

# 바닥판 구조물의 진동제어를 위한 준능동 TMD의 적용

## Application of Semi-active TMD for Vibration Control of Floor Slab

김기철\* · 강주원\*\*  
Kim, Gee-Cheol · Kang, Joo-Won

---

### Abstract

A conventional passive TMD is only effective when it is tuned properly. In many practical applications, inevitable off-tuning of a TMD occurs because the mass in a building floor could change by moving furnishings, people gathering, etc. When TMDs are oftuned, TMDs their effectiveness is sharply reduced. This paper discusses the application of MR-TMD, semi-active damper, for the reduction of floor vibrations due to machine and human movements. Here, the groundhook and skyhook algorithm are applied to a single degree of freedom system representative of building floors. And displacement and velocity base control method are applied to reduce floor vibration. The performance of the STMD is compared to that of the equivalent passive TMD. Comparison of the results demonstrates the efficiency and robustness of STMD with respect to equivalent TMD.

**Keywords** : *Passive TMD, Tuning, Floor vibration, MR damper, Semi-active damper*

---

### 1. 서론

최근 건설기술의 발전과 자재의 발달로 인하여 경간이 길어지고 강성이 유연화 되어 처짐과 진동에 같은 사용성에 있어서 많은 문제점을 가지고 있다. 대형 집회공간, 쇼룸, 사무실 등과 같은 건축물에서는 사람의 움직임 또는 기계작동에 의하여 과도한 진동이 발생할 수 있으며 이러한 진동은 사용자에게 불쾌감을 유발시키거나 부속물의 파손시키는 것은 물론 진동이 심하면 구조적 손상을 초래할 수 있다. 과도한 진동이 발생하는 바닥판 구조물은 구조부재의 강도를 증가시키거나 칸막이벽을 설치하여 진동을 저감시킬 수 있으나 이러한 방법은 비용이 많이 들며 이미 건축된 구조물에 있어서는 보강이 쉽지 않다. 최근에 수동 TMD(passive tuned mass damper, passive TMD)를 적용한 진동제어 사례가 많아지고 있으나 수동 TMD는 목표 고유진동수 대역 부근에서만 제어효과가 있기 때문에 구조물의 그 적용성에 있어서 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는 MR감쇠기가 장착된 준능동 TMD(semi-active TMD, STMD) 시스템을 바닥판 구조물의 진동제어에 적용하고자 한다. 준능동 TMD는 구조물의 응답에 따라서 실시간으로 감쇠력을 변화시킬 수 있으므로 수동 TMD보다 효과적인 진동제어 성능을 나타낼 수 있을 것으로 기대되는 새로운 형태의 진동제어장치이다. Hrovat, Agrawal과 Yang, Abe와 Igusa, Hidaka 등은 STMD의 제어성

---

\* 정회원 · 서일대학교 건축과 교수 E-mail: beat67@seoil.ac.kr

\*\* 정회원 · 영남대학교 건축공학과 부교수 E-mail: kangj@yumail.ac.kr

능에 대한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 바닥판 구조물의 진동제어에 있어서 MR감쇠기와 TMD가 결합된 준능동 TMD의 제어기법에 따른 제어성능을 비교분석하여 효율적인 제어기법을 알아보고자 한다.

## 2. 준능동 TMD의 제어기법

### 2.1 준능동 TMD

가진 하중의 진동수가 바닥판 구조물의 고유진동수와 일치하거나 근접한 경우에 바닥판 구조물에 과다한 진동이 유발되므로 진동을 제어하기 위하여 바닥판 구조물에 동조되도록 수동 TMD를 설치하게 된다. 바닥판 구조물의 진동제어를 위하여 수동 TMD가 바닥판 구조물에 동조하도록 TMD의 질량, 강성, 감쇠를 최적으로 조율하여 설치하며 준능동 TMD의 수치해석 모델은 그림 1과 같이 수동 TMD의 감쇠기( $C_T$ )를 감쇠 조절이 가능한 MR 감쇠기( $C_{con}$ )로 대체하여 모형화 할 수 있다.

