



비대칭 동조질량감쇠기를 활용한 바닥진동제어의 강건성 향상 방안

고아라¹ · 이철호^{2*} · 김성용³

¹석사, 서울대학교, 건축학과 ²교수, 서울대학교, 건축학과 ³박사과정, 서울대학교, 건축학과

Enhancing Robustness of Floor Vibration Control by Using Asymmetric Tuned Mass Damper

Ko, A Ra¹, Lee, Cheol Ho^{2*}, Kim, Sung Yong³

¹Former Graduate Student in SNU and Staff, Building Works Engineering Team, Daewoo E&C, Seoul, 110-713, Korea

²Professor, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-744, Korea

³Ph.D. Cadidate, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-744, Korea

Abstract - When floor vibration problems occur in existing buildings, TMD (tuned mass damper) can be a viable alternative to resolving the problem. Only when TMD has been exactly tuned to the natural frequency of the floor, it can control the vibration as intended in design. However, TMD gets inefficient in the situation where the natural frequency changes as a result of the uncontrollable variation of the floor mass weight. This physical phenomenon is often called as TMD- off-tuning. This study proposes asymmetric TMD for enhancing the robustness of floor vibration control against uncertain natural frequencies. The proposed TMD features two asymmetric linear springs such that the floor vibrational energy can be dissipated through both the translational and rotational motion. An easy-to-use graphical optimization method was developed in this study. The asymmetric TMD proposed outperformed in vibration control by 28% compared to that of conventional TMD. The robustness of asymmetric TMD of this study was two times higher than that of conventional TMD.

Keywords - Asymmetric tuned mass damper, Floor vibration, Off-tuning, Mass variation, Robustness

1. 서론

최근 강재의 고강도화를 통한 부재 단면 사이즈의 절감은 종종 구조의 경량화와 강성의 부족으로 인한 바닥진동 문제를 야기한다. 이는 적절한 설계나 진동제어를 통해 예방하거나 대처할 수 있는 문제로, 건설시장에서 강재가 가지는 이점을 충분히 활용하기 위해서는 구조물의 바닥진동을 고려한 설계법 및 진동문제가 발생한 후에 진동문제에 대처할 수 있는 적절한 방안이 요구된다.

구조물의 고유진동수에 동조된 부가질량을 부착하여 진동을 제어하는 TMD는 가장 널리 쓰이는 진동제어 장치 중 하나이다. Frahm^[1]이 TMD를 창안한 이래 최근까지 이에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다^{[2],[3],[4],[5],[6]}. 이 중 주목할 만한 연구는 Warburton^[2]이 제한한 TMD로, 이 TMD는 전 주파수대역에 고른 에너지 분포를 보이는 백색잡음(white noise) 외력에 대한 변위를 최소화하려는 목적으로 설계되는 이전 TMD의 한계에서 벗어났다. 구조물의 가속도를 기준으로 응답을 최소화하였으며 지진처럼 구조물에 강제되는 가속도가 주어졌을 경우에 대한 최적화를 수행하는 등 다양한 조건에 대한 TMD의 최적화 식을 제안하였다.

하지만 기존 TMD의 경우, 부가질량의 고유진동수가 미리 예측된 고유진동수에 제대로 동조되지 않을 경우 동조이탈(Off-tuning)현상으로 인해 성능이 급격히 저하되는 단점을 가지고 있다. 특히 바닥의 경우, 사용용도가 변함에 따라 상이한 적재하중 및 유효질량을 가지게 되며, 최근 건

Note.-Discussion open until December 31, 2014. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on November 1, 2013; revised April 1, 2014; approved on May 22, 2014.

Copyright © 2014 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-880-8735 Fax. +82-2-880-9061

E-mail. ceholee@snu.ac.kr

물의 경량화와 컴퓨터 사용의 증가로 인해 종이를 사용하지 않는 사무실(paperless office)이 늘어나면서 실제 바닥의 적재하중과 구조물을 설계할 때의 하중이 큰 차이를 보이는 등 진동제어 시 동조이탈현상에 취약한 측면이 있다. 따라서 바닥진동을 효과적으로 제어하기 위해서는 시스템을 구성하는 변수의 변동이나 하중의 불확실성이 큰 조건 하에서도 급격한 성능 저하 없이 요구 수준 이상의 성능을 보장하는 이른바 강건성의 확보가 필수적이다.

최근에는 동조이탈로 인해 성능이 급격히 저하되는 기존 TMD의 단점을 극복하고자 다양한 형태의 TMD가 연구되고 있다^{[7],[8],[9],[10]}. 이 중 Zuo and Nayfeh^[10]는 하나의 질량에 두 개의 강성과 한 개의 감쇠가 달려있는 새로운 형태의 다중 TMD(Multiple TMD, MTMD)를 제안하였다. 제안된 MTMD의 경우 한 개의 부가질량으로 진동에너지를 흡수하는 단일 TMD(Single TMD, STMD)에 비해 동조이탈로 인한 성능 저하 없이 충분한 강건성을 가지고 있지만, 상호 연계되어 최적화의 결과에 영향을 주는 MTMD의 변수들을 모두 독립적으로 최적화하였기 때문에 그 결과의 정확성이 떨어지는 한계를 지니고 있다.

본 연구에서는 바닥진동제어의 강건성을 확보하기 위해 진동수의 불확실성을 반영한 비대칭 동조질량감쇠기의 활용을 제안한다. 본 연구는 바닥진동제어의 효과를 최대화할 수 있는 비대칭 TMD(Asymmetric TMD, ATMD)를 설계하고 최적화 방안을 모색하여, 향후 ATMD의 실용화에 도움을 주고자 한다.

2. 바닥에 가해지는 하중의 특성

2.1 바닥에 가해지는 동적하중

바닥에 가해지는 대표적인 동적하중으로, 사람의 걸음으로 인해 가해지는 보행하중을 들 수 있다. 보행하중 함수는 조화함수로 가정하여 식 (1)와 같이 푸리에급수의 초기 네 개 항으로 표현한다^[11].

$$F(t) = q \sum_{h=1}^4 \alpha_h \sin[2h\pi f_p t + \phi_h] \quad (1)$$

여기서, q : 도약자의 중량(체중, 1인당 746N)

α_h : h 번째 항의 푸리에계수

f_p : 보행하중의 진동수

ϕ_h : h 번째 항의 위상각

통상 단순보행의 경우 진동수는 1.5Hz에서 2.5Hz 사이로 알려져 있으며, 이 중 발생빈도가 높은 1.8Hz에서 2.2Hz 사이를 설계에 사용한다^[11]. 보행진동수의 정수배와 바닥의 진동수가 가까워지면 바닥의 공진이 발생하게 되므로, 설계 시에는 보행진동수의 정수배가 바닥의 진동수와 일치하지 않도록 설계하여야 한다.

2.2 바닥에 가해지는 정적하중

바닥에 가해지는 정적하중은 바닥의 고유진동수와 직결되는 동적 성질로써, 바닥 설계 시 바닥의 자중과 적재하중을 고려하여 바닥의 응답을 예측하는데 중요한 인자로 작용한다. 현행 건축구조기준(2009) 중 고정하중과 관련된 사항의 경우에는 활하중과 달리 건물의 용도에 따른 기본설계 고정하중이 주어지지 않으며, 건축물 및 공작물 각 부분의 고정하중은 각 부분의 실상에 따라 산정하라고만 명시되어 있다^[12]. 유럽기준의 경우, 바닥 자중에는 슬라브 자중, 천장무게나 설비중량 등의 고정하중을 포함하며 사용성 평가에 있어서는 적재하중의 30%만을 반영한다^[11]. 그러나 현대의 건물은 사용 용도가 다양하며 그 용도가 변함에 따라 적재하중 역시 상이해지기 때문에 정확한 고유진동수를 예측하는 데에 어려움이 따르므로 이에 대한 추가적인 논의가 요구된다.

2.3 정적하중으로 인한 사람-구조물 간 상호작용

많은 사람들이 동시에 재하되는 바닥의 경우 사람과 구조물 간 상호작용으로 인해 구조물의 고유진동수에 유의미한 변동이 생길 수 있다. Ellis and Ji^[13]는 군중이 재하되는 스타디움의 스탠드와 같은 바닥의 경우, 군중이 시스템의 추가적인 자유도로 작용하여 바닥의 고유진동수, 감쇠비 등 동적성질이 변화함을 지적하였고, 이러한 현상을 이론 및 측정을 통해 규명하였다. 또한, Murray *et al.*^[14]은 바닥 위의 사람들은 질량, 강성 및 감쇠를 갖고 있는 추가자유도로 거동하며, 이로 인해 원구조물이 단자유도 시스템일지라도 다자유도 시스템처럼 거동하게 됨을 지적하였다. 그렇기 때문에 이러한 현상을 고려하지 않고 TMD 등의 진동제어장치를 설치할 경우 그 성능을 보장할 수 없다고 언급하였다.

