

다중동조질량감쇠기를 이용한 바닥판의 진동제어

Vibration Control of slab Using the Multi Tuned Mass Damper

김수진† · 황재승* ·
Kim Su-jin Hwang Jea Seung

Key Words : Vibration Control(진동제어), Slab(바닥판), Multi Tuned Mass Damper(다중동조질량감쇠기)

ABSTRACT

Attempts have been applied to reduce the vibration of slab. There are several method in the vibration control of slab from a traditional method such as increment of mass or stiffness of slab to a innovative method augmenting damping of slab. In this study, a attempt has been made to increase the effective damping in slab using the Multi Tuned Mass Damper. we evaluate the reduction effect of the slab selected through numerical simulation and optimization process by applying it to a FEM model. The numerical simulation shows that the effective damping is increased as the number of bean is increased and the vibration control effect is very high.

기 호 설 명

- w : 판의 처짐
- γ : 단위면적당 판의 감쇠
- μ : 단위면적당 판의 질량
- D : 휨강성
- E : 바닥판의 탄성계수
- v : 바닥판의 포와송비
- $\delta(x)$: Dirac delta 함수
- u : 제진장치 변위
- $u(x_1, y_1)$: 제진장치가 설치됨 지점에서의 바닥판 변위
- M_1 : 1차 모드 질량
- K_1 : 1차 모드 강성
- ϕ_{1x} : 1차 모드의 x방향 모드형상
- ϕ_{1y} : 1차 모드의 y방향 모드형상

1. 서 론

현대의 구조물은 구조시스템의 발달, 재료의 경량화, 경제적인 이유 등으로 바닥판의 두께가 축소되는 경향이 있다. 이러한 바닥판은 구조적인 안전성을 확보 할 수 있더라도 건축 환경의 변화에 따른 사용성의 문제가 발생 할 수 있다. 건물 바닥판에서 발생하는 진동의 문제는 현대 건물의 특성으로 인하여 현재 선진국에서는 중요한 문제로 인식되고 있다.

바닥판 진동을 저감하기 위한 방법 중에는 동적 흡진기(vibration absorber)의 원리를 이용하여 효과적으로 진동을 흡수하는 방법이 있다. 동조질량감쇠기(Tuned Mass - Damper)는 대표적인 동적 흡진기로 바닥판의 진동수와 TMD의 진동수를 최적으로 동조시켜 바닥판의 진동에너지를 흡수함으로써 진동을 저감시키는 장치이다.

단일의 감쇠기를 슬라브에 설치하는 경우 장치의 크기가 비대해져 설치공간을 부가적으로 필요로 하며, 바닥판의 진동수는 슬라브의 적재하중 등에 따라 변경될 가능성이 크며 그 결과 동조효과에 의한 에너지 흡수성능이 저하되어 진동 저감효과를 기대할 수 없게 된다. 이러한 단일 감쇠기의 설치공간의 제약을 보완하고 안정적이며 건설한 저감효과를 발휘하기 위하여 개발된 것이 다중질량동조감쇠기(Multi Tuned Mass Damper - MTMD)이다. 다중감쇠기는 주 구조물의 진동수와 넓은 대역의 진동수영역을 가지고 동조되

† 전남대 건축공학과 석사과정
E-mail : jahwang@jnu.ac.kr
Tel : (062) 530-0250, Fax : (062) 530-0250

* 전남대 건축학부 교수

기 때문에 주 구조물의 진동수가 변경되더라도 제어효과를 유지할 수 있다.

본 연구에서는 다중동조질량감쇠기의 특성을 고찰하고 감쇠기에 의해 바닥판의 진동이 저감되는 효과를 수치 시뮬레이션을 통하여 검증하고자 한다. 또한 제작된 다중감쇠기에 의한 바닥판의 진동저감효과에 대한 실험 및 분석을 하고자 한다.

2. 수치해석에 의한 진동저감효과

2.1 바닥판 모델링

바닥판은 가로 4.6m 세로 5.2m 두께는 0.18m이며 높이는 2.85m 이다. 해석모델은 유한요소모델이며 plate요소를 사용하였다. 추후 실험하게 될 실물 구조물의 거실부분이다. 바닥판의 뒷부분은 주방으로 향하는 개구부가 있고 양쪽 옆은 복도이다. 실제와 같이 모델링 하기는 어려워 1차 고유진동수를 맞추기 위해 강성 값을 조절하였다. 정확하게 모델링이 되었다고 보기는 어려우나 상대적인 결과 비교에는 유용하게 쓰일 것이다. 바닥판에 대한 고유치 해석을 통하여 동적특성을 파악하였다.

