

진동제어를 위한 준능동 TMD의 제어기법

A Control Method of Semi-active TMD for Vibration Control

이 기 학*
Lee, Ki-Hak

김 기 철**
Kim, Gee-Cheol

이 은 숙***
Lee, Eun-Suk

요 약

경간이 길어지고 강성이 유연한 바닥판 구조물은 처짐과 진동에 같은 사용성에 있어서 많은 문제점을 가지고 있다. 따라서 다양한 진동제어 시스템이 제공되고 있으며 TMD와 같은 수동제어 시스템은 적용에 있어서 한계가 있다. 본 논문에서는 MR감쇠기와 TMD를 조합한 준능동 TMD의 제어기법에 따른 제어성능을 알아보았다. 준능동 TMD의 감쇠기를 Groundhook 모델로 모형화한 경우에 주구조물인 바닥판 구조물의 진동제어에 있어서 보다 효과적인 것을 볼 수 있으나 TMD의 변위를 제어해야 하는 경우에 준능동 TMD의 감쇠기를 Skyhook 모델로 모형화하여 진동을 제어할 필요가 있다. 그리고 바닥판 구조물과 TMD를 동시에 제어해야 하는 경우에는 Hybrid 제어기법이 우수한 제어성능을 보이고 있다.

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 off-tuned, TMDs their effectiveness is sharply reduced. Moreover, the off-tuned TMDs can excessively amplify the vibration levels of the primary structures. This paper discusses the application of a new class of MR damper, for the reduction of floor vibrations due to machine and human movements. The STMD introduced uses a MR damper called to semi-active damper to achieve reduction in the floor vibration. Here, the STMD and the groundhook algorithm are applied to a single degree of freedom system representative of building floors. The performance of the STMD is compared to that of the equivalent passive TMD. In addition, the effects of off-tuning due to variations in the mass of the floor system. Comparison of the results demonstrates the efficiency and robustness of STMD with respect to equivalent TMD.

키워드 : 수동 TMD, 스카이훅, 그라운드훅, 복합제어MR 감쇠기, 준능동 감쇠기

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

1. 서 론

최근 건설기술의 발전과 자재의 발달로 인하여 바닥판 구조물의 경간이 길어지고 강성이 유연화 되어 가고 있다. 이러한 바닥판 구조물은 강도에 있어서 우수한 성능을 보유하고 있으나 처짐과 진동에 같은 사용성에 있어서 많은 문제점을 가지고 있다. 또한 넓은 공간이 요구되는 바닥판 구조물에서는 칸막이벽과

같은 부재의 사용이 감소하여 감쇠효과가 크게 줄어들고 있다. 대형 집회공간, 쇼펍몰, 사무실 등과 같은 건축물에서는 사람의 움직임 또는 기계작동에 의하여 과도한 진동이 발생할 수 있으며 이러한 진동은 사용자에게 불쾌감을 유발시키거나 부착물의 파손시키는 것은 물론 진동이 심하면 구조적 손상을 초래할 수 있다. 과도한 진동이 발생하는 바닥판 구조물은 구조부재의 강도를 증가키시거나 칸막이벽을 설치하여 진동을 저감시킬 수 있으나 이러한 방법은 비용이 많이 들며 이미 건축된 구조물에 있어서는 보강이 쉽지 않다. 그리고 진동제어 장치를 설치하여 과도한 진동을 줄일 수 있을 것이다. 최근에 수동 TMD(passive tuned mass damper, passive TMD)를 적용한 진동 제어 사례가 많아지고 있으나 TMD는 목표 고유진동

* 정회원, 세종대학교 건축공학과 교수
E-mail : beat67@seoil.ac.kr

** 정회원, 서일대학 건축과 교수
Tel : 02-3408-3286 Fax : 02-3408-3286
E-mail : kihaklee@sejong.or.kr

*** 학생회원, 영남대학교 건축공학 석사과정
E-mail : redskyes@nate.com

수 대역 부근에서만 제어효과가 있기 때문에 적용에 있어서 제한적이다^{1~4)}. 본 연구에서는 수동제어 시스템(TMD)의 신뢰성(reliability)과 능동제어 시스템의 적응성(adaptability)에 대한 장점을 가지고 있는 준능동 TMD(semi-active TMD, STMD)^{9~10)} 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. 이러한 STMD에 대하여 Hrovat¹¹⁾가 유압의 흐름을 조절하는 가변감쇠기를 적용한 준능동 TMD에 대한 연구를 최초로 수행하였다. 그리고 Agrawal과 Yang¹²⁾은 준능동 강성감쇠기(Semiactive Stiffness Damper)와 준능동 전자마찰 감쇠기(Semiactive Electromagnetic Friction Damper)를 개발하였다. Abe와 Igusa¹³⁾는 STMD의 최적 제어알고리즘의 개발을 위한 해석적인 이론을 제안하였으며 Hidaka 등¹⁴⁾은 가변감쇠장치를 이용한 STMD를 구성하여 제어성능을 실험적으로 검토하였다.