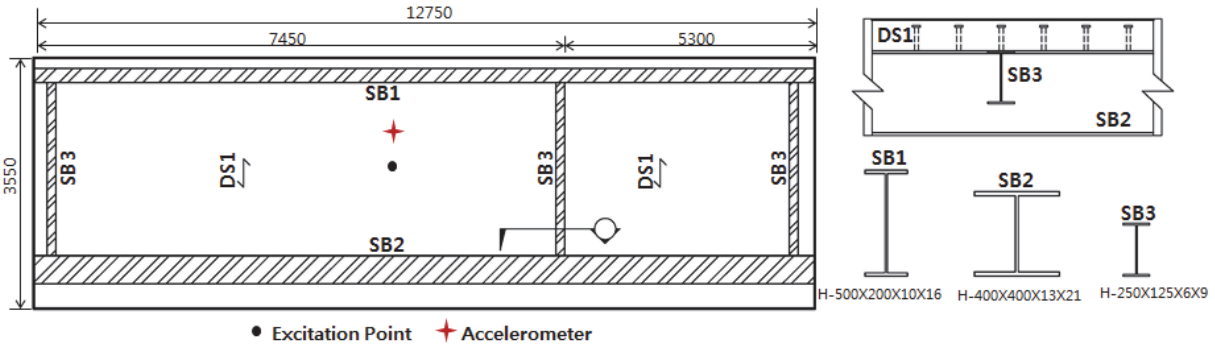


Fig. 1. Dimensions and details of test floor

3. 바닥 고유진동수 변동 확인 실험

바닥에 재하되는 하중의 변화에 따른 바닥 고유진동수의 변화양상을 확인하기 위하여, 바닥에서 발생할 수 있는 다양한 상황을 상정한 후 각 경우의 고유진동수를 측정하였다. 평소 다수의 사용자로부터 진동성능에 대한 불만사항이 접수된 서울 A대학 내 모 건물의 복도 바닥을 대상으로 하

였다. 대상 바닥은 철골 보와 콘크리트 슬라브 구조로 이루어져 있으며 각 보의 상세와 바닥의 크기는 Fig. 1과 같다. 응답계측을 위한 가속도계와 고유진동수 및 감쇠비 식별을 위한 임팩트해머 가진점은 모드 형상을 고려하여 진폭이 가장 크게 발생할 것이라고 예상되는 바닥의 중심에 위치시켰다.

Table 1. Program of floor vibration test

No.	Test Name	No. of Participants	Participants' State	Excitation
1	15-St-H	15	Standing	Impact Hammer
2	15-St-1.7			Walk-1.7Hz
3	15-St-2.0			Walk-2.0Hz
4	15-St-2.3			Walk-2.3Hz
5	15-Seat-H		Seated	Impact Hammer
6	15-Seat-1.7			Walk-1.7Hz
7	15-Seat-2.0			Walk-2.0Hz
8	15-Seat-2.3			Walk-2.3Hz
9	10-St-H	10	Standing	Impact Hammer
10	10-St-1.7			Walk-1.7Hz
11	10-St-2.0			Walk-2.0Hz
12	10-St-2.3			Walk-2.3Hz
13	10-Seat-H		Seated	Impact Hammer
14	10-Seat-1.7			Walk-1.7Hz
15	10-Seat-2.0			Walk-2.0Hz
16	10-Seat-2.3			Walk-2.3Hz
17	0-N-H	0	-	Impact Hammer

3.1 바닥진동실험 및 측정 프로그램

바닥의 재하조건에 따른 고유진동수 변동성을 관찰하기 위해 10명, 15명이 재하된 바닥에서 임팩트해머로 가진하여 고유진동수 및 감쇠비를 확인하였다. 추가적으로 바닥의 진동성능을 확인하기 위해 바닥의 공진이 유발되는 외부 가진 진동수를 추정하여 보행가진 진동수를 산정하였다.

예비실험을 통해 얻어진 6.9Hz의 바닥 고유진동수를 바탕으로, 외부 가진 진동수의 정수배가 바닥의 진동수와 일치하도록 보행 가진수를 인자로 선정하였다. 본 실험에서는 1.7Hz(=6.9 Hz/4)와 2.3 Hz(=6.9Hz/3)로 바닥을 보행가진 하였으며, 발생빈도가 높은 2.0Hz로도 바닥을 가진하였다. 위에서 열거한 실험 조건들을 Table 1에 정리하였다.

3.2 바닥진동실험 및 측정 결과 분석

우선, 대조군인 빈 바닥의 고유진동수와 감쇠비를 측정하였다. 총 여섯 번의 측정을 통해 평균을 취한 결과 바닥의 고유진동수와 감쇠비는 각각 6.638Hz와 1.13%였으며, 이 경우의 주파수응답함수를 Fig. 2에 그림으로 나타내었다.

실험 15-St-H, 15-Seat-H, 10-St-H, 10-Seat-H을 통해 사람 15명 또는 10명이 바닥에 직립한 경우와 의자에 앉은 경우의 바닥 고유진동수 변동을 각각 여섯 차례에 걸쳐 측정하였으며, 이 중 15명이 의자에 앉아있는 경우 (15-Seat-H)의 주파수응답함수를 Fig. 3에 도시하였다.

빈 바닥의 경우에는 6.638Hz 하나의 고유진동수를 가지는 단자유도 운동을 하는데 반해(Fig. 2), 바닥에 다수의 사람이 있는 바닥의 경우에는 사람-구조물 간 상호작용으로 인해 하나의 진동수가 아닌 일정한 구간 내에서 진동수가 분리되는 현상이 발생함을 관찰할 수 있다(Fig. 3).

Fig. 4는 실험 15-St-H, 15-Seat-H, 10-St-H, 10-Seat-H 각각의 세 점 ●(Lower), ■(Peak), ▲(Upper)

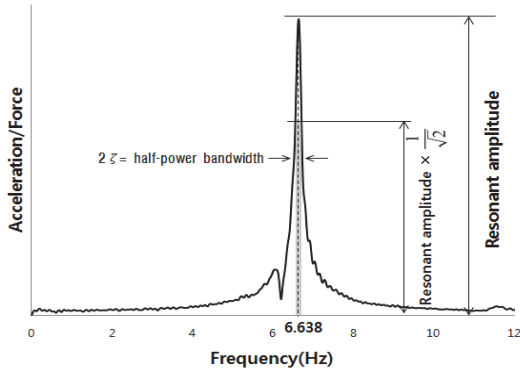


Fig. 2. Frequency response function from test 0-N-H

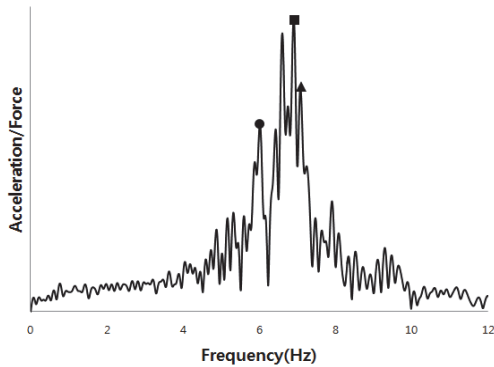


Fig. 3. Frequency response function from test 15-Seat-H

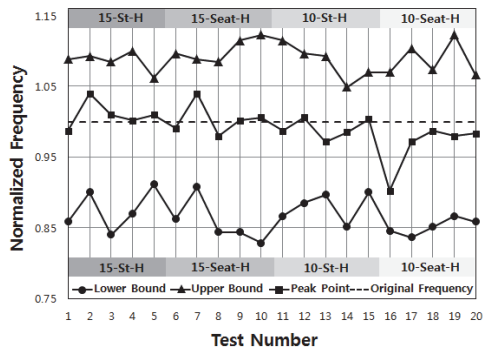


Fig. 4. Change of frequency due to the presence of participants

의 바닥진동수 변화 양상을 빈 바닥의 고유진동수인 6.638 Hz로 정규화한 결과이다. 모든 경우에서 바닥의 진동수가 분리됨을 확인할 수 있었으며, 바닥 고유진동수는 하한계 5.501Hz로부터 상한계 7.451Hz로 최대 17%까지 변동함을 확인하였다.

