

# 바닥판 구조물의 진동제어를 위한 준능동 TMD의 적용

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

김기철\*      곽철승\*\*  
Kim, Gee-Cheol      Kwak, ChulSeung

### 요약

바닥판 구조물의 진동제어를 위한 제어시스템으로 제어력의 조절에 따라서 수동, 능동, 준능동 제어 시스템이 구분할 수 있다. 본 논문에서는 MR감쇠기와 수동 TMD를 조합한 준능동 TMD(MR-TMD)의 제어기법에 따른 바닥판 구조물의 진동제어성을 알아보았다. MR-TMD의 감쇠기 모형화 방법에 따라서 Groundhook 모델과 Skyhook 모델이 있으며 추구조물인 바닥판 구조물의 진동제어에 있어서는 Skyhook 모델보다 Groundhook 모델보다 효과적인 것을 볼 수 있다. 그러나 TMD변위가 제한적인 경우에 MR-TMD의 감쇠기를 Skyhook 모델로 모형화하여 진동을 제어할 필요가 있다. 그리고 Hybrid 제어기법을 적용할 경우에 바닥판 구조물과 TMD를 동시에 최적으로 제어할 수 있으므로 우수한 제어성능을 보이고 있다.

### Abstract

Passive, active and semi-active control system are classified in floor vibration control system by providing control force. This paper discusses the application of a new class of semi-active TMD(MR-TMD), for the reduction of floor vibrations due to machine and human movements. This MR-TMD consists of passive TMD and MR damper. Here, displacement-based control methods are used to assess the performance of this STMD(MR-TMD). And, skyhook and the groundhook algorithm are applied to a single degree of freedom system representative of building floors. If the allowed operation space of tuned mass is limited in MR-TMD system, skyhook algorithm is more efficient than groundhook algorithm for floor vibration control. Hybrid control method demonstrates the efficiency of MR-TMD with respect to another methods.

키워드 : MR 감쇠기, 준능동 감쇠기, MR-TMD, 스카이훅, 그라운드훅, 하이브리드제어

Keywords : MR damper, Semi-active damper, MR-TMD, Skyhook, Groundhook, Hybrid Control

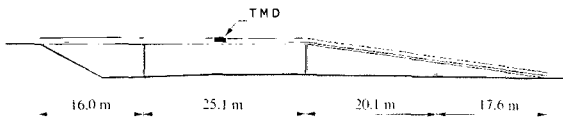
## 1. 서론

건설자재 및 설계기술의 발달로 인하여 구조물은 강도에 있어서 우수한 성능을 갖게 되어 바닥판 구조물의 경간이 길어지고 부재의 단면이 작아지고 있다. 이러한 바닥판은 강성이 작으므로 처짐과 진동이 과도하게 발생하여 사용성에 많은 문제점을 유발시킨다. 바닥판 구조물은 사람의 움직임 또는 기계 작동에 의하여 진동이 발생할 수 있으며 과도한 진동은 사용자에게 불쾌감을 유발시키거나 부착물의 파손시키는 것은 물론 심하면 구조적 손상을 초래할

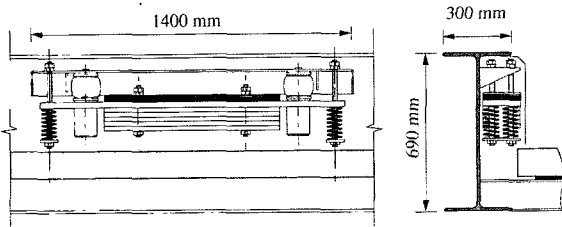
수 있다. 과도한 진동이 발생하는 바닥판 구조물은 구조부재의 강도와 강성을 증가시키거나 칸막이벽을 설치하여 진동을 저감시킬 수 있으나 이러한 방법은 비용이 많이 들며 이미 건축된 구조물에 있어서는 보강이 쉽지 않다. 따라서 최근에는 제작 및 관리가 비교적 손쉬운 수동 TMD(passive TMD)를 설치하여 바닥판 구조물의 진동을 제어하는 사례가 증가하고 있다. 수동 TMD는 일정 목표 고유진동수 대역 부근에서만 제어효과가 우수하기 때문에 적용이 제한적인 단점을 가지고 있다<sup>1,2)</sup>. 본 연구에서는 수동 제어 시스템의 신뢰성과 능동제어 시스템의 적용성에 대한 장점을 가지고 있는 준능동 시스템으로 수동 TMD와 MR감쇠기를 결합한 시스템(MR-TMD)을 바닥판 구조물의 진동제어에 적용하고자 한다. MR

