

바닥판 구조물의 진동제어를 위한 MR 감쇠기의 적용

Application of MR Damper for Vibration Control of Floor Slab

김기철*
Kim, Gee-cheol

곽철승**
Kwak, Chul-seung

요약

수동동조질량감쇠기의 진동제어 효과는 질량감쇠기와 구조물과의 동조로 인하여 나타나고 있다. 그러나 바닥판 구조물의 질량과 강성의 변화로 인하여 실제 구조물에 있어서 비동조 현상이 일어나기도 한다. 이러한 상황에서는 수동동조질량감쇠기의 성능이 비효율적이며 경우에 따라서는 구조물의 진동을 증가시키기도 한다.

본 논문에서는 기계나 사람에 의한 바닥판 구조물의 진동을 줄이기 위하여 자기유체감쇠기의 적용성을 알아보려고 한다. 준능동제어와 groundhook 제어 알고리즘을 적용하여 준능동감쇠기의 성능과 수동동조질량감쇠기의 성능을 비교분석하였다. 또한 비동조 상황에서의 준능동감쇠기와 수동동조질량감쇠기의 견인성을 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 자기유체감쇠기는 동조 상황에서 우수한 제어 성능을 가지고 있으며 비동조 상황에서도 우수한 견인성을 보여주고 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 동조질량감쇠기, 비동조, 바닥판 진동, 자기유체 감쇠기, 준능동감쇠기, 견인성

Keywords : Passive TMD, Off-tuning, Floor vibration, MR damper, Semi-active damper, Robustness

1. 서론

최근 시공기술의 발전과 구조용 자재의 발달로 바닥판 구조물이 장경간화 유연화 되어가고 있다. 또한 넓은 공간이 요구되는 건축물에서는 구조물의 감쇠에 영향을 미치는 칸막이벽과 같은 비구조재가 감소함으로써 감쇠효과가 크게 줄어들고 있다. 이러한 바닥판 구조물은 강도에 있어서 우수한 성능을 보유하고 있으나 처짐과 진동에 관련된 사용성에 있어서

많은 문제점을 가지고 있다. 바닥판 구조물의 진동 제어는 구조물의 안전성보다는 사용성에 연관되어 있다. 대형 집회공간, 쇼핑몰, 사무실 등과 같은 건축물에서는 사용자의 보행하중이나 충격하중 또는 기계작동에 의한 동적하중에 의하여 과도한 진동이 발생할 수 있으며 이러한 진동은 사용자에게 불쾌감을 유발시키거나 부착물의 파손시키는 것은 물론 심하면 바닥판 구조물의 구조적 손상을 초래할 수 있다.

과도한 진동이 발생하는 바닥판 구조물은 대부분이 낮은 고유진동수를 가지고 있으며 이러한 진동수대역은 사람이 민감하게 반응하는 10Hz이하에 존재하고 있다. 바닥판 구조물의 진동제어를 위하여

* 정회원, 서일대학 건축과 교수
Tel : 02-490-7582 E-mail: beat67@seoil.ac.kr

** 정회원, 플러스구조엔지니어링 소장

구조부재의 강도를 증가시키거나 칸막이벽을 설치하여 감쇠효과를 증가시키는 방법이 있을 수 있으나 이러한 방법은 비용이 많이 들며 이미 건축된 구조물에 있어서는 보수보강이 어려워 적용이 매우 제한적이다. 그리고 최근에 동조질량감쇠기(tuned mass damper, TMD)를 적용한 진동제어 사례가 있으나 TMD는 목표 고유진동수 대역 부근에서만 제어효과가 있기 때문에 구조물의 고유진동수가 변화가 될 경우에 그 적용성에 있어서 한계를 가지고 있다^{1~4)}. 따라서 적용의 한계성을 극복하기 위하여 능동제어(active mass damper, AMD) 시스템이 개발되어 진동제어에 적용되고 있으나 능동제어 시스템은 초기에 많은 비용이 소요되며 유지관리에 있어서도 많은 비용이 소요되는 단점을 가지고 있다^{5~8)}