4. 단일 동조질량감쇠기의 특성

4.1 단일 동조질량감쇠기 모델링

Fig. 5는 바닥시스템과 이에 설치된 STMD를 모델링한 것으로, 강성 k_1 , 감쇠 c_1 인 원구조물에 질량 m_2 , 강성 k_2 , 감쇠 c_2 를 설치한 것이다. 가진 P 에 대한 바닥과 STMD의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

조화가진에 대한 응답을 얻기 위해 식 (2)에 $u_1 = u_{10}e^{i\omega t}$, $u_2 = u_{20}e^{i\omega t}$, $P = p_0e^{i\omega t}$ 를 대입하면 아래 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} (k_1 + k_2 - m_1\omega^2) + (c_1 + c_2)\omega i & -k_2 - c_2\omega i \\ -k_2 - c_2\omega i & (k_2 - m_2\omega^2) + c_2\omega i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{10} \\ u_{20} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

재실자는 바닥의 변위나 속도보다는 가속도에 민감하기 때문에^[14], 본 연구에서는 바닥의 가속도를 목적함수로 선정하였다. 따라서 x_{f0}/p_0 를 시간 t 에 대하여 두 번 미분하여 \ddot{x}_{f0}/p_0 의 식을 유도하였으며, 식 (3)을 바닥시스템의 질량

으로 정규화하기 위해 $\mu = \frac{m_2}{m_1}$, $\zeta_1 = \frac{c_1}{2m_1\omega_1}$, $\zeta_2 = \frac{c_2}{2m_2\omega_2}$ 을

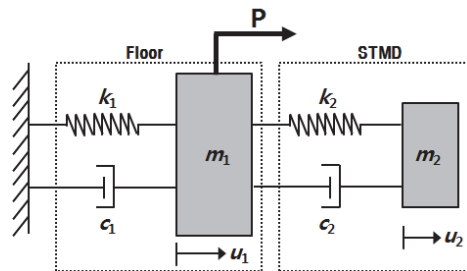


Fig. 5. Floor-STMD system

대입하여 정리하면 아래와 같은 주파수응답함수를 얻을 수 있다.

$$\frac{\ddot{u}_{10}}{p_0} = \frac{[(\omega^2 - (\omega_2)^2 + 2\zeta_2\omega\omega_2i)]\omega^2}{[(\omega_2)^2 - \omega^2 + 2\zeta_2\omega\omega_2i][(\omega_1)^2 - \omega^2 + 2\mu\zeta_2\omega\omega_2i + \mu(\omega_2)^2 + 2\zeta_1\omega\omega_1i] - \mu(\omega_2 + 2\zeta_2\omega_2i)^2(\omega_2)^2]m_1}$$

($f_r = \frac{f_2}{f_1}, g = \frac{f}{f_1}$ 대입)

$$= \frac{[(g^2 - (f_r)^2 + 2\zeta_2gf_r i)g^2]}{[(f_r)^2 - g^2 + 2\zeta_2gf_r i][(1 - g^2 + 2\mu\zeta_2gf_r i + \mu(f_r)^2 + 2\zeta_1gf_r i) - \mu(f_r + 2\zeta_2g i)^2(f_r)^2]m_1}$$

(4)

- 여기서, g : 바닥진동수와 가진진동수의 비(= f/f_1)
- f_r : 바닥진동수와 TMD진동수의 비(= f_2/f_1)
- ζ_1 : 바닥의 감쇠비
- ζ_2 : TMD의 감쇠비
- μ : 바닥질량과 TMD질량의 비(= m_2/m_1)

4.2 단일 동조질량감쇠기의 한계

앞서 지적했듯이 STMD의 경우 바닥의 고유진동수가 바뀌게 되면 동조이탈 현상으로 인해 진동제어 성능이 현격히 저하된다. 이러한 동조이탈을 확인하기 위하여 앞서 3절에서 측정한 바닥의 동적 성질을 4.1절 바닥의 응답식 식 (4)에 대입하여 완전히 동조된 경우와 동조이탈이 일어난 경우의 주파수응답함수를 비교해 보았다.

우선 Warburton^[2]의 제안식을 통해 최적화된 STMD의 진동수와 감쇠비를 구하였다. 크기에 제약이 따르는 바닥용 STMD임을 고려하여 STMD와 바닥의 질량비 μ 는 0.01

로 결정하였다. 아래와 같이 STMD의 진동수는 6.605Hz, 감쇠비 ζ_2 는 6.108% 일 때, 최적의 성능을 발휘하게 된다.

$$f = \frac{f_{TMD,opt}}{f_{struc}} = \frac{1}{\sqrt{1+\mu}} = \frac{1}{\sqrt{1+0.01}} = 0.995 \quad (5a)$$

$$f_{TMD,opt} = 0.995 \times 6.638Hz = 6.605Hz \quad (5b)$$

$$\zeta_{TMD,opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu/2)}} = \sqrt{\frac{3 \times 0.01}{8(1+0.01/2)}} = 6.108 \quad (5c)$$

이렇게 최적화된 STMD가 앞서 다루었던 바닥에 설치되었다고 가정한 후, STMD가 제대로 동조된 경우와 그렇지 않은 경우의 주파수응답함수를 그림으로 나타내었다(Fig. 6) 여기서 실선은 STMD를 설치하지 않은 빈 바닥의 주파수응답함수이고 세 개의 점선은 STMD가 부착된 바닥의 주파수응답함수다. STMD가 설치된 세 경우 모두 바닥의 고유진동수는 6.638Hz, 감쇠비는 6.108%라고 가정하였다.

STMD가 바닥진동수 6.638Hz에 정확하게 동조된 주파수응답함수의 최대값은 11.5로, 이 값은 TMD가 설치되지 않은 경우의 최대응답값의 25% 수준으로 낮추는 뛰어난 제어성능을 발휘한다. 하지만 사람-구조물 간 상호작용이나 기타 요인으로 인해 바닥의 진동수가 5.501Hz 혹은 7.451Hz로 바뀌어 동조이탈이 발생하는 경우의 최대응답값은 STMD가 설치되지 않은 경우의 최대응답치의 약 50~80%수준에 이르는 등 제어성능이 급격히 저하됨을 알 수 있다.

5. 비대칭 동조질량감쇠기의 제안

5.1 기본구성

본 연구에서 제안하는 ATMD는 STMD와는 달리 질량 m_t 와 회전관성모멘트 $I_t = m_t\rho^2$ 를 가지는 부가질량에 두 개의 서로 다른 선형 스프링을 설치하여 병진운동뿐만 아니라 회전운동을 하면서 바닥의 진동에너지를 흡수한다. Fig. 7은 바닥구조물 및 이에 부착된 ATMD의 각종 변수를 도시한 것이다. 여기서, ATMD가 부착된 바닥의 고유진동수는 $\omega_f = \sqrt{k_f/m_f}$ 이며 감쇠비는 $\zeta_f = c_f/2\sqrt{k_fm_f}$ 이다. 선형 스프링 k_2 의 크기는 선형 스프링 k_1 크기의 α 배이며 ATMD의 감쇠 c_1 의 위치는 선형 스프링 k_1 와 같은 곳에 위치한다.

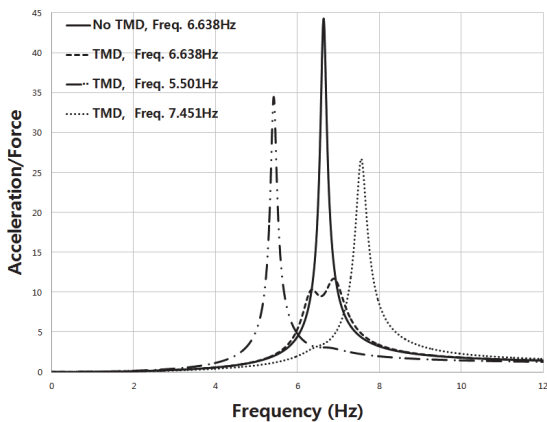


Fig. 6. Comparison of vibration control performance

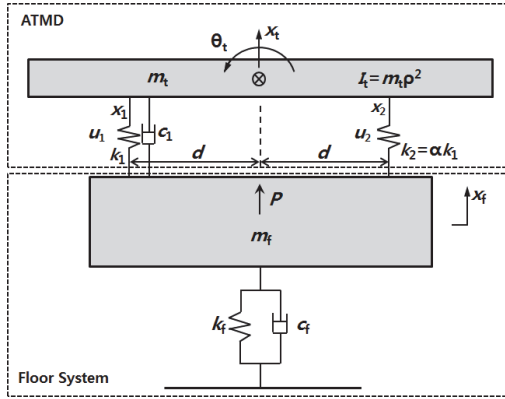


Fig. 7. ATMD installed to control floor vibration

5.2 ATMD가 부착된 시스템의 지배방정식 유도

Fig. 7과 같이 모델링 된 ATMD의 제어력과 시스템을 이루는 자유도 간의 적합방정식은 아래와 같다.

$$u_1 = k_1(x_1 - x_f) + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_f) \quad (6a)$$

$$u_2 = k_2(x_2 - x_f) \quad (6b)$$

$$x_t = \frac{x_1 + x_2}{2}, \quad \theta_t = \frac{x_2 - x_1}{2d}, \quad I_t = m_t \rho^2 \quad (7)$$

연계된 두 시스템의 동적 평형방정식은 다음과 같다.

$$m_t \ddot{x}_t = -u_1 - u_2 \quad (8a)$$

$$I_t \ddot{\theta}_t = u_1 d - u_2 d \quad (8b)$$

$$m_f \ddot{x}_f + c_f \dot{x}_f + k_f x_f = P + u_1 + u_2 \quad (8c)$$

식 (6)과 식 (7)을 식 (8)에 각각 대입하여 정리하면, ATMD가 부착된 시스템의 지배방정식을 식 (9)와 같이 행렬식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \frac{m_t}{2} & \frac{m_t}{2} & 0 \\ -\frac{m_t}{2} & \frac{m_t}{2} & 0 \\ 0 & 0 & m_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} P + \begin{bmatrix} -1 \\ d^2 \\ \rho^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

식 (9)에서 주목할 점은, ATMD 시스템의 성능은 회전관성모멘트 I_t 로 결정되는 것이 아니라, 회전반경 ρ 와 무게중심으로부터 스프링까지의 거리 d 의 비(ρ/d)에 의하여 결정된다는 것이다.