\* 교신저자, 정회원 · 서일대학 건축과 조교수  
TEL : 490-7582 FAX : 490-7427  
E-mail : beat67@seoil.ac.kr

\*\* 정회원 · (주)아이스트, 본부장



(a) 수동 TMD를 설치한 보도육교



(b) 수동 TMD 상세

〈그림 1〉 보도육교의 수동 TMD 적용<sup>3)</sup>

감쇠기는 자기유변유체(magnetorheological fluid) 활용한 것이다. MR-TMD는 구조물의 응답에 따라서 실시간으로 감쇠력을 변화시킬 수 있으므로 수동 TMD보다 효과적인 진동제어 성능을 나타낼 수 있을 것으로 기대되는 새로운 형태의 진동제어장치이다.

본 연구에서는 바닥판 구조물의 진동제어에 있어서 수동 TMD에 MR감쇠기를 장착한 준능동 TMD(semi-active TMD, MR-TMD)의 진동제어 성능을 알아보고자 한다<sup>4-8)</sup>. 기계의 작동이나 사람의 움직임으로 야기되는 바닥판 구조물의 진동제어를 위하여 MR-TMD를 적용하고 준능동 TMD의 제어기법에 따른 제어성능을 비교분석하여 효율적인 제어기법을 알아보고자 한다.

## 2. MR-TMD의 해석모델

바닥판 구조물에 가해지는 하중의 진동수와 바닥판 구조물의 고유진동수와 일치하거나 근접한 경우에 바닥판 구조물의 진동을 제어하기 위하여 그림 1과 같이 수동 TMD를 설치하게 된다. 그림 1은 수동 TMD가 설치된 보도육교의 실례로 TMD가 구조물에 동조하도록 TMD의 질량, 강성, 감쇠를 최적으로 조절하여 설치한다. MR-TMD의 수치해석 모델에서는 수동 TMD의 감쇠기를 조절이 가능한 MR 감쇠기로 대체하여 감쇠력을 실시간으로 조절할 수 있다.

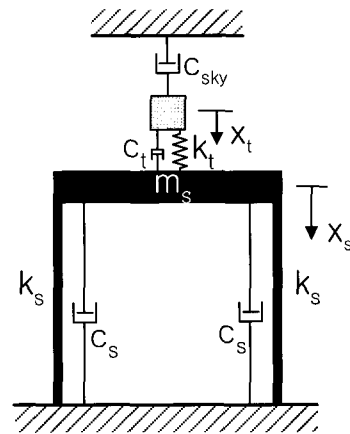
### 2.1 Skyhook 모델과 Groundhook 모델

MR-TMD의 MR감쇠기에 대한 모델로 <그림 2>와 같이 Skyhook 모델과 <그림 3>과 같이 Groundhook 모델이 개발되었다. Skyhook 모델과 Groundhook 모델의 차이는 감쇠기를 이상화하여 'Sky'에 연결하는 것과 'Ground'에 연결하는 것으로 볼 수 있다.

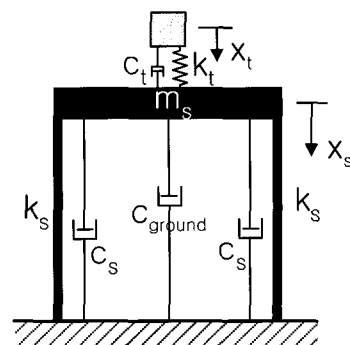
$$M\ddot{x}_s + C\dot{x}_s + Kx_s = E_w\ddot{x}_g + E_u F \quad (1)$$

여기서,  $\ddot{x}_s$ ,  $\dot{x}_s$ ,  $x_s$ 는 바닥판 구조물의 가속도, 속도, 변위이며  $M$ ,  $C$ ,  $K$ 는 바닥판 구조물의 질량, 감쇠, 강성행렬이다. 외력이 지진하중이 아닌 경우에 지반가속도  $\ddot{x}_g$ 를 일반적인 동적하중으로 바꾸어 넣는다.  $F$ 는 감쇠기가 발휘하는 제어력이며  $E_w$ 와  $E_u$ 는 하중과 제어력의 위치벡터이다.