본 연구에서는 수동제어 시스템(TMD)의 신뢰성(reliability)과 능동제어 시스템의 적응성(adaptability)에 대한 장점을 가지고 있는 준능동제어(semi-active TMD, STMD)^{9~10)} 시스템을 바닥판 구조물의 진동제어에 적용하고자 한다. 일반적인 준능동제어 시스템은 구조물의 응답에 따라서 실시간으로 감쇠를 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 수행되었다. 그리고 Agrawal과 Yang¹²⁾은 준능동 강성 감쇠기(Semiactive Stiffness Damper)와 준능동 전자마찰 감쇠기(Semiactive Electromagnetic Friction Damper)를 개발하였다. Abe와 Igusa¹³⁾는 STMD의 최적 제어 알고리즘의 개발을 위한 해석적인 이론을 제안하였으며 Hidaka 등¹⁴⁾은 가변감쇠장치를 이용한 STMD를 구성하여 제어성능을 실험적으로 검토하였다.

본 연구에서는 기계하중과 보행하중에 의하여 진동을 유발시키는 바닥판 구조물에 대하여 MR감쇠기와 TMD가 결합된 STMD의 진동제어 성능을 분석하고자 한다. 이를 위하여 주기하중과 보행하중을 바닥판 구조물에 가하여 STMD(준능동제어)의 제어성능을 TMD(수동제어)의 제어성능과 비교하여 보았다. TMD의 설계과정에서 주구조물과 TMD의 상호작용이 가장 효과적으로 나타나도록 TMD의 질량,

강성, 감쇠를 최적으로 하였다. 그러나 시간이 지남에 따라서 주구조물 또는 TMD의 질량, 강성, 감쇠가 변화하게 되어 최적의 제어성능을 발휘할 수 없게 되는 경우가 많다(off-tuning). 이러한 현상으로 인하여 TMD의 성능이 떨어지거나 오히려 주구조물에 피해를 일으킬 가능성도 있으므로 off-tuning은 TMD를 실제 구조물에 적용할 때 고려해야할 중요한 문제점 중에 하나이다. 따라서 본 연구에서는 off-tuning이 발생할 경우, TMD와 STMD의 제어성능 변화를 비교하여 그 건실성(robustness)을 검토하여 보았다.

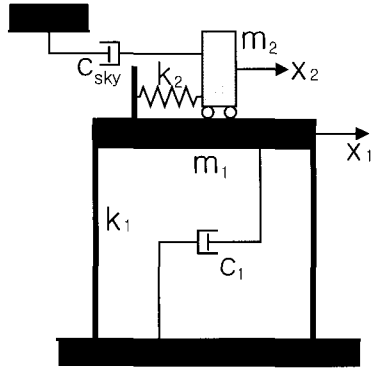
2. 준능동 제어장치의 제어 알고리즘

2.1 제어 알고리즘

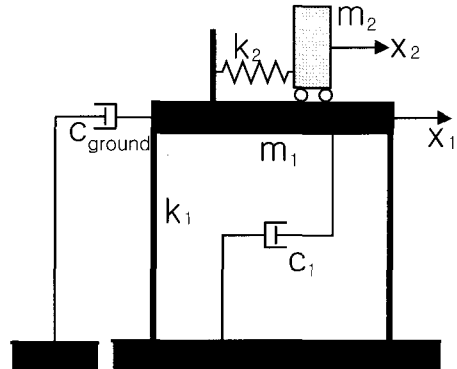
준능동 제어장치 중에 하나인 MR감쇠기를 효과적으로 제어하기 위해서는 적절한 제어알고리즘이 필요하다. 현재 제시된 준능동 제어장치를 제어하는 제어기법으로는 매 순간 감쇠력의 소산성을 판단하고 이에 따라 전류의 세기를 on-off의 2단계만으로 조절하는 Clipped-Optimal 제어알고리즘이 있다. 그리고 주구조물의 변위(속도)와 주구조물과 TMD의 상대속도의 정의에 따라서 제어력이 결정되는 변위(속도)기반 제어 알고리즘이 있다. 이 두 가지 방법은 적용하기가 간단하면서도 효과적이라는 장점이 있으나 매 순간 원하는 감쇠력을 발휘하는 전류의 양을 정량화 할 수 없기 때문에 감쇠기의 비선형성을 고려하지 못한다. 그리고 최근에 개발된 퍼지 제어 알고리즘은 퍼지추론과정을 거쳐서 구조물의 상태를 파악함으로써 매 순간 보다 효율적인 제어성능을 발휘하도록 MR 감쇠기의 감쇠력을 결정하는 입력 전류량을 실시간으로 조절할 수 있는 제어기법이다. 퍼지 제어 알고리즘은 전류량을 결정함에 있어서 퍼지 추론을 거쳐야 하므로 최적의 제어를 위해서는 시간이 소요된다. 따라서 본 연구에서는 적용이 간단하며 제어 효과가 비교적 우수한 변위 기반 제어 알고리즘 적용하고자 한다.

