\rho}{8\pi} \int_s \int_{so} V^*(r)\, G(r|r_s)\, V(r_s)\, ds(r) ds(r_s) \tag{16}$$

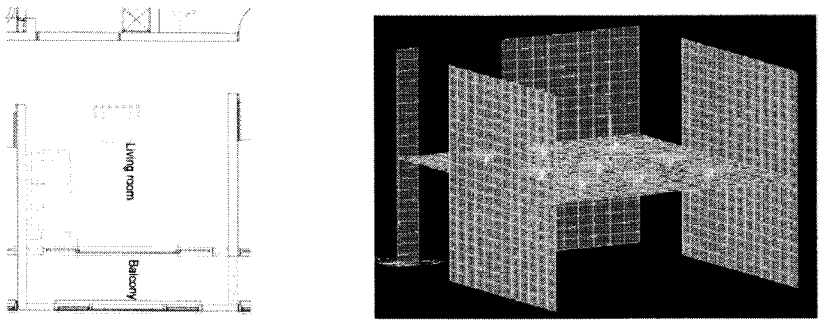
여기서 함수 $G(r|r_s)$를 Rayleigh 적분값을 사용하고, 바닥판내의 속도장 $V(r_s)$ 와 임의 공간내 가상으로 결정된 평면의 속도장 $V(r)$가 서로 같다고 가정한다. 이때 속도장은 식(4)를 미분하여 구한다. 속도장

을 구하기 위하여 필요한 모드공간에서의 일반화 좌표값인 $\theta_i(t)$은 식 (9)의 운동방정식을 해석하여 구한다. 그러므로 바닥판에서 배출되는 소음은 바닥판의 속도장 $V(r_s)$에 의하여 결정되는 것을 알 수 있으며, 속도장은 진동해석을 통해서 구하게 된다.

3. 수치해석에 의한 소음저감효과

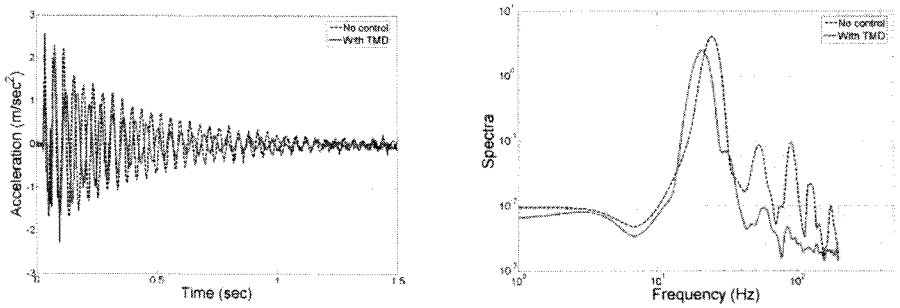
3.1. 바닥판의 모델링

수치해석에 사용된 벽식 아파트 바닥판(거실)의 평면 [그림 2(a)]과 유한요소프로그램을 이용하여 바닥판과 벽체, 충격하중 그리고 9개의 제진장치를 모델링한 것이 그림 2(b)에 나타나 있다. 바닥 마감이 이루어지기전으로 바닥판은 가로 4.6m 세로 5.2m 맨바닥의 두께는 0.18m이며 층고는 2.85m이다. 바닥판의 뒷부분은 주방으로 향하는 개구부가 있고 양쪽 옆은 복도이다.



(a) 평명 형상 (b) 바닥판과 제진장치의 모델링

그림 2. 바닥판 평면 및 제진장치 모델링



(a) 가속도 시간이력 (b) 가속도 진동수 성분

그림 3. 바닥판 중앙점에서의 가속도

3.2. 제진장치에 의한 소음 저감효과

그림 3은 제진장치가 설치되지 않았을 때와 그림 2(b)와 같이 제진장치를 설치했을 때(질량비 15%) 바닥판 중앙부 가진에 의한 중앙점의 가속도와 진동수 성분을 나타낸다. 가속도의 시간이력을 나타내는 그림 3(a)를 보면 진동이 크게 줄어들지 않았음을 볼 수 있다. 이러한 현상은 가속도의 진동수 성분을 나타내는

그림 3(b)에서와 같이 바닥판 진동에 지배적인 1차 모드 진동수가 질량효과에 의하여 약간 왼쪽으로 편이가 일어나고 있을 뿐 그 크기는 크게 줄어들지 않은 것에서 알 수 있다. 그러나 2차 이상의 모드에서는 피크값이 1/10정도로 줄어드는 것을 알 수 있다. 고차모드에서 진동저감효과는 곧바로 소음 저감효과로 나타나는 것을 그림 4로부터 알 수 있다. 그림 4는 진동해석과 같은 조건하에서 음의 파워를 해석하고 이를 1/1 옥타브 밴드에서 제어시와 비제어시를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 각 중심 주파수에서의 크기가 줄어드는 것을 알 수 있다. 소음의 저감효과를 역 A곡선을 이용한 단일 평가지수법을 이용하여 나타낼 경우, 비제어시 54dB 제어시 46dB로 8dB의 소음저감효과가 있는 것으로 나타났다.

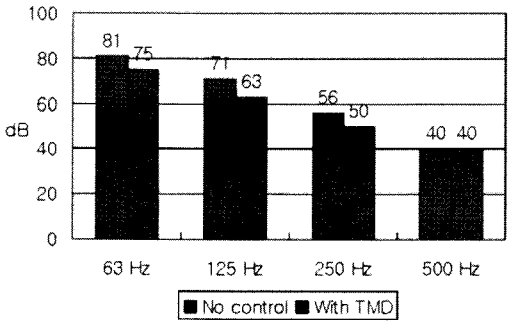


그림 4. 비제어와 제어시 바닥판 배출소음의 크기 비교

4. 결 론

본 연구에서는 바닥판의 진동을 저감시키는 제진장치가 진동에 의해서 유발되는 소음을 저감하는 메커니즘을 분석하고 수치해석을 통하여 소음저감효과를 고찰하였다. 진동제어장치로 사용된 다중질량감쇠기와 바닥판의 상호 연관된 운동방정식을 부분 구조합성법을 이용하여 유도하였으며, 바닥판의 속도장이 음의 파워에 영향을 미치는 과정을 보여 진동저감이 소음저감으로 나타나는 과정을 보였다.

수치해석결과 진동저감효과에 의하여 소음저감효과가 나타나는 것을 알 수 있었으며 고차모드의 진동을 저감시키는 것이 보다 효과적으로 소음저감에 유리하게 나타남을 알 수 있다. 수치해석결과이긴 하지만 제진장치의 질량비가 15%일 때 8dB의 소음저감효과를 가지는 것으로 나타났다. 그러나 제진장치의 위치, 질량비에 따른 소음저감효과는 추후 연구를 통하여 좀더 면밀히 검토될 필요가 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발 사업(03산C04-01)에 의한 것임.

참고문헌

건설교통부 (2006) 건설교통부 고시 제 2006-14호 주택성능등급 인정 및 관리기준.

Jangid R.S. (1995) Dynamic characteristics of structures with multiple tuned mass dampers. Structural Engineering and Mechanics ; 3 : pp 497- 509

Moheimani S.O.R, Halim D., Fleming A.J. (2003) Spatial Control of Vibration : Theory and Experiments. World Scientific.

Junger M.C. Feit D (1994) Sound, Structures, and Their Interaction, 2nd Edition, MIT Press.