본 연구에서는 바닥판 구조물의 진동제어에 있어서 MR감쇠기와 TMD가 결합된 준능동 TMD의 진동제어 성능을 알아보고자 한다. 기계하중과 보행하중으로 야기되는 바닥판 구조물의 진동제어를 위하여 준능동 TMD를 적용하고 준능동 TMD의 제어기법에 따른 제어성능을 비교분석하여 효율적인 제어기법을 알아보고자 한다.

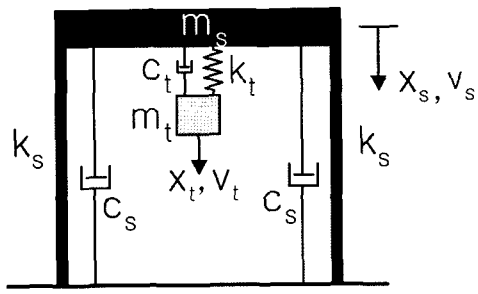
2. 준능동 TMD의 제어기법

2.1 준능동 TMD

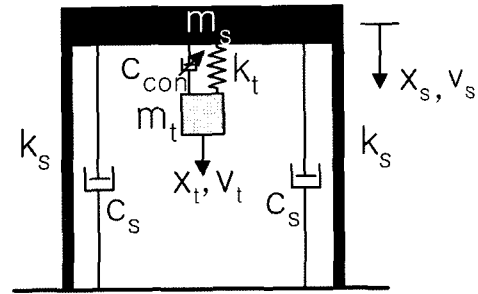
가진 하중의 진동수가 바닥판 구조물의 고유진동수와 일치하거나 근접한 경우에 바닥판 구조물에 과도한 진동이 유발되므로 진동을 제어하기 위하여 바닥판 구조물에 동조되도록 수동 TMD를 설치하게 된다. 바닥판 구조물의 진동제어에 있어서 제작 및 관리가 용이한 수동 TMD(passive tuned mass damper, Passive TMD)의 적용 사례가 증가하고 있으나 그 적응성에 있어서 한계를 가지고 있다^{1~4)}. 수동 TMD는 기계진동과 같이 고유의 진동수성분

을 가지고 있는 동적하중에 대하여 우수한 성능을 발휘하는 것으로 알려져 있다. 또한 여러 진동수 성분을 갖는 임의의 동적하중에 대하여 진동제어가 가능하도록 한 복수 TMD(multiple tuned mass damper; MTMD)에 대한 연구가 진행되고 적용되고 있다. 그리고 가력장치(actuator)를 이용하여 원하는 제어력을 TMD에 가하여 진동을 제어하는 AMD(active mass damper)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 TMD와 AMD를 동시에 사용함으로써 필요한 가력장치의 용량을 줄이면서도 TMD의 적응성(adaptability)을 높일 수 있는 HMD(Hybrid Mass Damper)가 개발되어 적용되고 있다.

수동 TMD가 설치된 바닥판 구조물의 수치해석 모델을 <그림 1>과 같이 표현할 수 있으며 TMD가 바닥판 구조물에 동조하도록 TMD의 질량, 강성, 감쇠를 최적으로 조율하여 설치한다. 준능동 TMD의 수치해석 모델은 <그림 2>와 같이 수동 TMD의 감쇠기(C_t)를 감쇠 조절이 가능한 MR 감쇠기(C_{con})로 대체하여 모형화 할 수 있다