Skyhook 모델은 자동차의 운전석과 같은 부구조물의 진동제어를 통하여 승차감을 향상시키기 위한



〈그림 2〉 Skyhook model



〈그림 3〉 Groundhook model

것이다. 그리고 Groundhook 모델은 자동차의 안정성을 확보하기 위한 것으로 자동차의 차체와 같은 주구조물의 진동제어 하기 위한 것이다. 구조물의 진동제어는 자동차의 차체와 같이 주구조물의 진동을 제어하는 것으로 Groundhook 제어기법을 적용하는 것이 적절할 것으로 생각할 수 있다. 그러나 구조적인 측면이나 계획적인 측면에서 부구조물인 TMD의 변위가 제한적일 수 있으므로 Skyhook 모델을 적용하는 진동응답을 분석할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 바닥판 구조물의 진동에 대한 두 가지 모델의 제어성능을 알아보려고 한다.

### 2.2 MR-TMD의 제어기법

준능동 제어장치가 우수한 제어성능을 발휘하기 위해서는 구조물의 상황에 따라서 최적의 제어알고리즘을 선택하여 적용하여야 한다. 감쇠력을 구조물의 응답에 따라 실시간으로 조절하기 위한 제어방법으로 적용이 쉬우며 비교적 우수한 제어성능을 가지고 있는 변위기반과 속도기반 제어알고리즘이 있다. 본 연구에서는 바닥판 구조물의 변위와 바닥판 구조물과 TMD의 상대속도의 정의에 따라서 제어력이 결정되는 변위기반 제어알고리즘을 적용하고자 한다.

Skyhook 모델에서 감쇠력을 결정하기 위한 조건으로 변위기반 제어기법에서는 식 (2-1)과 (2-2)를 적용하며

$$x_t(v_s - v_t) \leq 0 \rightarrow c_{controllable} = c_{max} \quad (2-1)$$

$$x_t(v_s - v_t) > 0 \rightarrow c_{controllable} = c_{min} \quad (2-2)$$

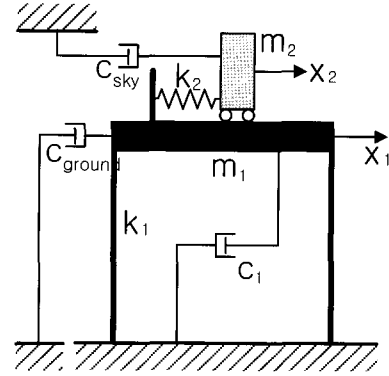
그리고 Groundhook 모델에서 감쇠력을 결정하기 위한 조건으로 변위기반 제어기법에서는 식 (3-1)과 (3-2)를 적용한다.

$$x_s(v_s - v_t) \geq 0 \rightarrow c_{controllable} = c_{max} \quad (3-1)$$

$$x_s(v_s - v_t) < 0 \rightarrow c_{controllable} = c_{min} \quad (3-2)$$

위 두 가지 제어 알고리즘은 평형위치에 대한 주구조물의 변위 또는 부구조물의 변위와 주구조물과

TMD의 상대속도의 관계를 이용하여 정의된다. 이때 주구조물과 부구조물의 상대속도가 음수이면 주구조물과 부구조물이 분리되는 방향으로 움직이는 것을 의미하며 감쇠기에는 인장력이 발생하게 되고 반대로 상대속도가 양수이면 감쇠기에는 압축력이 발생하게 된다<sup>9)</sup>.



<그림 4> Hybrid model

바닥판 구조물의 진동응답을 제어하고 동시에 TMD의 변위응답을 제어해야하는 경우와 같이 상황에 따라서 주구조물과 부구조물을 동시에 제어해야 하는 경우도 생길 수 있을 것이다. 이러한 경우에 <그림 4>와 같이 Skyhook 제어기법과 Groundhook 제어기법을 동시에 적용이 가능하다면 바닥판 구조물과 TMD의 진동을 효과적으로 제어할 수 있을 것이다<sup>9)</sup>.

Hybrid 제어기법은 Skyhook 제어기법에 의한 감쇠력과 Groundhook 제어기법에 의한 감쇠력을 적절하게 조절하여 제어하는 것으로 감쇠기의 감쇠력을 실시간으로 조절이 가능하다. 본 연구에서는 바닥판 구조물의 진동에 대한 Hybrid 제어기법의 제어성능을 알아보려고한다.