조화가진에 대한 정상상태응답을 얻기 위해 $x_1 = x_{10}e^{i\omega t}$, $x_2 = x_{20}e^{i\omega t}$, $x_f = x_{f0}e^{i\omega t}$, $P = p_0e^{i\omega t}$ 를 대입한 후, x_{f0}/p_0 를 시간 t 에 대해 두 번 미분하여 \ddot{x}_{f0}/p_0 의 식을 유도하였으며, 그 결과는 아래와 같다.

$$\frac{\ddot{x}_{f0}}{p_0} = \frac{C + Di}{A + Bi} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} A = & -32\pi^6 f^6 m_f m_t^2 + 8\pi^4 f^4 k_f m_t^2 + 32\pi^4 f^4 k_f m_t \zeta_1 \zeta_f \sqrt{k_t m_t} \sqrt{k_f m_f} \\ & + 32\pi^4 f^4 m_t (d/\rho)^2 \zeta_1 \zeta_f \sqrt{k_t m_t} \sqrt{k_f m_f} + \frac{8\pi^4 f^4 k_f m_t^2}{\alpha + 1} \\ & + \frac{8\pi^4 f^4 k_t m_f m_t}{\alpha + 1} + \frac{8\pi^4 f^4 \alpha k_t m_t^2}{\alpha + 1} + \frac{8\pi^4 f^4 \alpha k_t m_f m_t}{\alpha + 1} \\ & + \frac{8\pi^4 f^4 k_t m_f m_t (d/\rho)^2}{\alpha + 1} + \frac{8\pi^4 f^4 \alpha k_t m_f m_t (d/\rho)^2}{\alpha + 1} \\ & - \frac{2\pi^2 f^2 k_t k_f m_t}{\alpha + 1} - \frac{2\pi^2 f^2 \alpha k_t k_f m_t}{\alpha + 1} - \frac{2\pi^2 f^2 k_t k_f m_t (d/\rho)^2}{\alpha + 1} \\ & - \frac{2\pi^2 f^2 \alpha k_t k_f m_t (d/\rho)^2}{\alpha + 1} - \frac{32\pi^2 f^2 \alpha k_t (d/\rho)^2 \zeta_1 \zeta_f \sqrt{k_t m_t} \sqrt{k_f m_f}}{\alpha} \\ & - \frac{8\pi^2 f^2 \alpha k_t^2 m_f (d/\rho)^2}{(\alpha + 1)^2} - \frac{8\pi^2 f^2 \alpha k_t^2 m_t (d/\rho)^2}{(\alpha + 1)^2} + \frac{2\alpha k_t^2 k_f (d/\rho)^2}{(\alpha + 1)^2} \\ B = & 32\pi^5 f^5 m_t^2 \zeta_1 \sqrt{k_t m_t} + 32\pi^5 f^5 m_t^2 \zeta_f \sqrt{k_f m_f} + 32\pi^5 f^5 m_f m_t \zeta_1 \sqrt{k_t m_t} \\ & + 32\pi^5 f^5 m_f m_t (d/\rho)^2 \zeta_1 \sqrt{k_t m_t} - 8\pi^3 f^3 k_f m_t \zeta_1 \sqrt{k_t m_t} \\ & - 8\pi^3 f^3 k_f m_t (d/\rho)^2 \zeta_1 \sqrt{k_t m_t} - \frac{8\pi^3 f^3 k_t m_t \zeta_f \sqrt{k_f m_f}}{\alpha + 1} \\ & - \frac{32\pi^3 f^3 \alpha k_t m_t (d/\rho)^2 \zeta_1 \sqrt{k_t m_t}}{\alpha + 1} + \frac{8\pi f \alpha k_t k_f (d/\rho)^2 \zeta_1 \sqrt{k_t m_t}}{\alpha + 1} \\ & + \frac{8\pi f \alpha k_t^2 (d/\rho)^2 \zeta_f \sqrt{k_f m_f}}{(\alpha + 1)^2} \\ C = & -32\pi^6 f^6 m_t^2 + \frac{32\pi^6 f^6 \alpha k_t m_t}{\alpha + 1} + \frac{8\pi^4 f^4 k_t m_t}{\alpha + 1} + \frac{8\pi^4 f^4 k_t m_t (d/\rho)^2}{\alpha + 1} \\ & + \frac{8\pi^4 f^4 \alpha k_t m_t (d/\rho)^2}{\alpha + 1} - \frac{8\pi^2 f^2 \alpha k_t^2 (d/\rho)^2}{(\alpha + 1)^2} \end{aligned}$$

$$D = 32\pi^5 f^5 m_i \zeta_1 \sqrt{k_i m_i} + 32\pi^5 f^5 m_i (d/\rho)^2 \zeta_1 \sqrt{k_i m_i}$$

$$\frac{32\pi^3 f^3 \alpha k_i (d/\rho)^2 \zeta_1 \sqrt{k_i m_i}}{\alpha + 1}$$

5.3 비대칭 동조질량감쇠기의 최적화

ATMD의 응답식 식 (10)은 매우 복잡하기 때문에, 주어진 변수를 최적화하는 닫힌 형태의 해를 구하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 수치 최적화를 하기에 앞서, 질량비 등 설계자가 외부에서 결정해야 하는 변수는 적절한 수치를 대입하였다.

먼저, ATMD 설치로 인해 추가되는 무게와 부가질량의 크기를 최소화하기 위해 바닥과 ATMD의 질량비 μ 는 0.01로 고정하였으며, 바닥의 고유진동수와 ATMD의 고유진동수를 같도록 하기 위해 ATMD의 강성 또한 바닥강성의 1%가 된다. STMD와 ATMD의 성능을 동등한 조건 하에서 비교하기 위하여 ATMD의 감쇠비는 앞서 도출된 STMD의 최적화된 감쇠비와 같은 값인 6.109%로 정하였다. 이 과정을 통해 최적화할 변수는 ATMD의 강성비 α 와 ATMD의 기하학적인 특성을 담고 있는 반경비 d/ρ 두 개의 변수만이 남게 된다.

본 연구에서는 $d/\rho - \alpha$ 의 그래프를 이용하여 최적화를

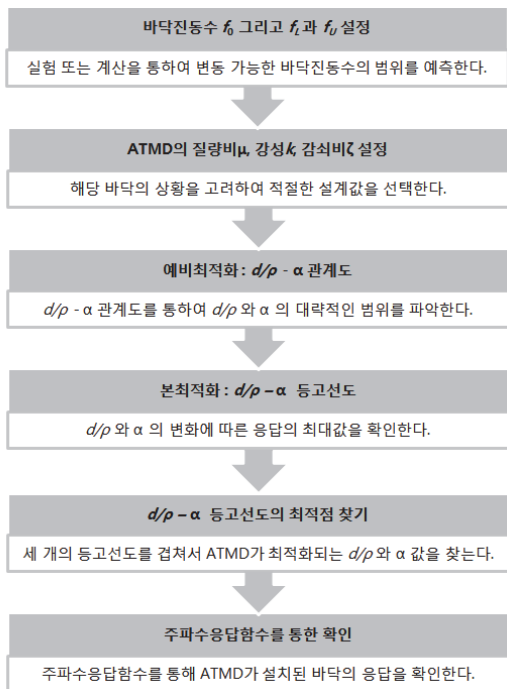
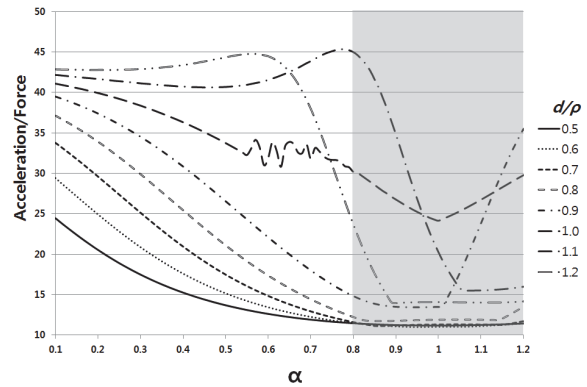
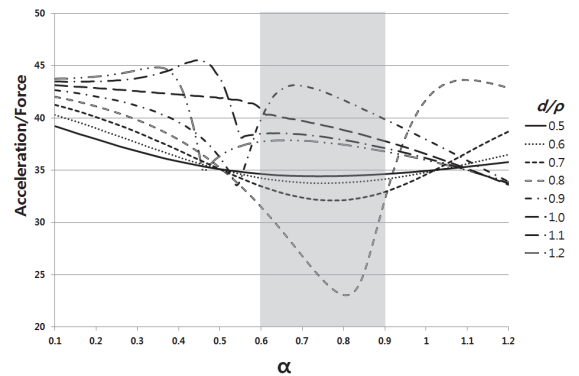