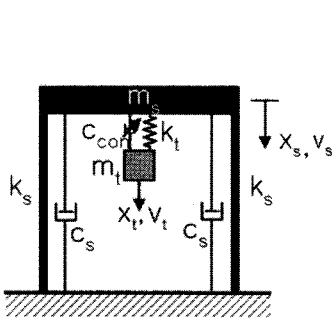


그림 1. Semiactive TMD

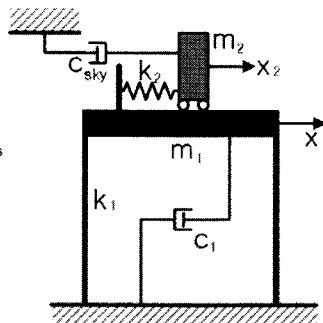


그림 2. Skyhook model

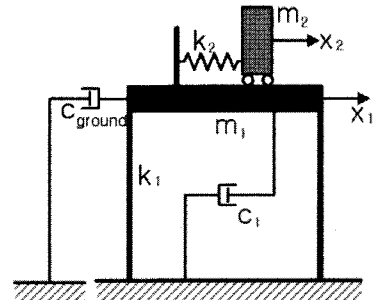


그림 3. Groundhook model

### 2.2 Skyhook 모델과 Groundhook 모델

준능동 TMD의 MR 감쇠기를 그림 2와 같이 Skyhook 모델과 그림 3과 같이 Groundhook 모델로 이상화 시킬 수 있다. Skyhook 모델과 Groundhook 모델의 차이는 감쇠기를 이상화하여 'Sky'에 연결하는 것과 'Ground'에 연결하는 것으로 볼 수 있다. Skyhook 모델은 자동차의 운전대와 같은 부구조물의 진동을 제어하기 위한 모델로 승차감을 향상시키기 위한 것이다. Groundhook 모델은 자동차의 안정성을 확보하기 위한 것으로 자동차의 차체와 같은 주구조물의 진동을 저감하기 위한 것이다. 구조물의 진동제어는 자동차의 차체와 같이 주구조물의 진동을 제어하는 것으로 Groundhook 제어기법을 적용하는 것이 적절할 것으로 생각할 수 있으나 구조적인 측면이나 계획적인 측면에서 부구조물인 TMD의 변위가 제한적일 수 있으므로 Skyhook 모델을 적용한 진동응답을 분석할 필요가 있다.

### 2.3 변위기반 및 속도기반 제어기법

준능동 제어장치가 우수한 제어성능을 발휘하기 위해서는 구조물의 상황에 따라서 최적의 제어 알고리즘을 선택하여 적용하여야 한다. 본 연구에서는 감쇠력을 구조물의 응답에 따라 실시간으로 조절하기 위한 제어방법으로 적용이 쉬우며 비교적 우수한 제어성능을 가지고 있는 변위기반과

속도기반 제어알고리즘을 적용하고자 한다. 변위기반 제어알고리즘은 바닥판 구조물의 변위와 바닥판 구조물과 TMD의 상대속도의 정의에 따라서 제어력이 결정되며 속도기반 제어알고리즘은 바닥판 구조물의 속도와 바닥판 구조물과 TMD의 상대속도의 정의에 따라서 제어력이 결정되는 것이다.