2.2 Groundhook 제어기법

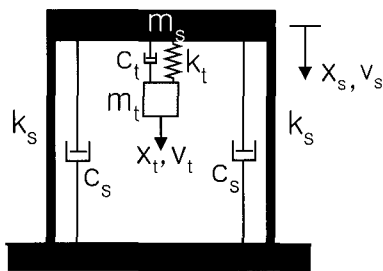
준능동 감쇠기의 감쇠력을 구조물의 응답에 따라



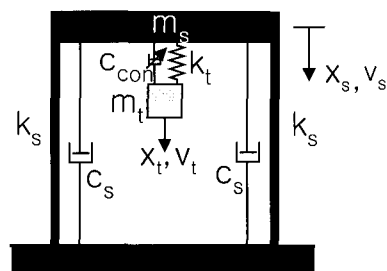
<그림 1> Skyhook model



<그림 2> Groundhook model



<그림 3> Passive TMD model



<그림 4> Semiactive TMD model

실시간으로 조절하기 위한 제어모델로 Skyhook 모델과 Groundhook 모델이 있으며 본 절에서는 두 제어모델에 대하여 간단히 소개하고자 한다.

<그림 1>과 같이 Skyhook 제어기법은 자동차의 서스펜션 시스템에 대한 준능동 제어장치의 제어기법으로 적용하게 되었으며 이를 기반으로 <그림 2>와 같이 Groundhook 제어기법이 개발되었다. Skyhook 제어기법은 자동차의 운전대와 같은 부구조물의 진동제어와 관련된 것으로 승차감(ride comfort)을 향상시키기 위하여 진동 제어기법이다. 그리고 Ground 제어기법은 자동차의 차체와 같은 주구조물의 진동을 저감하여 자동차의 안정성(stability)을 확보하기 진동 제어기법이다. 바닥판 구조물의 진동제어는 자동차의 차체와 같이 주구조물의 진동을 제어하는 것이므로 본 논문에서는 Ground 제어기법을 적용하여 바닥판 구조물의 진동 제어를 수행하였다.

바닥판 구조물의 진동제어에 있어서 준능동 제어장치가 설치된 주구조물의 수치해석 모델은 <그림 3>과 같은 수동 제어장치의 감쇠기(c)를 <그림 4>와 같이 감쇠 조절이 가능한 MR 감쇠기(c_{con})로 대

체하여 모형화 할 수 있다.

2.3 속도기반 Groundhook 제어와 변위기반 Groundhook 제어

Groundhook 제어기법은 주구조물의 변위와 주구조물과 TMD의 상대속도의 정의에 따라서 제어력이 결정되는 변위기반 제어 알고리즘과 주구조물의 속도와 주구조물과 TMD의 상대속도의 정의에 따라서 제어력이 결정되는 속도기반 제어 알고리즘으로 구분할 수 있다. 등가의 Groundhook 감쇠력을 결정하기 위한 조건으로 변위기반 Groundhook 제어기법은 식 (1)를 적용하며 속도기반 Groundhook 제어기법은 식 (2)를 각각 적용한다.