<그림 1> Passive TMD model

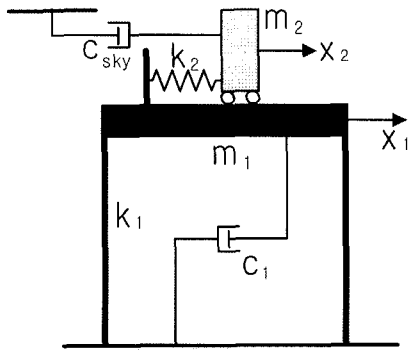


<그림 2> Semiactive TMD model

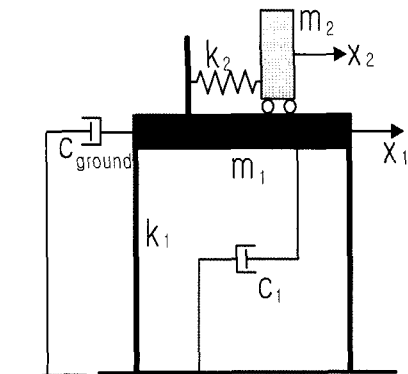
2.2 Skyhook 모델과 Groundhook 모델

준능동 TMD의 감쇠기에 대한 모델로 <그림 3>과 같이 Skyhook 모델이 있으며 Skyhook 모델을 기반으로 <그림 4>와 같이 Groundhook 모델이 개발되었다. Skyhook 모델과 Groundhook 모델의 차이는 감쇠기를 이상화하여 'Sky'에 연결하는 것과 'Ground'에 연결하는 것으로 볼 수 있다.

<그림 3>과 같이 Skyhook 모델은 승차감(ride comfort)을 향상시키기 위하여 자동차의 운전대와 같은 부구조물의 진동을 제어하기 위한 것이다. 그리고 <그림 4>와 같은 Groundhook 모델은 자동차의 안정성(stability)을 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



<그림 3> Skyhook model



<그림 4> Groundhook model

부구조물인 TMD의 변위가 제한적이므로 Skyhook 모델을 적용하는 진동응답을 분석할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 바닥판 구조물의 진동에 대한 두 가지 모델의 제어성능을 알아보려고 한다.

2.3 변위기반 및 속도기반 제어기법

준능동 제어장치가 우수한 제어성능을 발휘하기 위해서는 구조물의 상황에 따라서 최적의 제어알고리즘을 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)을 적용하며 속도기반 제어기법에서는 식(2)를 각각 적용한다.

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

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

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

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

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

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

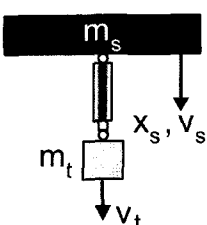
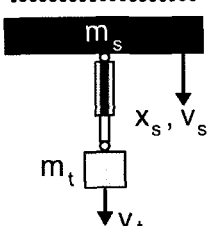
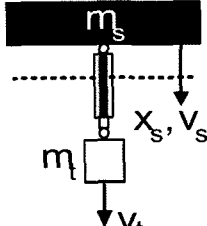
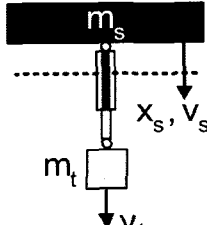
$$x_s(v_s - v_t) < 0 \rightarrow c_{controllable} = c_{min} \quad (3-2)$$

$$v_s(v_s - v_t) \geq 0 \rightarrow c_{controllable} = c_{max} \quad (4-1)$$

$$v_s(v_s - v_t) < 0 \rightarrow c_{controllable} = c_{min} \quad (4-2)$$

<표 1>는 변위기반 Groundhook 제어기법에 대한 설명을 나타낸 것이다. 제어 알고리즘은 평형위

<표 1> 변위기반 Groundhok 제어기법

Condition	Sign Conventions	Damper Status	Damper Force
	$X_s > 0$ $V_s - V_t > 0$	Compression	Maximum
	$X_s > 0$ $V_s - V_t > 0$	Tension	Minimum
	$X_s > 0$ $V_s - V_t > 0$	Compression	Minimum
	$X_s > 0$ $V_s - V_t > 0$	Tension	Maximum

치에 대한 주구조물의 변위(X_1)와 주구조물과 TMD의 상대속도($V_1 - V_2$)의 관계를 이용하여 정의된다. 이때 두 질량(m_1, m_2)사이의 상대속도가 음수이면 두 질량이 분리되는 방향으로 움직이는 것을 의미하며 감쇠기에는 인장력이 발생하게 되고 반대로 상대속도가 양수이면 감쇠기에는 압축력이 발생하게 된다. 또한 주구조물의 중심이 평형상태의 중심선(C.L.) 오른쪽에 있으면 변위(X_1)가 양수이고, 왼쪽에 있으면 음수이다.