Skyhook 제어기법과 Groundhook 제어기법을 조합한 Hybrid 제어기법의 감쇠력을 조절하는 조건식은 다음 식 (4)와 같다.

$$c_{hybrid} = \alpha c_{sky} + (1 - \alpha) c_{ground} \quad (4)$$

식 (3)에서  $c_{sky}$ 와  $c_{ground}$ 는 Skyhook 모델과 Groundhook 모델에서의 감쇠를 나타낸 것이다. 여기서,  $\alpha$

가 1이면 MR-TMD의 제어력이 순수하게 Skyhook 제어기법으로 제어되며  $\alpha$ 가 0이면 MR-TMD의 제어력이 Groundhook 제어기법으로 제어가 되는 것이다.

### 3. MR-TMD의 감쇠기 모델에 따른 제어 성능

바닥판 구조물에서는 기계의 작동으로 인하여 과도한 진동이 발생할 수 있으며 또한 사람의 움직임과 같은 조화하중으로 인하여 공진이 유발될 수 있으므로 이에 대한 제어가 필요하다. 본 연구에서는 바닥판 구조물의 진동제어를 위한 MR-TMD의 제어성능을 검토하기 위하여 바닥판 구조물을 단자유도 구조물로 이상화시켜 진동해석을 수행하였다. 예제 바닥판 구조물의 고유진동수는 6.0Hz이며 감쇠비는 2%를 적용하였다. 바닥판 구조물의 진동응답을 최소화하기 위한 TMD의 질량비( $\mu$ )는 0.01, 진동수비( $f_{opt}$ )는 0.9819, 감쇠비( $\xi_{opt}$ )는 0.04981로 적용하였다<sup>10)</sup>.

예제 바닥판 구조물의 고유진동수와 같은 6Hz의 가진 진동수로 기계하중을 가하여 공진이 발생하도록 하였다. 또한 2.0Hz의 보행하중과 뒤꿈치 충격하중을 가하여 3차 조화하중에 의하여 진동이 증폭되도록 하였다.

#### 3.1 Skyhook 모델과 Groundhook 모델의 진동제어 성능 비교

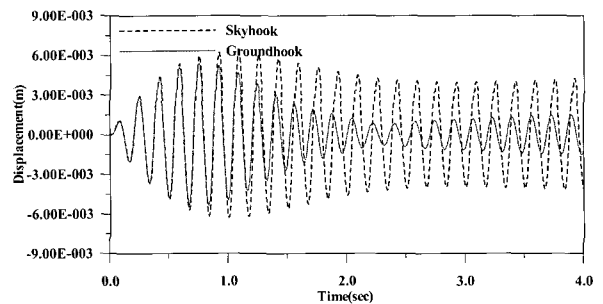
MR-TMD의 제어성능을 평가하기 위하여 MR-TMD의 감쇠기를 Skyhook 모델과 Groundhook 모델로 각각 모형화하여 감쇠기 모델에 따른 주구조물인 바닥판 구조물과 부구조물인 TMD의 진동응답을 비교하고자 한다. 변위기반 제어알고리즘이 속도기반 제어알고리즘보다 우수한 제어성능을 보이고 있으므로 예제 구조물의 진동제어에 변위기반 제어알고리즘을 적용하고자 한다.

예제 구조물의 고유진동수에 공진하는 기계하중에 의하여 야기되는 진동응답을 <그림 5>와 <그림 6>에 나타내었다. <그림 5>는 바닥판 구조물의 변위응답을 나타낸 것으로 Groundhook 모델로 모형

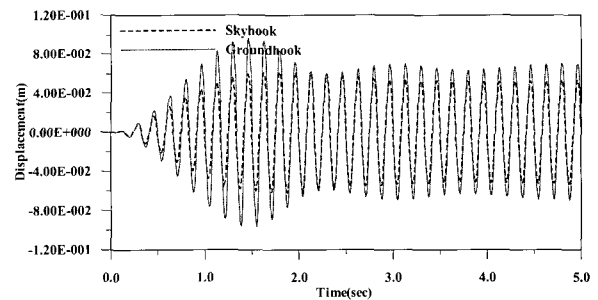
화한 것보다 Skyhook 모델로 모형화한 것의 제어 성능이 우수한 것을 볼 수 있다. <그림 6>은 부구조물인 TMD의 변위응답으로 Groundhook 모델로 모형화한 것보다 Skyhook 모델로 모형화한 것이 작게 나타나고 있다.