Mode	UX	UY	UZ	RX
EIGENVALUE ANALYSIS				
Mode No.	Frequency (rad/sec)	Frequency (cycle/sec)	Period (sec)	Tolerance
1	178.547209	27.97010	0.029460	0.000e+000
2	231.700821	36.876331	0.027118	1.807e-015
3	331.556333	51.940661	0.019239	2.1050e-014
4	421.154997	65.983331	0.015157	4.3191e-013
5	472.117919	73.139981	0.013669	2.2559e-011

그림 1. 고유치 해석 결과

다음 [그림 2, 3, 4, 5]는 각 모드에 해당하는 모드형상을 나타낸다.

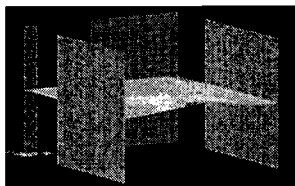


그림 2. 1차 모드형상

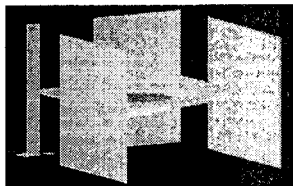


그림 3. 2차 모드형상

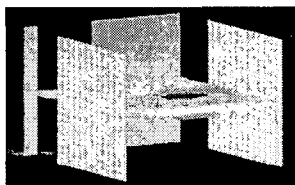


그림 4. 3차 모드형상

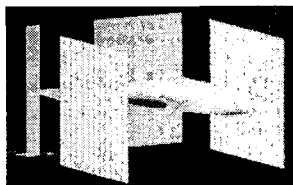


그림 5. 4차 모드형상

1차 모드는 양쪽 벽을 기준으로 바닥판 자유단 중앙부 전체가 상하로 진동하는 형상을 가지며 자유단 중앙부가 최대 값을 가진다. 이에 비하여 2차 모드는 자유단 중앙부가 최대가 되면 바닥판의 중앙부가 최소값을 갖는다. 3차 모드형상은 자유단 중앙부와 부벽으로 가는 개구부 쪽이 최대가 되며 그 사이가 최소가 되는 형상으로 진동을 한다. 마지막으로 4차 모드는 자유단에서 최대 최소값을 가지고 이것이 맞은편 방향으로 일정하게 유지되는 형상을 가진다. 이러한 형상모드는 감쇠시스템의 위치산정에 매우 유용하게 사용하게 될 것으로 사료된다.

2.2 해석결과

바닥판에 바닥판 질량의 5%, 15%, 25%일 때의 질량체를 설치하여 바닥판과 질량 사이를 점탄성 소재로 연결하였다. 바닥판의 중앙부에 4000N의 충격하중을 주고 자유단 중앙부의 가속도를 측정하였다. 질량비 15%일 때 비제어시와 제어시 그래프와 질량비가 각각 5%, 15%, 25%일 때의 가속도와 스펙트럼을 비교한 그래프이다.