주구조물이 C.L.의 오른쪽에 있고 두 질량의 상대속도가 양수일 경우를 <표 1>의 첫 번째 행에 나타내었다. 이때 준능동 감쇠기에는 압축력이 발생하고 주구조물은 오른쪽으로 계속 움직이는 상태이므로 STMD에 의한 감쇠력은 주구조물을 원래의 평형위치로 되돌리는 역할을 한다. 따라서 이 경우에는 준

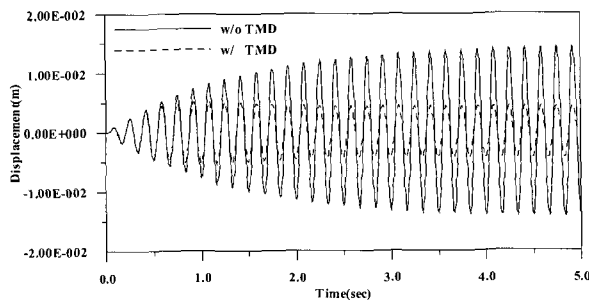
능동 감쇠기의 감쇠값을 최대로 하여 최고의 감쇠력을 발휘하도록 하는 것이 필요하다. <표 1>의 두 번째 행은 주구조물이 평형상태보다 왼쪽에 존재하고 준능동 감쇠기에는 인장력이 발생하는 경우이다. 이때에는 감쇠기에서 발생하는 인장력에 의해서 주구조물이 평형상태로 되돌려지기 때문에 준능동 감쇠기가 최대의 제어력을 발휘할 수 있도록 조절되어야 한다. <표 1>의 세 번째 행은 감쇠기에 인장력이 발생하는 것은 두 번째의 경우와 같지만 이 감쇠력은 주구조물을 평형상태의 위치에서 더욱 멀어지게 하여 구조물에 더 큰 진동을 발생시키게 된다. 따라서 이 경우에는 준능동 감쇠기의 감쇠력을 최소한으로 줄여주어서 STMD가 주구조물에 미치는 영향을 최소화 시킨다. 마지막으로 네 번째 경우는 준능동 감쇠기에 압축력이 발생하게 되고 이 압축력은 평형상

태를 기준으로 원편에 있는 주구조물을 더욱더 왼쪽으로 밀어내는 역할을 하기 때문에 준능동 감쇠기의 감쇠력을 최소로 함으로써 이러한 감쇠력이 제어력이 주구조물에 전달되는 것을 최소로 한다.

3. 준능동 TMD를 이용한 진동제어

회전 또는 왕복 운동을 하는 기체가 설치된 바닥판 구조물에서는 기체의 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 STMD의 제어성능을 검토하기 위하여 바닥판 구조물을 단자유도 구조물로 이상화시켜 진동해석을 수행하였다. 예제 바닥판 구조물의 강성은 $1.70547E+6(kgf/m)$ 이며 질량은 $1,200(kgf/g)$ 이다. 예제 바닥판 구조물의 감쇠비는 0.002를 적용하였다. 바닥판 구조물의 진동응답을 최소화하기 위한 TMD의 질량비(μ)는 0.01, 진동수비(f_{opt})는 0.9819, 감쇠비(ξ_{opt})는 0.04981로 적용하였다¹⁶⁾.

바닥판 구조물에 동적하중이 가진되어 공진과 같은 거동이 유발될 경우에 진동흡수장치인 수동 TMD를 설치하여 진동을 제어할 수 있다. <그림 5>는 예제 바닥판 구조물에 바닥판 구조물의 고유진동수와 같은 6Hz의 가진 진동수로 동적하중을 가하여 공진을 유발시킨 것으로 수동 TMD를 설치한 경우에 변위응답이 상당히 줄어들고 있는 것을 볼 수 있다. 변위응답과 마찬가지로 속도응답과 가속도응답 또한 많이 줄어들 것으로 판단된다.