<그림 7>과 <그림 8>은 보행하중에 의한 바닥판 구조물과 TMD의 변위응답을 나타낸 것으로 Groundhook 모델과 Skyhook 모델에 의한 진동응답이 유사하게 나타나고 있다. 보행하중과 같이 조화하중에 의하여 공진이 유발되는 구조물에 있어서는 Skyhook 모델과 Groundhook 모델의 제어효과가 거의 차이가 없는 것을 볼 수 있다.

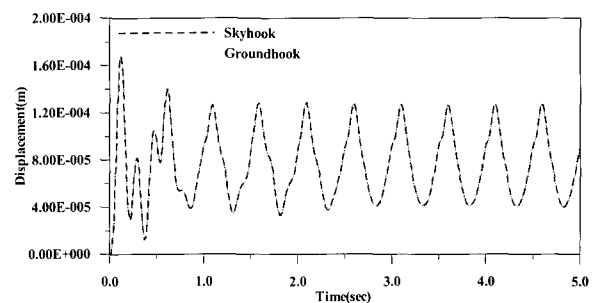
<그림 9>와 <그림 10>은 뒤꿈치충격하중에 의한



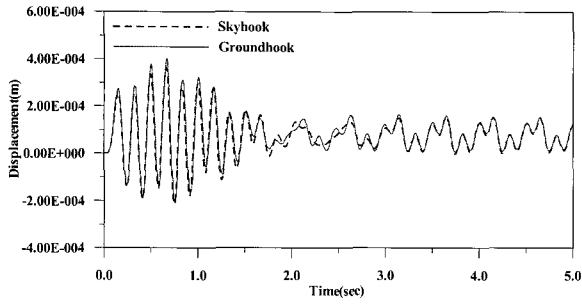
<그림 5> 바닥판 구조물의 변위응답-기계하중



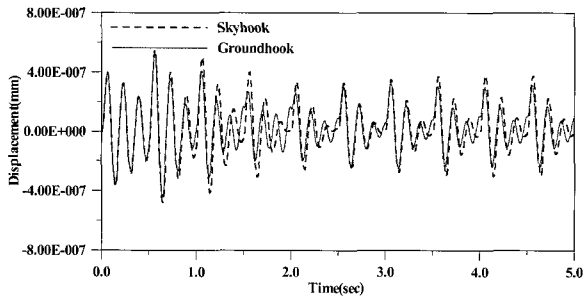
<그림 6> TMD의 변위응답-기계하중



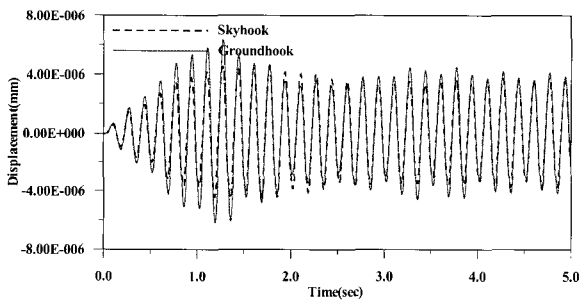
<그림 7> 바닥판 구조물의 변위응답-보행하중



<그림 8> TMD의 변위응답-보행하중



<그림 9> 바닥판 구조물의 변위응답-뒤꿈치충격



<그림 10> TMD의 변위응답-뒤꿈치충격

바닥판 구조물과 TMD의 변위응답을 나타낸 것으로 바닥판 구조물의 진동제어에 있어서는 Groundhook 모델의 변위응답이 약간 작게 나타나고 있다. TMD 진동응답을 살펴보면 Skyhook 모델에 의한 진동제어 효과가 약간 우수한 것을 볼 수 있다. 뒤꿈치충격하중은 주기적인 충격하중의 진동양상을 보이고 있으므로 보행하중에 의한 진동과는 약간 다른 양상을 보이고 있다.