Fig. 8. Flow chart of graphic method proposed

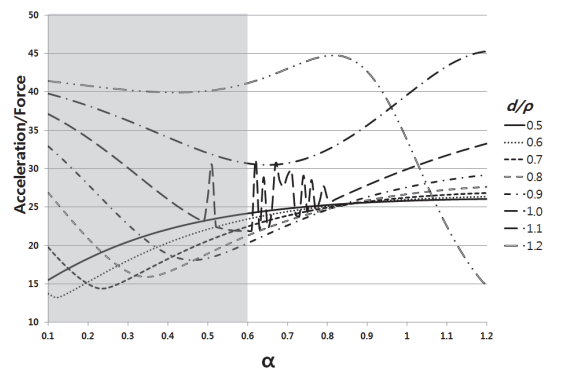
실시하였다. 그래프를 이용한 최적화는 크게 두 단계로 나뉜다. 우선, $d/\rho - \alpha$ 의 관계도를 활용한 예비 최적화를 수행하여 최적해가 위치할만한 구간을 예측한다. 다음으로, 본 최적화 단계에서는 $d/\rho - \alpha$ 등고선도를 이용하여 최종적으로 최적화점을 찾는다. 그래프를 이용하여 최적화가 진행되기 때문에 이 방법을 “Graphic Method”라고 명명하였으며, 최적화 과정을 Fig. 8에 요약하였다.



(a) $f_0 = 6.638\text{Hz}$



(b) $f_L = 5.501\text{Hz}$



(c) $f_V = 7.451\text{Hz}$

Fig. 9. Variation of floor acceleration

5.3.1 $d/\rho - \alpha$ 의 관계도를 활용한 예비 최적화

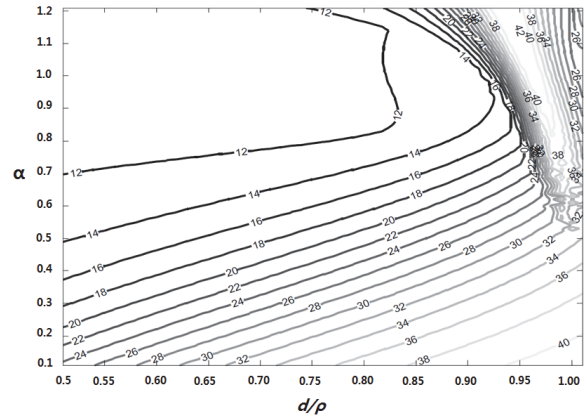
먼저, 예비최적화 단계로 d/ρ 와 α 가 각각 독립적으로 변할 때에 주파수응답함수 최대값의 추이를 확인하였다. Fig. 9a, b, c는 각각 $f_0 = 6.638\text{Hz}$, $f_L = 5.501\text{Hz}$, $f_U = 7.451\text{Hz}$ 의 고유진동수에 대해 반경비 d/ρ 를 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2로 고정시킨 후 α 를 변화시켜가며 주파수응답함수의 최대값을 구한 것을 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 9a, b, c는 공통적으로 d/ρ 가 1~1.2 사이에서는 제어성능이 저하되고 타 구간에 비해 불안정한 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 따라서 ATMD는 d/ρ 가 0.5보다 크고 1이하인 구간에서 최적화될 것으로 예상된다. α 는 대략적으로 Fig. 9a에서는 0.8~1.2 사이, Fig. 9b에서는 0.6~0.9 사이, Fig. 9c에서는 0.1~0.6 사이에서 최소값을 갖는다. 따라서, $0.1 < \alpha < 1.2$, $0.5 < d/\rho < 1.0$ 구간에서 ATMD가 최적화될 것으로 예상된다.

5.3.2 $d/\rho - \alpha$ 의 등고선도를 활용한 최적화

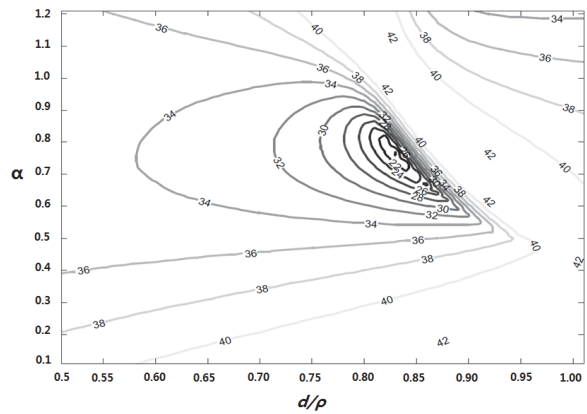
본 최적화 단계에서는 $d/\rho - \alpha$ 등고선도를 작성하여 d/ρ 와 α 가 서로 독립적이지 않은 상황에서 응답의 최대값을 확인하여 최적화한다. 앞서 5.3.1절에서 구한 $0.1 < \alpha < 1.2$, $0.5 < d/\rho < 1.0$ 범위에서 본 최적화를 진행하였다. Fig. 10a, b, c는 각각 바닥진동수가 $f_0 = 6.638\text{Hz}$, $f_L = 5.501\text{Hz}$, $f_U = 7.451\text{Hz}$ 인 경우에 대한 주파수응답함수의 최대값을 도시한 것으로, 각 그래프에 나타나는 숫자는 d/ρ 와 α 의 변화에 따른 바닥 주파수응답함수의 최대값을 의미한다.

ATMD의 최적화 방법으로 바닥의 진동수가 f_L 과 f_U 일 때 각각의 주파수응답함수 곡선상의 최대값이 되도록 작은 값을 가지면서 두 값이 같도록 조정하는 MINIMAX 방식을 택하였다. 먼저, 하한계(5.501Hz)와 상한계(7.451Hz)의 등고선도를 작성한 후(Fig. 10b, 10c), 이들을 중첩시켜서 두 주파수응답함수의 최대값이 같은 점을 모두 찾는다(Fig. 11). 다음으로, Fig. 11의 교점을 기본 바닥진동수($f_0 = 6.638\text{Hz}$) 바닥의 등고선도에 모두 표시한다(Fig. 12). 하한계 f_L 와 상한계 f_U 두 등고선도의 교점 중에서 바닥고유진동수가 f_0 인 바닥의 응답값을 가장 작게 하는 점은 바닥고유진동수가 상한/하한일 경우의 최대값을 최소화하면서, 바닥고유진동수가 변동없이 f_0 인 경우에도 최적성능을 보장하는 성능점이 되는 것이다. Fig. 12을 통하여 최적화점은 d/ρ 는 0.79, α

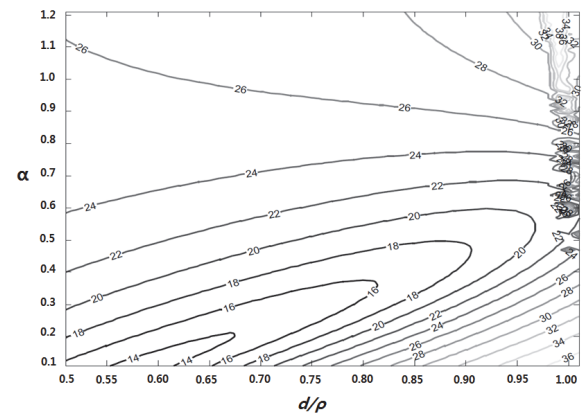
는 0.82임을 확인할 수 있다. 즉, 본 연구의 대상이 되는 바닥진동수 6.638Hz, 감쇠비 $\zeta = 1.13\%$ 인 바닥에 부착된 ATMD는 $d/\rho = 0.79$, $\alpha = 0.68$ 에서 최적화되는 것을 확인하였다.