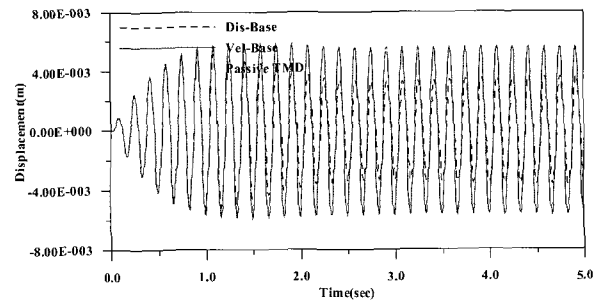
<그림 5> 수동 TMD에 의한 예제 바닥판 구조물의 진동제어

3.1 제어 기법에 따른 진동응답

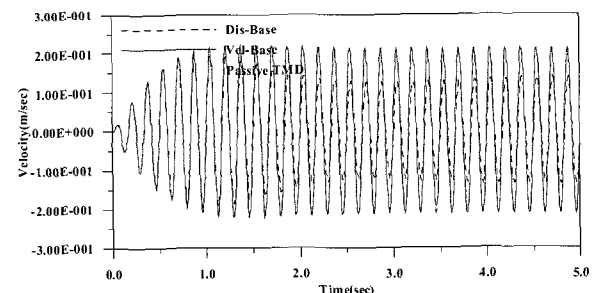
본 연구에서는 MR감쇠기의 감쇠력을 실시간으로 조절할 수 있는 변위기반 제어알고리즘과 속도기반 제어알고리즘을 적용하여 두 제어알고리즘의 제어성능을 알아보고자 한다. 변위기반과 속도기반 제어알고리즘을 적용하였으므로 Skyhook 모델과 Groundhook 모델에 따른 변위응답과 속도응답을 각각 비교분석하였다.

<그림 6>은 Skyhook 모델에 대한 바닥판 구조물의 변위응답을 나타낸 것으로 속도기반 제어기법보다 변위기반 제어기법의 제어성능이 우수한 것을 볼 수 있다. 준능동 감쇠기를 Skyhook 모델로 모형화 한 경우에 속도기반 제어기법 보다 오히려 수동 제어기법이 우수한 것을 알 수 있다. 이는 Skyhook 모델이 주구조물보다는 부구조물의 제어에 보다 효과적이기 때문이다. <그림 7>은 Skyhook 모델에 대한 바닥판 구조물의 속도응답을 나타낸 것으로 <그림 6>과 마찬가지로 변위기반 제어기법이 가장 우수한 제어성능을 보이고 있으며 다음으로 수동 제어기법, 속도기반 제어기법 순으로 나타나고 있다.

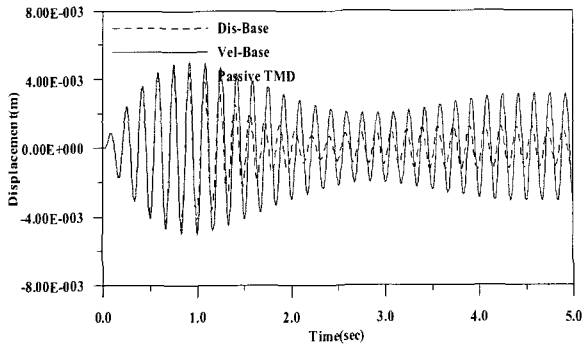
<그림 8>은 Groundhook 모델에 대한 바닥판 구



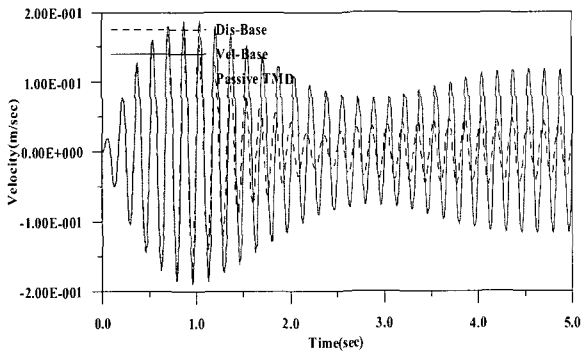
<그림 6> 바닥판 구조물의 변위응답(Skyhook 모델)



<그림 7> 바닥판 구조물의 속도응답(Skyhook 모델)



〈그림 8〉 바닥판 구조물의 변위응답(Groundhook 모델)



〈그림 9〉 바닥판 구조물의 속도응답(Groundhook 모델)

조물의 변위응답을 나타낸 것으로 변위기반 제어기법의 제어성능이 가장 우수한 것을 볼 수 있다. 다음으로 속도기반 제어기법이 수동제어기법보다 우수한 제어성능을 보여주고 있다. 준능동 감쇠기를 Groundhook 모델로 모형화한 경우에 준능동 감쇠기를 적용한 제어방법이 수동 감쇠기를 적용한 제어방법보다 우수한 것을 볼 수 있다. <그림 9>는 Groundhook 모델에 대한 바닥판 구조물의 속도응답을 나타낸 것으로 <그림 8>과 마찬가지로 변위기반 제어기법이 가장 우수한 제어성능을 보이고 있으며 다음으로 속도기반 제어기법이 우수한 제어성능을 보여주고 있다. 따라서 수동 TMD보다 준능동 TMD가 바닥판 구조물의 진동제어에 있어서 효과적인 것을 알 수 있다.