Skyhook 모델에서 감쇠력을 결정하기 위한 조건으로 변위기반 제어기법에서는 식 (1)를 적용하며 속도기반 제어기법에서는 식 (2)를 각각 적용한다. 그리고 Groundhook 모델에서 감쇠력을 결정하기 위한 조건으로 변위기반 제어기법에서는 식 (3)을 적용하며 속도기반 제어기법에서는 식 (4)를 각각 적용한다.

$$\begin{aligned}
 x_t(v_t - v_s) \geq 0 \rightarrow c_{controllable} &= c_{max} & (1-1) & & x_t(v_t - v_s) < 0 \rightarrow c_{controllable} &= c_{min} & (1-2) \\
 v_t(v_t - v_s) \geq 0 \rightarrow c_{controllable} &= c_{max} & (2-1) & & v_t(v_t - v_s) < 0 \rightarrow c_{controllable} &= c_{min} & (2-2) \\
 x_s(v_s - v_t) \geq 0 \rightarrow c_{controllable} &= c_{max} & (3-1) & & x_s(v_s - v_t) < 0 \rightarrow c_{controllable} &= c_{min} & (3-2) \\
 v_s(v_s - v_t) \geq 0 \rightarrow c_{controllable} &= c_{max} & (4-1) & & v_s(v_s - v_t) < 0 \rightarrow c_{controllable} &= c_{min} & (4-2)
 \end{aligned}$$

### 3. 준능동 TMD를 이용한 바닥판 구조물의 진동제어

바닥판 구조물의 진동제어를 위한 준능동 TMD의 제어성능을 검토하기 위하여 바닥판 구조물을 단자유도 구조물로 이상화시켜 진동해석을 수행하였다. 예제 바닥판 구조물의 강성은  $1.70547E+6$ (kgf/m)이며 질량은  $1200$ (kgf/g)이다. 예제 바닥판 구조물의 감쇠비는  $0.002$ 를 적용하였다. 바닥판 구조물의 진동응답을 최소화하기 위한 TMD의 질량비( $\mu$ )는  $0.01$ , 진동수비( $f_{opt}$ )는  $0.9819$ , 감쇠비( $\xi_{opt}$ )는  $0.04981$ 로 적용하였다.<sup>(3)</sup> 예제 바닥판 구조물에 가진된 동적하중은  $100$ kgf로 하중진동수는 예제 바닥판 구조물의 고유진동수와 동일하게 하여 공진이 유발되도록 하였다.

#### 3.1 제어 기법에 따른 진동응답

준능동 TMD의 제어기법에 따른 제어성능을 알아보하고자 변위응답과 속도응답을 각각 비교분석하였다. 그림 4는 Skyhook 모델에 대한 바닥판 구조물의 변위응답으로 속도기반 제어기법보다 변위기반 제어기법의 제어성능이 우수한 것을 볼 수 있다. 준능동 감쇠기를 Skyhook 모델로 모형화한 경우에 속도기반 제어기법 보다 오히려 수동 제어기법이 우수한 제어성능을 보이고 있다. 이는 Skyhook 모델이 주구조물보다는 부구조물의 제어에 보다 효과적이기 때문이다. 그림 5는 Skyhook 모델에 대한 바닥판 구조물의 속도응답으로 그림 4와 마찬가지로 변위기반 제어기법이 가장 우수한 제어성능을 보이고 있다. 그림 6은 Groundhook 모델에 대한 바닥판 구조물의 변위응답으로 변위기반 제어기법의 제어성능이 가장 우수한 것을 볼 수 있다. 다음으로 속도기반 제어기법이 수동제어기법보다 우수한 제어성능을 보여주고 있다. 그림 7은 Groundhook 모델에 대한 바닥판 구조물의 속도응답을 나타낸 것으로 그림 6과 마찬가지로 변위기반 제어기법이 가장 우수한 제어성능을 보이고 있다. 바닥판 구조물의 진동제어에 있어서 최적의 제어알고리즘을 적용하여 우수한 제어성능을 확보해야 하므로 MR감쇠기의 감쇠력을 실시간으로 조절할 수 있는 변위기반 제어알고리즘과 속도기반 제어알고리즘에 대한 제어성능을 비교분석하여야 한다. Skyhook 모델과 Groundhook 모델 모두에서 변위기반 제어알고리즘이 속도기반 제어알고리즘보다 우수한 제어성능을 보이고 있다.