(a) $f_0 = 6.638\text{Hz}$



(b) $f_L = 5.501\text{Hz}$



(c) $f_U = 7.451\text{Hz}$

Fig. 10. $d/\rho - \alpha$ contour

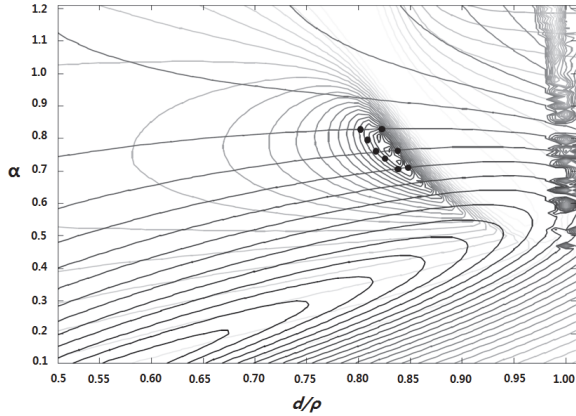


Fig. 11. Superposition of two contour plots

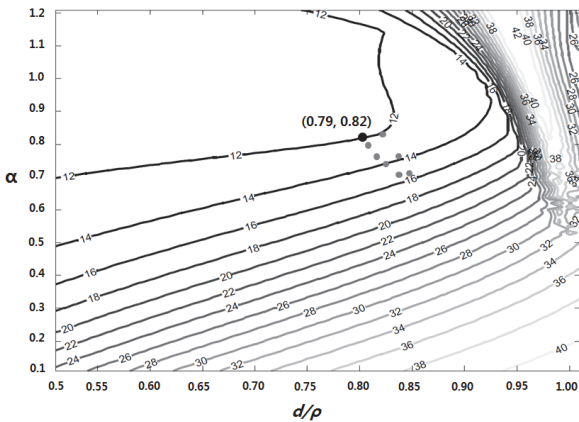


Fig. 12. Optimum value of d/ρ and α

5.4 최적화된 비대칭 동조질량감쇠기의 성능 확인

Fig. 13은 바닥의 고유진동수가 6.638Hz인 빈 바닥과 6.638Hz에 동조된 ATMD가 설치된 바닥의 주파수응답함수를 도시한 것이다. ATMD가 설치되지 않은 빈 바닥의 경우, 응답의 최대값은 44.25이지만, 6.638Hz 바닥에 정확하게 동조된 ATMD가 설치된 바닥에서 응답의 최대값은 11.77로 ATMD가 설치되지 않은 빈 바닥에 비하여 최대값이 73.4% 감소하였다.

넓은 범위의 바닥진동수에 대하여 강건한 진동제어 성능을 발휘하는 ATMD를 설계하기 위해서는 바닥의 진동수가 f_L 과 f_U 인 경우에도 효과적인 진동제어 성능을 발휘하는지에 대해 확인이 필요하다. Fig. 13은 바닥의 고유진동수가 상한값 혹은 하한값인 경우의 주파수응답함수를 도시한 것으로, 응답의 최대값은 25.26 과 25.02 로 ATMD가 설치되지 않은 빈 바닥에 비하여 대략 43% 감소하였다. 바닥의

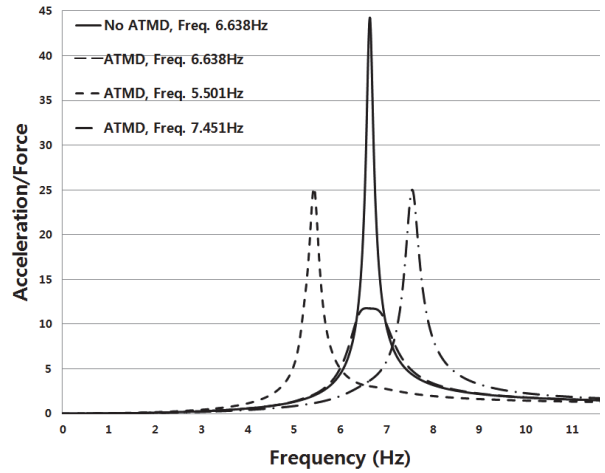


Fig. 13. Comparison of floor frequency response functions

진동수가 5.501Hz인 경우의 STMD의 주파수응답함수(Fig. 6)와 비교하면, ATMD가 부착된 바닥에서는 일반 TMD가 부착된 바닥에 비하여 동조이탈 정도가 현저하게 줄어들었음을 확인할 수 있다. ATMD가 부착된 바닥에서 응답의 최대값은 일반 TMD가 부착된 경우의 최대값에 비하여 28% 감소하였다.

다음으로는 TMD 성능의 편차를 확인해 보았다. Fig. 6에서 일반 TMD가 설치된 바닥에서 세 개의 응답함수의 최대값 중 가장 큰 값은 35이며 작은 값은 11.50이다. 바닥의 진동수가 변함에 따라 TMD의 성능은 약 $3(35/11.50=3.04)$ 배 이상 차이를 보인다. Fig. 13의 ATMD가 설치된 바닥에서 응답의 최대값은 25.26, 최소값은 11.77로 최대값은 최소값의 $2.14(=25.26/11.77)$ 배가 된다. 이처럼 바닥의 진동수가 변함에 따라서 일반 TMD는 3배의 성능편차를 보였고 ATMD는 2.14배의 성능편차를 보였다. 따라서 ATMD는 STMD에 비해 $1.42(=3.04/2.14)$ 배의 강건성을 갖는다.

6. 비대칭 동조질량감쇠기의 적용 및 검증

조화가진에 대해 최적화된 ATMD가 조화가중뿐만 아니라 보행하중에 대해서도 만족스러운 제어성능을 발휘하는지를 확인하기 위하여 바닥을 구조해석 프로그램으로 모델링한 후, ATMD가 설치된 바닥을 시간-이력 해석하여 빈 바닥과 일반 TMD가 설치된 바닥의 응답과 비교하였다. 구조해석 프로그램으로는 ETABS 9.7.2^[15]를 활용하였다.

6.1 ETABS를 활용한 바닥 모델링

본 연구의 대상 바닥은 철골보와 콘크리트 슬라브로 구성되어 있으며 대상 바닥의 주변은 철근콘크리트 바닥이다. 대상 바닥의 크기는 대략 12.8m×3.5m이지만 주변 바닥과의 연속성을 고려하여 실제 바닥보다 넓은 범위의 바닥을 함께 모델링하였다. 또한, 기둥이 바닥의 수직 진동주는 영향을 고려하기 위해 총 세 개의 층을 모델링하였다. Fig. 16은 ETABS를 이용하여 실제 바닥을 모델링한 모습이며 점선으로 둘러싸인 부분이 실제 실험대상이 되었던 바닥이다. 이렇게 바닥을 모델링한 후, 외력과 자중을 조절하여 바닥의 진동수를 빈 바닥의 진동수인 6.638Hz와 바닥진동수의 하한계 5.501Hz, 상한계인 7.451Hz로 각각 조정하였다.

보행하중의 함수는 2.1절에서 하중함수 식 (2)를 이용하였으며 보행하중의 진동수는 실제 바닥에 가장 불리한 조건이 되도록 설정하였다. 보행진동수의 배수가 바닥의 진동수와 일치하게 되면 공진이 발생하므로 6.638Hz 바닥은 2.2Hz (6.638Hz/3=2.2Hz), 5.501Hz 바닥은 1.83Hz(5.501Hz/3=1.83 Hz), 7.451Hz 바닥은 2.48Hz (7.451Hz/3=2.48Hz)를 이용하여 가진하였다. 보통체중(76kgf=746N)

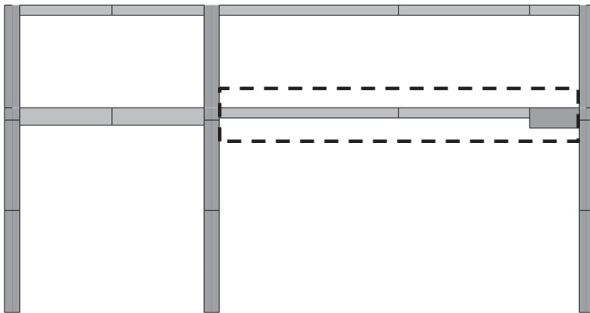


Fig. 14. Floor modeling

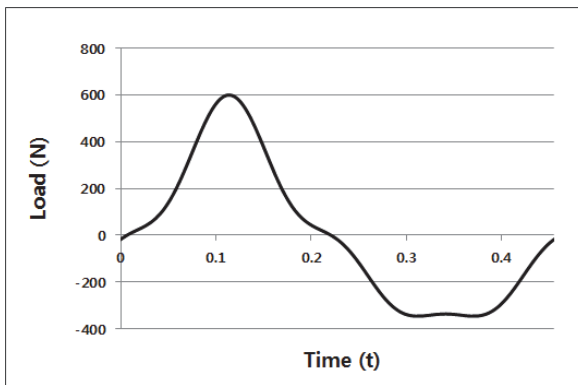


Fig. 15. One pace of load function due to walking

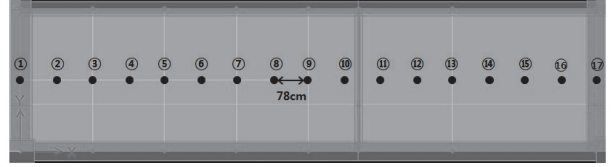


Fig. 16. Excitation points by walking load

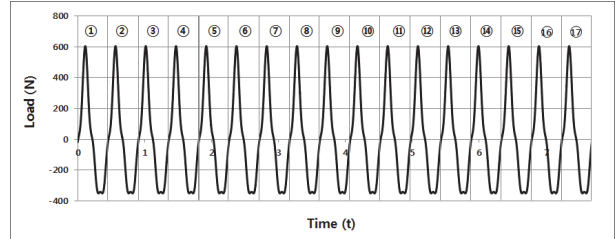


Fig. 17. Load function for continuous walking excitation

의 사람이 2.2Hz로 보행할 때의 하중함수는 다음과 같다 (Fig. 15).

$$F(t) = 746 \times [0.545\sin(4.4\pi t) - 0.1002\cos(8.8\pi t) - 0.0826\sin(13.2\pi t) + 0.0756\cos(17.6\pi t)] \quad (11)$$

한 걸음에 해당하는 보행하중을 일정한 간격을 두고 순차적으로 바닥에 가진하였다. 사람의 일반적인 보폭과 바닥의 크기를 고려하여 78cm 간격으로 보행하중을 입력하였다. 바닥의 가진점은 총 17개로 Fig. 16에 표시하였다.