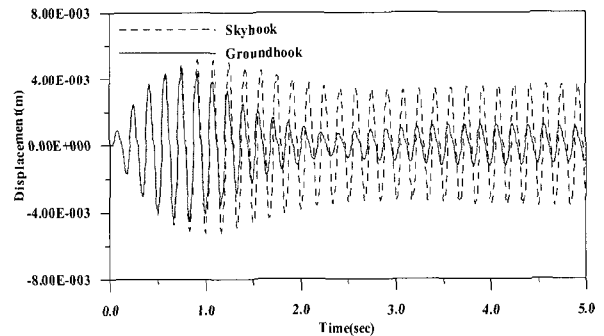
바닥판 구조물의 진동제어에 있어서 최적의 제어 알고리즘을 적용하여 우수한 제어성능을 확보해야 하므로 MR감쇠기의 감쇠력을 실시간으로 조절할 수 있는 변위기반 제어알고리즘과 속도기반 제어알고리즘에 대한 제어성능을 비교분석하여야 한다. <그림 6>~<그림 9>에서 알 수 있듯이 Skyhook 모델과 Groundhook 모델 모두에서 변위기반 제어알

고리즘이 속도기반 제어알고리즘보다 제어성능이 우수하다.

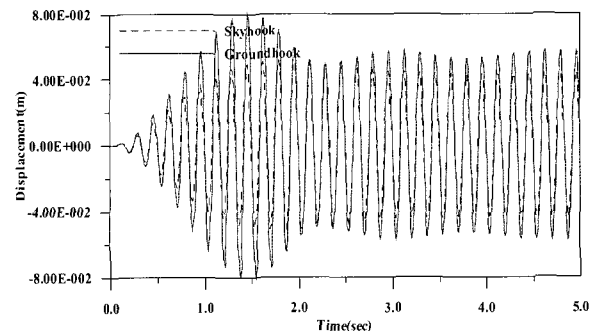
3.2 감쇠기 모델에 따른 구조물의 진동응답

준능동 TMD의 제어성능을 평가하기 위하여 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 10>은 변위기반 제어알고리즘을 적용하고 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 준능동 TMD의 감쇠기를 Skyhook 모델로 모형화한 것보다는 Groundhook 모델로 모형화한 것이 우수한 제어성능을 보이고 있다.

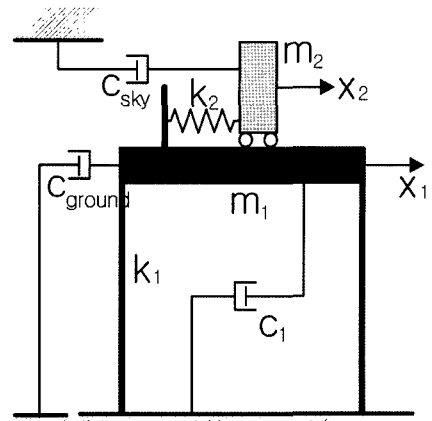


〈그림 10〉 바닥판 구조물의 변위응답(변위기반 제어)



〈그림 11〉 TMD의 변위응답(변위기반 제어)

<그림 11>은 부구조물인 TMD의 변위응답으로 준능동 TMD의 감쇠기를 Groundhook 모델로 모형화한 것보다 Skyhook 모델로 모형화한 것의 제어성능이 약간 우수한 것을 볼 수 있다. 따라서 바닥판 구조물의 진동제어에 있어서 TMD의 변위가 제한적이지 않다면 제어성능이 확실한 Groundhook 모델의 변위기반 제어기법의 준능동 TMD를 적용하는 것이 효과적이다. 그러나 경우에 따라서 TMD의 변위가 제한적일 수 있으므로 TMD의 변위가 진동제어에 있어서 보다 우선시 된다면 Groundhook 모델보다는 Skyhook 모델로 모형화하는 것이 보다 좋은 결과를 나타낼 것이다.