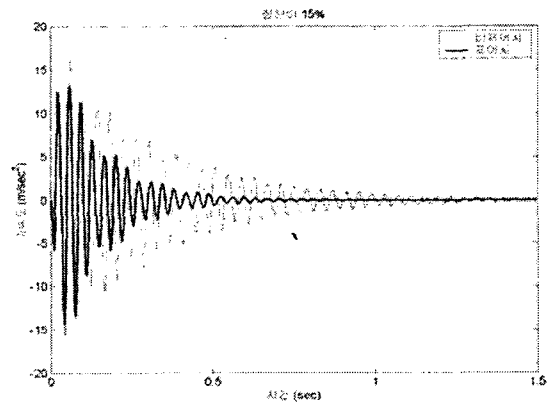


그림 6. 질량비 15%

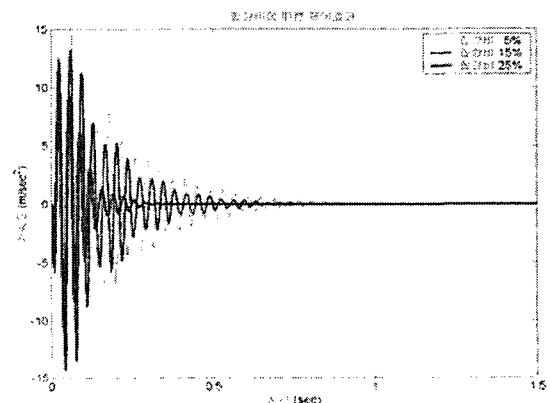


그림 7. 질량비에 따른 저감효과

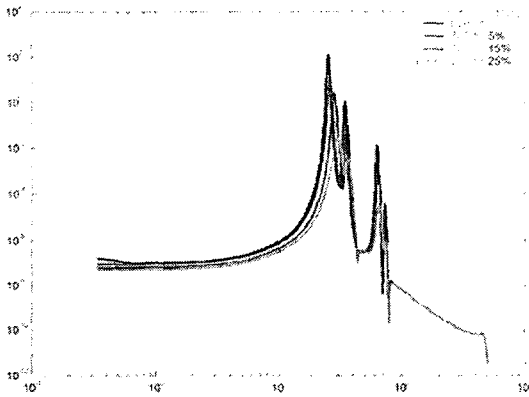


그림 8. 스펙트럼비교

3. 실험에 의한 진동저감효과

3.1 TMD가 설치된 바닥판의 거동

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

$$D \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \gamma \frac{\partial w}{\partial t} = -f(x, t) \quad (1)$$

여기서, $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$

운동방정식과 제진장치가 연계된 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 바닥판의 상하 인접한 공기의 압력은 무시하였다.

$$D \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \gamma \frac{\partial w}{\partial t} + \delta(x_1)\delta(y_1)c(\dot{u}(x_1, y_1) - \dot{w}) + \delta(x_1)\delta(y_1)k(u(x_1, y_1) - w) = -f(x, t) \quad (2)$$

$$m\ddot{u} + c(\dot{u} - \dot{w}(x_1, y_1)) + k(u - w(x_1, y_1)) = 0 \quad (3)$$

바닥판의 변위 w 를 모드공간으로 치환 후 각 모드와 감쇠기가 연계된 모드방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 이때, 모드공간과 관련된 일반 법칙은 유효하다고 가정하며 1차 모드만을 나타낸다. 수식의 전개과정은 간단히 하기 위하여 바닥판의 감쇠기의 감쇠항을 무시하였다.

$$M_1 \ddot{w}_1 + K_1 w_1 + k_t \left(\sum_{n=1}^{\infty} w_n \Phi_n(x_t) \Phi_n(y_t) - w \right) = F \Phi_{1x}(x_0) \Phi_{1y}(y_0) \quad (4)$$

$$m_t \ddot{u} + k_t \left(u - \sum_{n=1}^{\infty} w_n \Phi_n(x_t) \Phi_n(y_t) \right) = 0 \quad (5)$$

3.2 임팩트 댐퍼

일정한 질량비를 가지는 임팩트 댐퍼를 설계하였다. 이는 바닥판 상부에 질량체와 점탄성 소재를 교대로 적층하여 제작된 댐퍼로서 소재와 질량체 사이를 접합하게 되면 수개의 모드를 가지는 TMD로 볼 수 있다. 점탄성 소재는 강재가 수평이동 하지 못하도록 충분한 마찰을 가지고 있으며, 적층된 경우 강성과 감쇠를 가지며 댐퍼의 상하진동에 의해 에너지가 소산된다.



그림 9. 댐퍼형상

3.3 진동저감효과

바닥판의 크기는 4.6m x 5.2m이며 그림 9는 바닥판에 설치된 제진장치와 가진 실험을 나타낸다.