일반TMD와 ATMD는 ETABS의 Link 기능을 이용하여 모델링하였으며 일반TMD와 ATMD를 구성하는 변수는 4.2절과 5.2절에서 구한 최적화 값을 대입하였다. 바닥의 무게는 대략 8.3tonf므로 추정되었으므로 각각의 TMD 질량은 바닥질량의 1%인 83kg로 두었다.

6.2 시간이력 해석결과

바닥의 진동수가 6.638Hz(빈 바닥), 5.501Hz(하한계), 7.451Hz(상한계)인 바닥에 대하여, 각각의 바닥에는 TMD가 설치되지 않은 경우와 일반TMD가 설치된 경우, ATMD가 설치된 경우에 대한 시간이력 해석을 수행하였다. TMD의 위치는 바닥의 모드형상을 고려하여, 바닥의 진동이 가장 크게 발생할 것으로 예상되는 Fig. 16의 ⑨번 점에 설치하였으며, ⑦번 점에서의 가속도 응답을 바탕으로 최대 가속도를 ISO 2631-2기준에 적용하여 Fig. 18에 도시하였다.

TMD가 설치되지 않은 6.638Hz 바닥의 최대가속도는

ISO기준의 내부 보행교 만족기준 이상의 값이 나왔지만, 일반TMD와 ATMD를 설치한 6.638Hz 바닥의 경우에는 이 기준을 만족한다. 이러한 결과는 5.2.3절에서 최적화한 ATMD는 6.638Hz 바닥에서 일반TMD와 거의 동일한 진동 제어성능을 보인 것과 매우 비슷한 경향성을 보인다. 하지만 고유진동수가 변동되어 5.501Hz와 7.451Hz인 바닥의 시간이력해석 결과에서는 ATMD의 뛰어난 강건성을 확인할 수 있다. ATMD가 설치된 경우에는 모두 바닥진동을 매우 효율적으로 제어하고 있다. 하지만 일반TMD는 동조이탈현상으로 인하여 바닥진동 제어성능이 떨어지는 것을 확인할 수 있으며, STMD가 설치된 5.501Hz인 바닥은 내부 보행교 기준치 이상의 최대가속도가 발생하였다.

Fig. 19는 TMD가 설치되지 않은 바닥의 최대가속도에

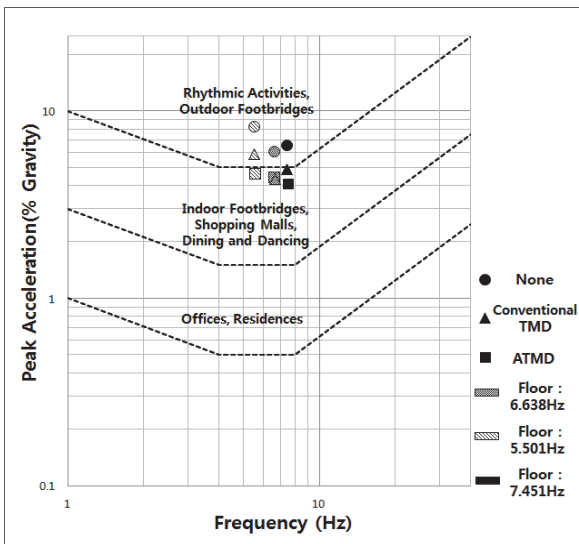


Fig. 18. Predicted Peak human comfort for vibrations due to human activities (ISO 2631-2)

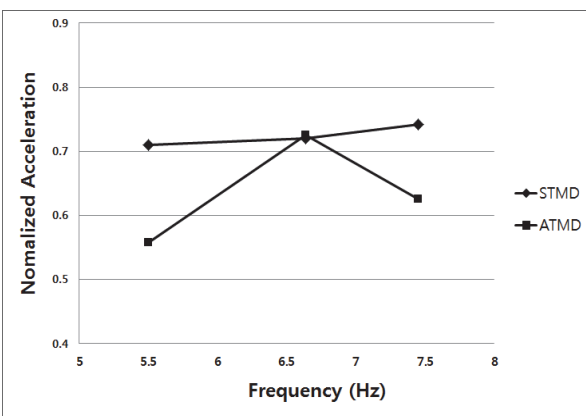
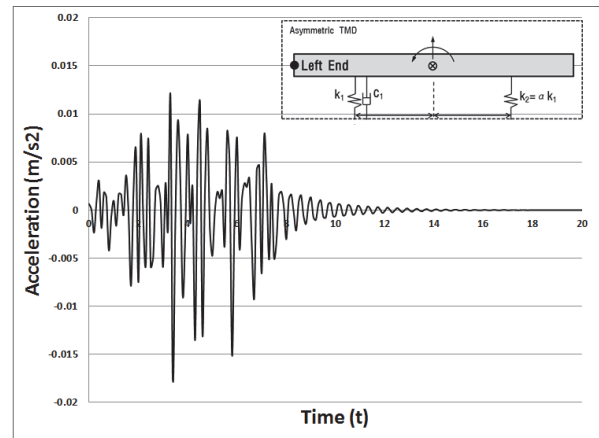


Fig. 19. Maximum acceleration ratio

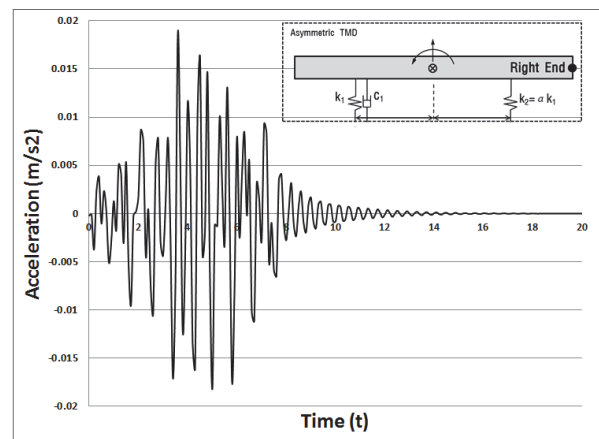
대하여 일반 TMD와 ATMD가 설치된 바닥의 최대가속도 비를 보여준다. 예측한 바닥의 진동수가 TMD의 진동수와 일치할 경우에 ATMD는 일반TMD와 거의 같은 진동제어성능을 보이고 바닥의 진동수(5.501Hz)가 예측한 진동수(6.638Hz)에서 벗어나게 되면 ATMD는 일반TMD에 비해 1.3배의 매우 뛰어난 진동제어성능을 발휘하게 된다. 따라서 보행하중으로 가진되는 경우에도 ATMD는 바닥진동수 변화에 강건하게 바닥진동을 제어한다.

5.1.1절에서 ATMD는 병진운동뿐만 아니라 회전운동을 하면서 바닥의 진동에너지를 흡수할 수 있기 때문에 보다 뛰어난 진동제어성능을 갖는 것을 ATMD의 장점으로 소개하였다. ATMD가 실제로 회전운동을 하는지 확인하기 위하여 ATMD 양 끝의 가속도를 비교해 보았다.

Fig. 20에서 알 수 있듯이, ATMD 왼쪽 끝과 오른쪽 끝의 가속도는 서로 차이를 보이므로 ATMD에서는 실제로 병



(a) Left End



(b) Right end

Fig. 20. Acceleration at ends

진운동과 회전운동이 동시에 발생함을 알 수 있다. 또한, ATMD의 오른쪽 끝은 왼쪽 끝보다 강성이 작고 감쇠가 없기 때문에, ATMD의 오른쪽 끝이 왼쪽 끝에 비하여 가속도가 크게 발생하는 것은 타당하다. 이렇게 병진운동과 회전운동이 동시에 발생하기 때문에 ATMD는 기존 TMD와 같은 질량과 강성, 감쇠비를 가짐에도 불구하고 월등한 진동 제어성능을 발휘하게 된다.

본 연구에서 제안한 ATMD는 조화하중으로 가진되는 바닥진동을 중심으로 제안되었다. 그런데 본 절에서 ATMD는 조화하중뿐만 아니라 보행하중에서도 효과적으로 진동제어를 한다는 결과를 통해 바닥진동 이외에 동적 거동을 제어하는 구조물(가령, 풍하중 제어)에도 ATMD를 적용할 수 있는 일반성을 가지고 있을 것으로 예상되며, 이에 대한 추가연구를 현재 진행 중이다.