<그림 12> 이상화된 Hybridmodel

4. 준능동 TMD의 Hybrid 제어기법

4.1 Hybrid 제어 기법

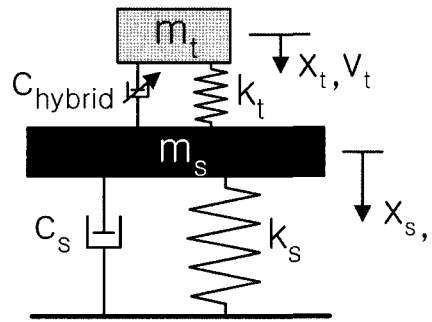
준능동 TMD의 Skyhook 제어기법은 TMD의 진동응답을 저감하기 위한 제어기법으로 적절하며 Groundhook 제어기법은 바닥판 구조물의 진동응답을 제어하기 위한 제어기법으로 적용할 수 있을 것이다. 바닥판 구조물의 속도응답을 제어하고 동시에 TMD의 변위응답을 제어해야 하는 경우와 같이 상황에 따라서 주구조물과 부구조물을 동시에 제어해야 하는 경우도 생길 수 있을 것이다. 이러한 경우에 <그림 12>와 같이 Skyhook 제어기법과 Groundhook 제어기법을 절충한 Hybrid 제어기법을 적용할 수 있다면 바닥판 구조물과 TMD의 진동을 최적으로 제어할 수 있을 것이다¹⁵⁾.

<그림 13>은 실제적인 Hybrid 제어기법을 적용한 준능동 TMD의 모델로 준능동 TMD의 감쇠력의 감쇠력을 실시간으로 조절이 가능하다. 본 연구에서는 바닥판 구조물의 진동에 대한 Hybrid 제어기법의 제어성능을 알아보하고자한다.

Skyhook 제어기법과 Groundhook 제어기법을 조합한 Hybrid 제어기법의 감쇠력을 조절하는 조건식은 다음 식(5)와 같다.

$$\alpha c_{sky} + (1 - \alpha) c_{ground} \quad (5)$$

식(5)에서 c_{sky} 와 c_{ground} 는 Skyhook 모델과 Groundhook 모델에서의 감쇠를 나타낸 것이며 α 가 1이면



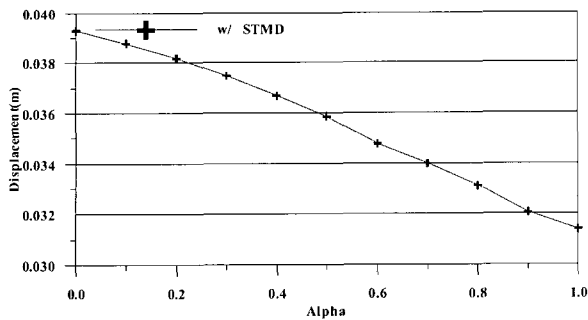
<그림 13> 실제적인 Hybrid

Skyhook 제어기법으로 제어가 되며 α 가 0(zero)이면과 Groundhook 제어기법으로 제어가 되는 것이다.

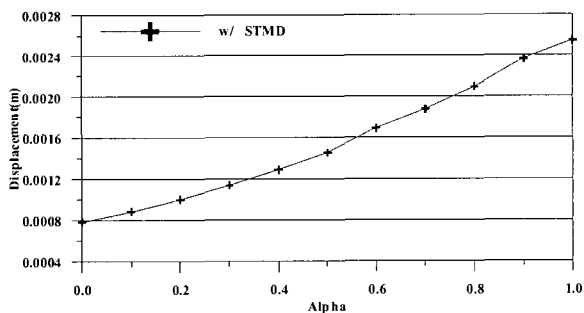
4.2 Hybrid 제어기법에 의한 구조물의 진동 응답

Hybrid 제어기법은 식(5)에서 알 수 있듯이 α 에 따라서 Skyhook 제어기법과 Groundhook 제어기법을 조합하게 된다. <그림 14> α 에 따른 TMD의 변위응답을 나타낸 것이며 <그림 15>은 α 에 따른 바닥판 구조물의 변위 응답을 나타낸 것이다. 바닥판 구조물의 진동제어에 있어서 준능동 TMD를 적용할 경우에 <그림 14>과 <그림 15>을 활용하여 바닥판 구조물과 TMD의 진동응답을 최적으로 제어할 수 있을 것이다.