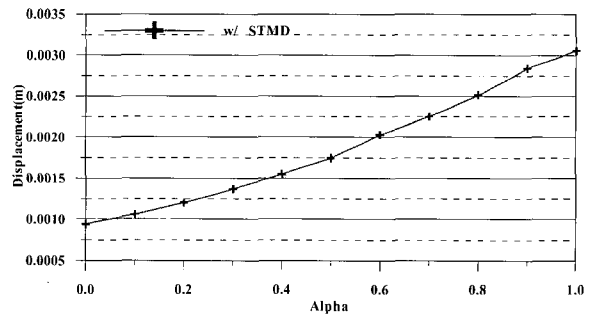
MR-TMD의 감쇠기를 Skyhook 모델과 Groundhook 모델로 각각 모형화할 경우에 바닥판 구조물과 TMD의 진동제어 효과가 다르게 나타나는 것을 볼 수 있다. 바닥판 구조물의 진동을 효과적으로 제어하려면 TMD의 진동이 과다하게 된다. 따라서

TMD의 변위가 제한적이지 않다면 제어성능이 보다 우수한 Groundhook 모델의 제어기법을 준능동 TMD를 적용하는 것이 효과적이다. 그러나 바닥판 구조물의 진동제어에 있어서 TMD의 변위응답이 민감한 사항이라면 Groundhook 모델보다는 Skyhook 모델로 모형화하는 것이 보다 좋은 결과를 나타낼 것이다.

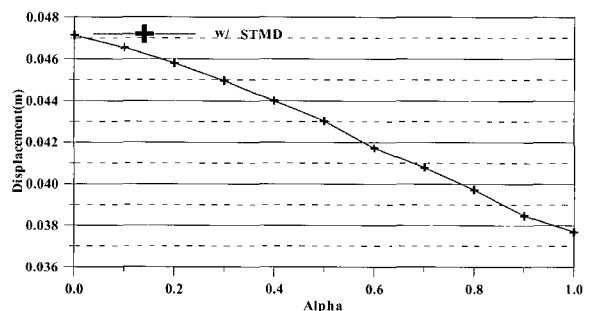
### 3.2 MR-TMD의 Hybrid 제어기법에 의한 진동제어

Hybrid 제어기법은 식 (3)에서 알 수 있듯이  $\alpha$ 에 따라서 Skyhook 제어기법과 Groundhook 제어기법에 의한 제어력을 조합하여 제어하는 것이다.

<그림 11>과 <그림 12>는 기계하중에 의한 바닥판 구조물과 TMD의 진동응답을  $\alpha$ 에 따른 제어효과를 나타낸 것이다.  $\alpha$ 가 0(zero)인 경우에 바닥판 구조물의 제어효과가 우수하며  $\alpha$ 가 1.0인 경우에 TMD의 제어효과가 우수한 것을 볼 수 있다. 이는 <그림 5>와 <그림 6>의 시간이력 해석결과와 일치한다.



<그림 11>  $\alpha$ 에 따른 바닥판 구조물의 변위응답(RMS)-기계하중



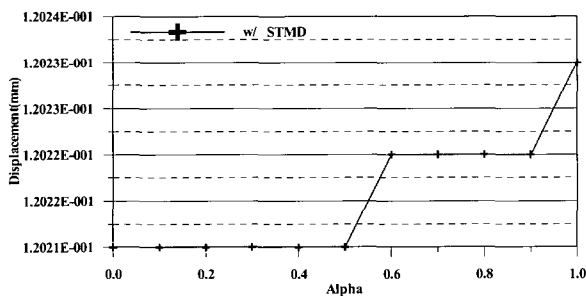
<그림 12>  $\alpha$ 에 따른 TMD의 변위응답(RMS)-기계하중

<표 1>은 기계하중에 의한 바닥판 변위와 TMD 변위를 각각 Groundhook 모델과 Skyhook 모델에 대하여 비교하여 두 모델의 제어성능을 비교한 것이다.  $\alpha$  계수에 따라서 바닥판 변위의 변화의 폭이 더 큰 것을 볼 수 있다. 따라서 TMD의 변위가 제한적일 경우에 TMD 변위제어가 우선시 되므로  $\alpha$  계수가 큰 것으로 선정하는 것이 보다 우수한 제어효과를 보일 것이다.

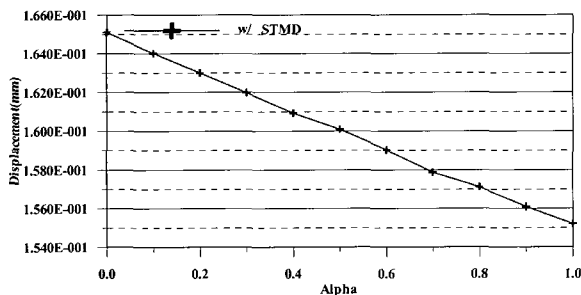
<그림 13>은 보행하중에 의한 바닥판 구조물의

<표 1> 제어성능 비교-기계하중 진동

$\alpha$ 계수	바닥판 변위 (Sky/Ground)	TMD 변위 (Ground/Sky)
0.0	30.8%	100.0%
0.1	34.7%	98.7%
0.2	39.4%	97.2%
0.3	44.8%	95.4%
0.4	50.7%	93.4%
0.5	57.2%	91.3%
0.6	66.4%	88.5%
0.7	73.6%	86.5%
0.8	82.3%	84.3%
0.9	92.9%	81.6%
1.0	100.0%	79.9%