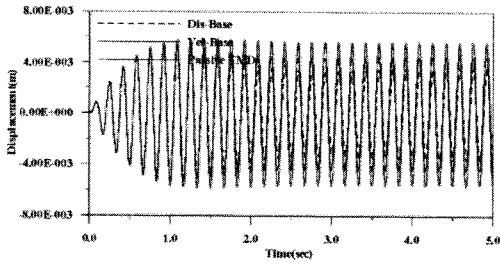


그림 4. 바닥판 구조물의 변위응답(Skyhook)

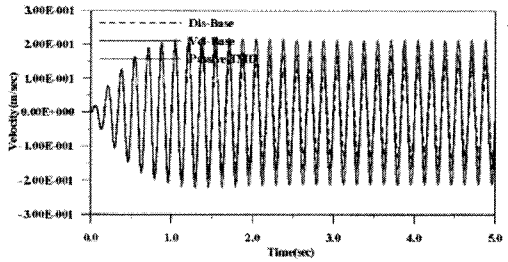


그림 5. 바닥판 구조물의 속도응답(Skyhook)

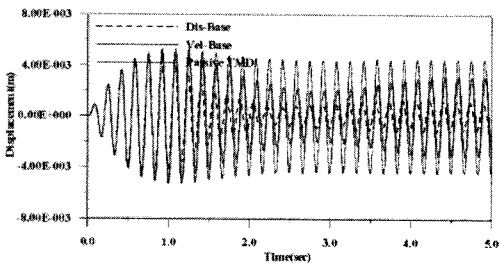


그림 6. 바닥판 구조물의 변위응답(Groundhook)

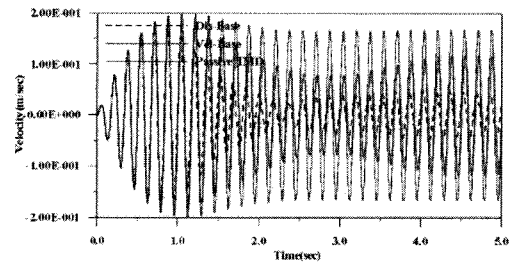


그림 7. 바닥판 구조물의 속도응답(Groundhook)

### 3.2 감쇠기 모델에 따른 바닥판 구조물의 진동응답

준능동 TMD의 감쇠기를 Skyhook 모델과 Groundhook 모델로 각각 모형화하여 감쇠기 모델에 따른 주구조물인 바닥판 구조물과 부구조물인 TMD의 진동응답을 비교하고자 한다. 앞 절에서 얻은 결과를 바탕으로 변위기반 제어알고리즘이 속도기반 제어알고리즘보다 우수한 제어성능을 보이고 있으므로 본 절에서는 변위기반 제어알고리즘을 적용하고자 한다.

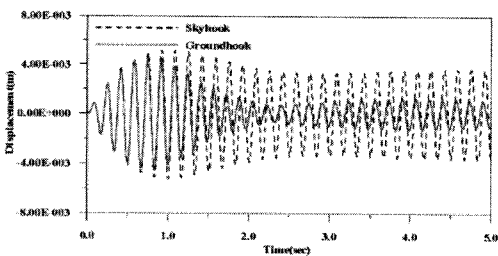


그림 8. 바닥판 구조물의 변위응답

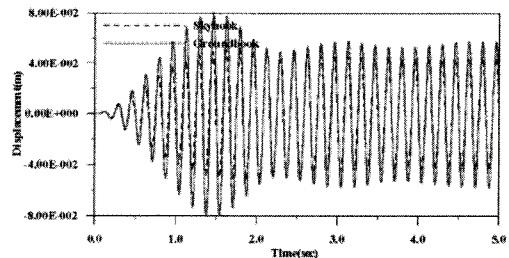


그림 9. TMD의 변위응답

그림 8은 준능동 TMD의 감쇠기를 Skyhook 모델과 Groundhook 모델로 각각 모형화하여 바닥판 구조물의 변위응답을 나타낸 것으로 Groundhook 모델로 모형화한 것이 Skyhook 모델로 모형화한 것보다 1/3 정도 작을 것을 볼 수 있다. 따라서 바닥판 구조물의 진동제어 있어서 준능동 TMD의 감쇠기를 Skyhook 모델로 모형화한 것보다는 Groundhook 모델로 모형화한 것이 우수한 제어성능을 보이고 있다. 그림 9는 부구조물인 TMD의 변위응답을 나타낸 것으로 Groundhook 모