α 를 0(zero)인 경우에 바닥판 구조물이 Groundhook 제어기법으로 제어가 되므로 바닥판 구조물의 변위가 최소화되고 TMD의 변위가 최대가 되는 것



(그림 14) α 에 따른 TMD의 변위응답(RMS)



(그림 15) α 에 따른 바닥판 구조물의 변위응답(RMS)

을 볼 수 있다. 그리고 α 를 1인 경우에 바닥판 구조물이 Skyhook 제어기법으로 제어가 되므로 TMD의 변위가 최소화 되고 바닥판 구조물의 변위가 최대인 것을 볼 수 있다. 만약 TMD의 변위가 35mm(RMS)로 제한적일 경우에 Hybrid 제어기법에서 α 를 0.6 이상을 적용하여 제어하면 바닥판 구조물의 변위응답은 1.6mm~2.8mm 범위 내에서 제어가 가능한 것을 볼 수 있다. α 가 증가함에 따라서 Skyhook 제어기법의 경향을 따르고 있으므로 바닥판 구조물의 진동응답이 증가하고 TMD의 진동응답이 감소하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 구조물의 진동제어에 있어서 준능동 TMD의 감쇠기를 각각 Skyhook 모델과 Groundhook 모델로 모형화한 경우와 제어알고리즘을 변위기반과 속도기반으로 제어할 경우의 진동응답을 비교분석하여 최적의 제어기법을 알아보고자 한다.

감쇠력을 실시간으로 조절하는 제어기법으로 변

위기반 제어알고리즘이 속도기반 제어알고리즘보다 우수한 제어성능을 보이고 있다. 그리고 준능동 TMD의 감쇠기를 Groundhook 모델로 모형화한 경우에 주구조물인 바닥판 구조물의 진동제어에 있어서 보다 효과적인 것을 볼 수 있으나 TMD의 변위를 제어해야 하는 경우에 준능동 TMD의 감쇠기를 Skyhook 모델로 모형화하여 진동을 제어할 필요가 있다. 그리고 바닥판 구조물과 TMD를 동시에 제어해야 하는 경우에는 Hybrid 제어기법이 우수한 제어성능을 보이고 있다.

현재 MR 감쇠기의 제어성능에 대한 실험 및 해석적이 연구가 활발히 진행되고 있고 실제 구조물에 적용사례가 증가하고 있는 추세에 있다. 따라서 추후 연구를 통하여 준능동 TMD에 대한 제어성능을 실험적으로 검증한다면 건축물 구조물의 진동에 대한 새로운 제어장치의 활용 가능성을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호#06 R&D B03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Kareem, A. and Kijewski, T., "Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications," Wind and Structures, Vol.2, No.3, 1999, pp.201~251.
2. 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.
3. Dyke, S.J., "Current directions in structural control in the US," 9th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Kobe, Japan, June 13-16, 2005, pp. 1~22.
4. 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.
5. Ricciardelli, F, Pizzimenti, A.D. and Mattei, M, "Passive and active mass damper control of the response of tall buildings to wind gustiness," Engineering Structures, Vol. 25, No. 9, 2003, pp. 1199~1209.
 6. Desu, N.B., Deb, S.K. and Dutta, A., "Coupled tuned mass dampers for control of coupled vibrations in asymmetric buildings," Structural Control and Health Monitoring, 2005.
 7. Pinkaew, T., Lukkunaprasit, P. and Chatupote, P., "Seismic effectiveness of tuned mass dampers for damage reduction of structures," Engineering Structures, Vol. 25, No. 1, 2003, pp. 39~46.
 8. Yau, J.D. and Yang, Y.B., "A wideband MTMD system for reducing the dynamic response of continuous truss bridges to moving train loads," Engineering Structures, Vol. 26, No. 12, 2004, pp. 1795~1807.
 9. 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.
 10. 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.
 11. 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.
 12. Agrawal, A. K. and Yang, J. N., "Semiactive control strategies for building subject to near-field earthquakes," Proceedings of SPIE, 2000, pp. 359~370.
 13. Abe, M. and Igusa, T., "Semiactive Dynamic Vibration Absorbers for Controlling Transient Response," Journal of Sound and Vibration, 198(5), 1996, pp. 547~569.
 14. Hidaka, S., Ahn, Y. K., and 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.
 15. 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
 16. 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.