<그림 13>  $\alpha$ 에 따른 바닥판 구조물의 변위응답(RMS)-보행하중



<그림 14>  $\alpha$ 에 따른 TMD의 변위응답(RMS)-보행하중

진동응답을  $\alpha$ 의 변화에 따라서 나타낸 것으로 보행하중에 의한 진동응답이 기계하중에 의한 진동응답과 달리  $\alpha$ 에 의한 영향이 미비하다. 이는 Skyhook과 Groundhook 제어기법의 제어효과가 유사한 것을 의미한다. 그러나 <그림 14>에서 TMD의 진동응답이  $\alpha$ 에 따라서 제어효과가 다르게 나타나는 것을 볼 수 있다.

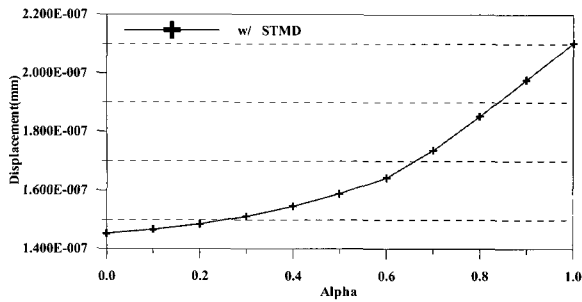
<표 2>는 보행하중으로 야기되는 바닥판과 TMD의 변위에 대하여 Groundhook 모델과 Skyhook 모델의 제어성능을 비교한 것이다.  $\alpha$  계수의 변화에 따라서 제어성능이 거의 변화가 없는 것을 볼 수 있다. 따라서 보행하중으로 야기되는 진동은 Groundhook 모델이나 Skyhook 모델 중에서 어느 것을 선택해도 유사한 제어효과를 보일 것이다.

<그림 15>와 <그림 16>은 뒤꿈치 충격하중에 의한 바닥판 구조물과 TMD의 진동응답을  $\alpha$ 의 변화에 따라서 나타낸 것이다.  $\alpha$ 에 따라서 진동제어 효과가 다르게 나타나는 것을 볼 수 있으나 기계하중에 의한 진동응답의  $\alpha$ 에 대한 영향보다는 작게 나타나고 있다.  $\alpha$ 가 증가함에 따라서 Skyhook 제어기법의 경향을 따르고 있으므로 바닥판 구조물의 진동응답이 증가하고 TMD의 진동응답이 감소하는 것을 알 수 있다.

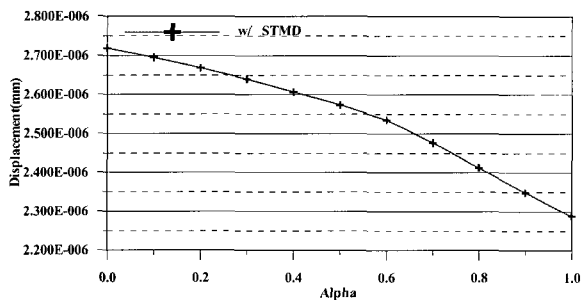
<표 3>은 뒤꿈치 충격하중에 의한 변위에 대하여 Groundhook 모델과 Skyhook 모델의 제어성능을 비교한 것이다.  $\alpha$  계수에 따라서 바닥판 변위가 최대 30% 정도 줄어들고 TMD의 변위는 16% 정도 줄어드는 것을 볼 수 있다. 따라서 TMD의 제어보

<표 2> 제어성능 비교-보행하중 진동

$\alpha$ 계수	바닥판 변위 (Sky/Ground)	TMD 변위 (Ground/Sky)
0.0	99.98%	100.0%
0.1	99.98%	99.3%
0.2	99.98%	98.7%
0.3	99.98%	98.1%
0.4	99.98%	97.5%
0.5	99.98%	97.0%
0.6	99.99%	96.3%
0.7	99.99%	95.6%
0.8	99.99%	95.2%
0.9	99.99%	94.5%
1.0	100.00%	94.0%