7. 결론

앞선 논의를 통해 바닥의 진동제어를 위한 TMD 설계 시에 바닥진동수의 변화를 고려하여야 하는 이유와 실험을 통한 바닥진동수 변화를 확인하였다. 또한, 기존의 일반TMD의 한계를 분석한 후, 일반TMD의 단점을 극복할 수 있는 새로운 종류의 TMD인 ATMD를 제안하고 그에 맞는 최적화 방법을 제시하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 바닥하중의 불확실성으로 인하여 바닥 진동수의 정확한 예측은 불가능하며, 실험을 통하여 실제 바닥의 진동수변화를 확인하였다. 빈 바닥의 진동수가 6.638Hz인 반면, 사람이 재하 된 후에는 5.501Hz에서 7.451Hz까지 바닥의 진동수가 변화하였다.
- (2) 단자유도 바닥시스템에 설치된 STMD를 설계 및 최적화한 후에 실험을 통해 측정된 바닥의 진동수를 대입하였다. 이때, 바닥의 진동수가 바뀌면 STMD는 효과적으로 바닥진동을 제어할 수 없게 되고, 이러한 동조 이탈현상은 STMD의 한계로 작용한다. 바닥진동수에 따라서 STMD의 바닥진동 제어성능이 최대 3.5배 감소하는 것을 확인하였다.
- (3) STMD의 단점을 보완하기 위하여 다양한 진동수의 범위에 대해 적용할 수 있는 ATMD를 제안하였다. ATMD의 질량은 하나이지만 두 개의 강성이 포함되며 강성과 감쇠를 비대칭하게 위치시킨다. ATMD는 병

진운동뿐만 아니라 회전운동을 통해서 바닥의 진동에너지를 흡수할 수 있기 때문에 보다 뛰어난 진동 제어능력을 보일 것으로 판단된다.

- (4) 그래프를 이용하여 ATMD를 최적화하는 Graphic Method를 제안하였다. Graphic Method를 이용하여 최적화한 ATMD는 STMD에 비해 28%이상의 진동제어성능을 확보하였으며, 외부의 환경 변화에 대한 성능의 편차는 1.42배 개선되었다.
- (5) 최적화한 ATMD가 조화하중뿐만 아니라 보행하중을 효과적으로 제어하는 지를 확인하기 위하여 실제 바닥을 구조해석프로그램으로 모델링하여 ATMD를 적용하였다. 기본 바닥진동수에서 ATMD는 일반TMD와 비슷한 진동제어성능을 보이며 바닥의 진동수가 바뀌게 되면 일반TMD에 비해 매우 뛰어난 진동제어성능을 발휘한다. 즉, 바닥이 보행하중으로 가진되는 경우에도 ATMD는 바닥진동수 변화에 보다 강건한 진동제어 성능을 발휘한다.
- (6) 조화하중에 대하여 설계된 ATMD는 조화하중뿐만 아니라 보행하중에서도 효과적으로 진동제어를 한다는 결과를 통해 바닥진동 이외에 동적 거동을 제어하는 구조물(가령, 풍하중 제어)에도 ATMD를 적용할 수 있는 일반성을 가지고 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 포스코의 전문교수 연구과제 및 2012 포스코 강구조 학위논문 지원사업에 의해 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌(References)

- [1] Frahm, H. (1911) U.S. Patent No. 989,958.
- [2] Warburton, G.B. (1982) Optimum Absorber Parameters for Various Combinations of Response and Excitation Parameters, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, John Wiley & Sons, Vol.10, No.3, pp.381-401.
- [3] 김기두, 황윤국, 변윤주, 장동일(1997) 난류하에서의 TMD에 의한 현수교 주탑의 진동제어, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제9권, 제2호, pp.181-191.
- Kim, K.D., Hwang, Y.K., Byun, Y.J., and Chang, D.I. (1997) Vibration Control for Tower of Suspension Bridge

- Under Turbulence Using TMD, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.9, No.2, pp.181-191 (in Korean).
- [4] 김주명, 이규원(2004) 동조질량감쇠기를 이용한 해양구조물의 진동제어, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제16권, 제1호, pp.73-79.
Kim, J.M., and Lee, G.W. (2004) Vibration Control of Off-shore Platform Using Tuned Mass Damper, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.16, No. 1, pp.73-79 (in Korean).
- [5] He, M., Ma, R., and Lin, Z. (2007) Design of Structural Vibration Control of a Tall Steel TV Tower Under Wind Load, *International Journal of Steel Structures*, KSSC, Vol.7, No.1, pp.85-92.
- [6] Zuo, L., and Nayfeh, S.A. (2004) Minimax Optimization of Multi-Degree-of-Freedom Tuned-Mass Damper, *Journal of Sound and Vibration*, Elsevier, Vol.272, pp.893-908.
- [7] Li, C., and Qu, W. (2006) Optimum Properties of Multiple Tuned Mass Dampers for Reduction of Translational and Torsional Response of Structures Subject to Ground Acceleration, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.28, No.4, pp.472-494.
- [8] Lenzen, K.H. (1966) Vibration of Steel Joist-Concrete Slab Floors, *Engineering Journal*, American Institute of Steel Construction, Vol.3, No.3, pp.133-136.
- [9] Setareh, M., Ritchey, J.K., Baxter, A.J., and Murray, T.M. (2006) Pendulum Tuned Mass Dampers for Floor Vibration Control, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, American Society of Civil Engineers, Vol.20, No. 1, pp.64-73.
- [10] Zuo, L., and Nayfeh, S.A. (2006) The Two-Degree-of-Freedom Tuned-Mass Damper for Suppression of Single-Mode Vibration Under Random and Harmonic Excitation, *Journal of Vibration and Acoustics*, American Society of Mechanical Engineers, Vol.128, No.1, pp.56-65.
- [11] Smith A.L., Hicks, S.J., and Devine, P.J. (2007) *Design of Floors for Vibration: A New Approach*, Steel Construction Institute, UK.
- [12] 대한건축학회(2009) 건축구조기준 (KBC 2009) 및 해설, 기문당.
Architectural Institute of Korea (2009) *Korea Building Code (KBC 2009) and Commentary*, Kimoonang, Korea (in Korean).
- [13] Ellis, B.R., and Ji, T. (1997) Human-Structure Interaction in Vertical Vibrations, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, ICE Publishing, Vol.122, No.1, pp.1-9.
- [14] Murray, T.M., Allen, D.E., and Unger, E.E. (1997) *Floor Vibrations Due to Human Activity (Steel Design Guide II)*, American Institute of Steel Construction, USA.
- [15] Computers and Structures, Inc. (2004) *CSI Analysis Reference Manual for SAP2000[®], ETABS[®], and SAFE[™]*, CSI, USA.

요 약 : 최근 강재의 고강도화를 통한 부재 단면 사이즈의 절감은 종종 강성의 부족으로 이어져 과도한 처짐이나 진동문제를 야기한다. 따라서 적절한 설계나 예방을 통해 구조물의 바닥진동에 대한 보완이 필수적이다. 이러한 바닥진동 문제를 해결하기 위해 동조질량감쇠기가 종종 쓰이고 있다. 동조질량감쇠기는 바닥의 진동수에 대해 정확히 설계되었을 때에는 효율적으로 바닥진동을 제어할 수 있다. 하지만 바닥 질량의 크기와 외부하중의 특성에 따라 바닥의 진동수가 수시로 변하는 경우에는 그 효율이 급격히 낮아질 가능성이 있다. 이러한 현상을 동조이탈이라고 한다. 본 연구는 실제 바닥에 가해지는 하중의 변화에 따라 바닥의 진동수가 달라지는 양상을 실험을 통해 고찰한다. 실험 바닥에 기존의 단일동조질량감쇠기를 적용하여 단일동조질량 감쇠기의 한계인 동조이탈현상을 확인한다. 또한, 바닥진동제어의 강건성을 확보하기 위해 진동수의 불확실성을 반영한 비대칭 동조질량감쇠기의 활용을 제안한다. TMD의 강건성이란 진동수가 변화하는 상황에서 바닥진동제어 성능이 얼마나 지속되느냐를 뜻한다. 제안된 비대칭 TMD는 두 개의 비대칭 강성을 가지고 있기 때문에 병진운동과 회전운동을 하면서 진동에너지를 소산한다. 제안된 비대칭TMD의 최적화 결과, 비대칭TMD는 기존 STMD에 비해 28%이상의 진동제어성능을 확보하였으며, 외부의 환경 변화에 대한 강건성은 약 1.4배 개선되었다.

핵심용어 : 바닥진동, 단일 동조질량감쇠기, 동조이탈, 진동수의 불확실성, 강건성, 비대칭 동조질량감쇠기