모델보다 Skyhook 모델의 제어성능이 약간 우수한 것을 볼 수 있다. 따라서 바닥판 구조물의 진동 제어에 있어서 TMD의 변위가 제한적이지 않다면 Groundhook 모델의 변위기반 제어기법을 적용하는 것이 보다 효과적이다. 그러나 경우에 따라서 TMD의 변위가 제한적이거나 TMD의 진동 응답이 보다 민감하다면 Groundhook 모델보다는 Skyhook 모델로 모형화하는 것이 보다 좋은 결과를 나타낼 것이다.

#### 4. Off-tuning에 대한 제어 성능평가

수동 TMD는 구조물의 동적거동에 가장 큰 영향을 끼치는 구조물의 고유진동수에 대하여 설계하여 진동을 제어하게 된다. 그러나 TMD 설치되고 시간이 경과함에 따라 설계시 고려하였던 바닥판 구조물 또는 TMD의 질량과 강성이 변할 수 있어 TMD가 바닥판 구조물에 대하여 제대로 동조하지 못하게 된다. 이를 off-tuning이라하며 이러한 현상으로 인하여 처음 설계된 TMD가 제대로 성능을 발휘하지 못하게 된다. 바닥판 구조물의 질량변화에 따른 수동 TMD와 준능동 TMD의 제어성능을 비교분석하기 위하여 바닥판 구조물의 질량을 -20%에서 +20%까지 변화시켜 진동 해석을 수행하였다. 이때 수동 TMD와 준능동 TMD의 동적특성은 일정하게 유지하였으며 동적하중의 주기는 구조물의 진동주기와 같게 하여 진동응답이 크게 나오도록 하였다.

그림 10은 바닥판 구조물의 질량변화에 따른 RMS 변위응답과 RMS속도응답을 나타낸 것이다. 주구조물의 질량의 변화에 따른 준능동 TMD와 수동 TMD의 제어성능을 살펴보면, 준능동 TMD에 의한 진동응답이 TMD에 의한 진동응답보다 30%정도 더 작은 것을 볼 수 있다. 즉, 준능동 TMD의 제어성능이 TMD의 제어성능보다 견실성이 좋은 것을 확인 할 수 있는 것이다. 그리고 준능동 TMD와 수동 TMD의 제어성능은 바닥판 구조물의 질량이 감소할 때보다 증가할 때 성능이 더 좋은 것을 볼 수 있다. 따라서 진동제어장치는 주구조물 질량의 증가보다 감소로 인한 Off-tuning에 대하여 잘 적용하지 못하므로 이에 대한 대체가 필요할 것이다. 바닥판 구조물의 질량의 변화에 따른 바닥판 구조물의 RMS 변위응답, RMS 속도응답 그리고 RMS 가속도응답이 모두 비슷한 경향을 보이고 있다.