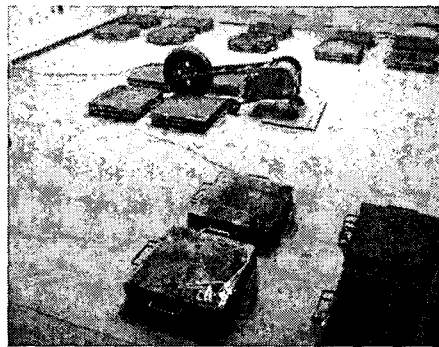


그림 9. 바닥판에 설치된 진동저감장치

다음 그림 10에는 실험의 바닥판 타격점과 가속도계 위치가 나와 있다. 거실의 중앙부와 네 귀퉁이에서 750mm 씩 떨어진 곳을 타격했으며, 중앙과 500mm 떨어진 곳 등 3곳에 가속도계를 설치하여 자유진동 실험을 실시하였다.

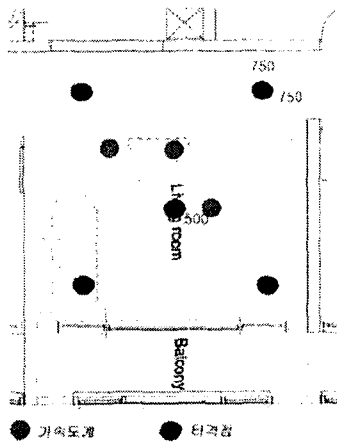


그림 10. 바닥판 타격점과 가속도계

제진장치의 질량비가 바닥판의 15%일 때, 중앙부에서의 제어시와 비제어시의 가속도를 시간영역에서 비교한 것으로 진동제어 효과는 거의 없는 것으로 나타났다. 그에 비하여 그림 10은 진동수 영역에서의 가속도를 비교한 것으로 1차 모드 진동수가 왼편으로 이동하였고, 고차모드에서 진동 저감현상이 두드러지게 나타났다.

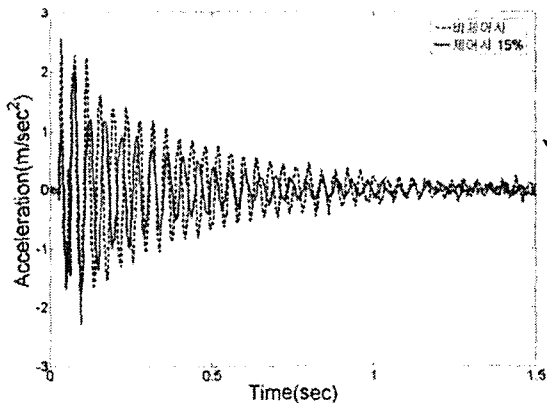


그림 11. 중앙부 가속도 시간이력 비교

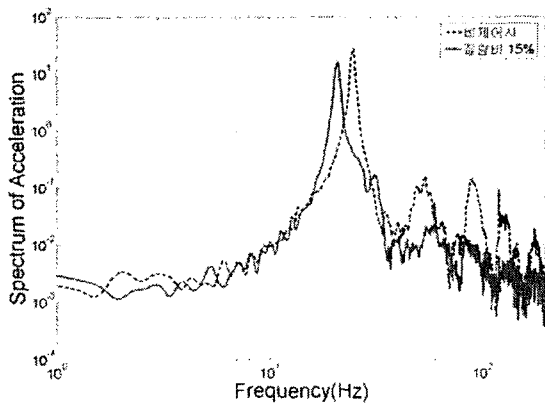


그림 12. 중앙부가속도 파워스펙트럼 비교

4. 결론

본 연구에서는 다중동조질량감쇠기를 바닥판에 설치하여 진동저감효과를 시뮬레이션을 통하여 평가하였다.

바닥판에 대한 질량비를 변경하여 진동저감효과를 검증한 결과 질량비가 많을수록 저감효과가 컸으며, 고차모드에서의 저감 현상은 두드러지게 나타났다. 또한 실험에 의한 저감 효과에서는 가속도 시간이력에서는 제어효과가 거의 없었지만 진동수 영역에서의 가속도를 비교해 보면 1차 모드 진동수가 왼편으로 이동하였다.

참 고 문 헌

- (1) Ahid D. Nashif, David I. G. Jones, John P. Henderson, 1985, Vibration Damping, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- (2) Rudolph Szilard, 2004, Theories and Applications of Plate Analysis, Wiley & Sons.
- (3) Mario Paz, William Leigh, 2004, Structural Dynamics, Kluwer Academic Publishers.
- (4) Kenneth, G. M., 1995, Vibration Testing, John Wiley & Sons, Inc., New York.