(그림 15)  $\alpha$ 에 따른 바닥판 구조물의 변위응답(RMS)-뒤꿈치충격



(그림 16)  $\alpha$ 에 따른 TMD의 변위응답(RMS)-뒤꿈치충격

(표 3) 제어성능 비교-뒤꿈치 충격하중 진동

$\alpha$ 계수	바닥판 변위 (Sky/Ground)	TMD 변위 (Ground/Sky)
0.0	69.1%	100.0%
0.1	69.7%	99.1%
0.2	70.6%	98.1%
0.3	71.9%	97.1%
0.4	73.5%	95.9%
0.5	75.6%	94.6%
0.6	78.1%	93.3%
0.7	82.6%	91.1%
0.8	88.1%	88.7%
0.9	94.0%	86.4%
1.0	100.0%	84.1%

다 바닥판의 제어가 우선시 된다면  $\alpha$ 계수가 작은 것으로 선정하는 것이 제어효과가 우수하다.

Hybrid 제어기법에서  $\alpha$ 를 0(zero)인 경우에 바닥판 구조물이 Groundhook 제어기법으로 제어가 되므로 바닥판 구조물의 변위가 최소화되고 TMD의 변위가 최대가 되는 것을 볼 수 있다. 그리고  $\alpha$ 를 1인 경우에 바닥판 구조물이 Skyhook 제어기법으로 제어가 되므로 TMD의 변위가 최소화 되고 바닥판 구

조물의 변위가 최대인 것을 볼 수 있다. 따라서  $\alpha$ 에 따른 바닥판 구조물과 TMD의 진동응답을 평가하여  $\alpha$ 를 결정한다면 바닥판 구조물과 TMD의 진동응답을 동시에 최적으로 제어할 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 MR-TMD의 감쇠기를 Skyhook 모델, Groundhook 모델 그리고 Hybrid 모델로 각각 모형화하고 이를 예제 바닥판 구조물의 진동해석에 적용, 진동응답을 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

MR-TMD의 감쇠기를 Groundhook 모델로 모형화한 경우에 바닥판 구조물의 진동제어에 있어서 보다 효과적인 것을 볼 수 있다. 그러나 TMD가 동조될 수 있는 변위가 제한적일 경우에 MR-TMD의 감쇠기를 Skyhook 모델로 모형화하는 것이 유리하다. 그리고 바닥판 구조물과 TMD를 동시에 제어해야 하는 경우에는 Hybrid 제어기법에 의한 진동해석을 통하여 적절한  $\alpha$ 계수를 선정하고 이를 반영하여 MR-TMD를 적용한다면 매우 우수한 제어성능을 보일 것이다.

본 연구는 MR 감쇠기의 제어성능에 대한 이론적 연구에 국한하여 수행되었으나 현재 많은 연구자에 의하여 실험적 연구도 활발히 진행되고 또한 실제 구조물에 적용하는 사례도 있다. 따라서 추후에는 MR-TMD의 진동제어성능에 대한 실험적 연구를 통하여 건축물 구조물의 진동에 대한 새로운 제어 장치의 활용 가능성을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2006년도 서일대학 학술연구비에 의하여 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. Nishitani, A. and Inoue, Y., "Overview of the application of active/semiactive control to building structures in Japan," Earthquake

- Engrg. and Struct. Dyn., Vol. 30, 2001, pp. 1565~1574.
2. 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. and Yao, T.P., "Structural control; Past, Present, and Future," ASCE, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 123, No. 9, 1997, pp. 897~971.
  3. Hugo Bachman and Benedikt Weber, "Tuned Vibration Absorbers for Lively Structures," Structural Engineering International 1/95, Science and Technology, 1995, pp. 31~36.
  4. Symans, M.D and 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.
  5. Jansen, L.M. and Dyke, S.J., "Semiactive Control Strategies for MR Dampers: Comparative Study," Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 126, No. 8, 2000, pp. 795~803.
  6. Hrovat, D, Barak, P. and 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.
  7. Agrawal, A. K. and Yang, J. N., "Semiactive control strategies for building subject to near-field earthquakes," Proceedings of SPIE, 2000, pp. 359~370.
  8. Abe, M. and Igusa, T., "Semiactive Dynamic Vibration Absorbers for Controlling Transient Response," Journal of Sound and Vibration, 198(5), 1996, pp. 547~569.
  9. 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
  10. 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.