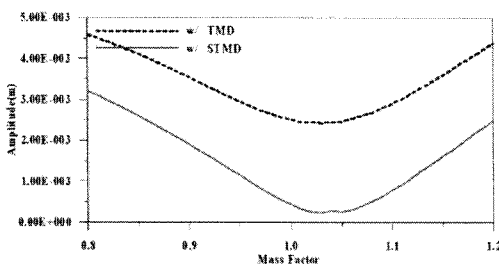


그림 10 (a) 바닥판 구조물의 질량변화에 따른 RMS 변위응답

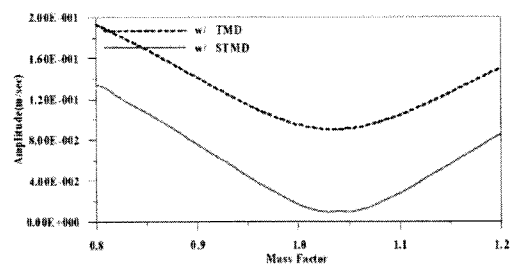


그림 10 (b) 바닥판 구조물의 질량변화에 따른 RMS 속도응답

#### 5. 결 론

본 논문에서는 바닥판 구조물의 진동을 제어하기 위하여 준능동 TMD의 감쇠기를 각각 Skyhook 모델과 Groundhook 모델로 모형화하고 변위기반과 속도기반 제어알고리즘 각각 적용하

여 바닥판 구조물의 진동응답을 비교분석하여 제어기법에 따른 제어성능을 알아보고자 한다.

감쇠력을 실시간으로 조절하는 제어기법으로 변위기반 제어알고리즘이 속도기반 제어알고리즘보다 우수한 제어성능을 보이고 있다. 그리고 준능동 TMD의 감쇠기를 Groundhook 모델로 모형화한 경우에 주구조물인 바닥판 구조물의 진동제어에 있어서 보다 효과적이다. 그러나 경우에 따라서는 TMD의 변위가 제한적일 수 있으므로 상황에 따라서 준능동 TMD의 감쇠기를 Skyhook 모델로 모형화하여 진동을 제어할 필요가 있다. 그리고 주구조물의 질량변화에 따른 off-tuning 상태에서 준능동 TMD가 수동 TMD보다 제어성능의 견실성이 더욱 뛰어난 것을 확인할 수 있었다.

본 연구는 준능동 TMD에 대한 해석적 연구를 수행한 것으로 추후에 준능동 TMD에 대한 제어성능을 실험적으로 검증한다면 준능동 TMD를 바닥판 구조물의 진동에 대한 효과적인 제어장치로 활용할 수 있을 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 건설교통부 건설핵심기술 연구개발사업의 연구비지원(과제번호 06건설핵심B03)에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

- Housner, G.W., Bergman, L.A., Caughey, T.K., Chassiakos, A.G., Claus, R.O., Masri, S.F., Skelton, R.E, Soong, T.T., Spencer, B.H., Yao, T.P., "Structural control; Past, Present, and Future," *ASCE, Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 123, No. 9, 1997, pp. 897-971.
- Symans, M.D., Constantinou, M.C., "Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review," *Engineering Structures*, Vol. 21, 1999, pp. 469-487.
- Jansen, L.M., Dyke, S.J., "Semiactive Control Strategies for MR Dampers: Comparative Study," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 126, No. 8, 2000, pp. 795-803.
- Hrovat, D, Barak, P., Rabins, M., "Semi-active versus passive or active tuned mass damper for structural control," *ASCE, Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 190, No. 3, 1983, pp.691-705.
- Agrawal, A.K., Yang, J. N., "Semiactive control strategies for building subject to near-field earthquakes," *Proceedings of SPIE*, 2000, pp. 359-370.
- Abe, M., Igusa, T., "Semiactive Dynamic Vibration Absorbers for Controlling Transient Response," *Journal of Sound and Vibration*, 198(5), 1996, pp. 547-569.
- Hidaka, S., Ahn, Y.K., Morishita, S., "Adaptive Vibration Control by a Variable-Damping Dynamic Absorber Using ER Fluid," *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 121, 1999, pp. 373-378.
- Warburton, G.B., "Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters," *Earthquake Engrg. and Struct. Dyn.*, Vol. 10, 1982, pp. 381-401.
- Jeong-Hoi Koo, Using Magneto-Rheological Damper in Semicative Tuned Vibration Absorbers to Control Structural Vibrations, thesis presented to University of Blacksburg, Virginia, in partial fulfillment of the requirement for the degree of Doctor of Philosophy, 2003