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

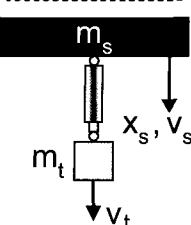
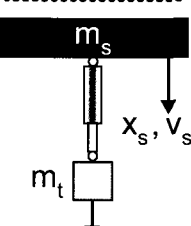
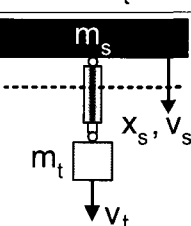
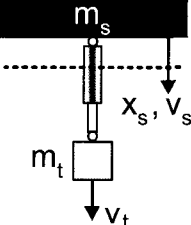
$$x_s(v_s - v_t) < 0 \rightarrow c_{controllable} = c_{min} \quad (1-2)$$

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

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

두 제어 알고리즘 중에서 변위기반 제어 알고리

<표 1> 변위기반 Groundhook 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

증의 제어성능이 보다 우수한 것으로 연구되었다¹⁵⁾. 따라서 본 논문에서는 바닥판 구조물의 진동제어를 위하여 변위기반 Ground hook 제어기법을 적용하였다.

<표 1>은 변위기반 Groundhook 제어 기법에 대한 설명을 나타낸 것이다. 제어 알고리즘은 평형위치에 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.

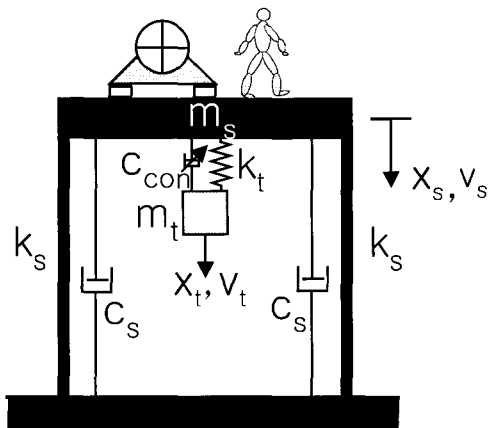
주구조물이 C.L.의 오른쪽에 있고 두 질량의 상대속도가 양수일 경우를 표 1의 첫 번째 행에 나타내었다. 이때 준능동 감쇠기에는 압축력이 발생하고 주구조물은 오른쪽으로 계속 움직이는 상태이므로 STMD에 의한 감쇠력은 주구조물을 원래의 평형위치로 되돌리는 역할을 한다. 따라서 이 경우에는 준능동 감쇠기의 감쇠값을 최대로 하여 최고의 감쇠력을 발휘하도록 하는 것이 필요하다. <표 1>의 두 번째 행은 주구조물이 평형상태보다 왼쪽에 존재하고 준능동 감쇠기에는 인장력이 발생하는 경우이다. 이때에는 감쇠기에서 발생하는 인장력에 의해서 주구조물이 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 감쇠

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

3. 바닥판 구조물의 진동제어

본 연구에서는 바닥판 구조물의 진동제어를 위한 STMD의 제어성능을 검토하기 위하여 바닥판 구조물을 단자유도 구조물로 이상화시켜 진동해석을 수행하였다. 예제 구조물은 층질량 1500 kgf/g 및 층강성 4.797E+6 kgf/m의 특성을 가지고 있다. 예제 바닥판 구조물의 감쇠비는 0.002를 적용하였다. 바닥판 구조물의 진동응답을 최소화하기 위한 TMD의 최적 진동수비(f_{opt})는 0.9819, TMD의 최적 감쇠비(ξ_{opt})를 0.04981로 적용하였다¹⁶⁾.

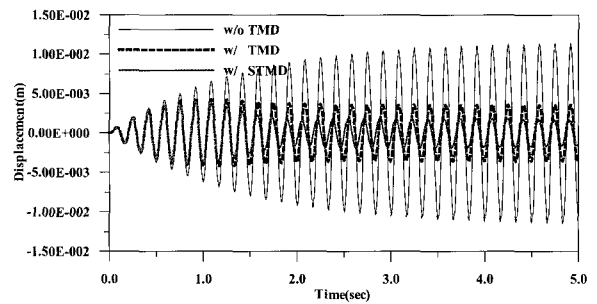
<그림 5>와 같이 회전 또는 왕복 운동을 하는 기계가 설치된 바닥판 구조물에서는 기계의 작동으로 인하여 또는 사람의 움직임에 의하여 동적하중이 발생하게 되며 이러한 동적하중은 바닥판 구조물에 진동을 야기 시킨다.



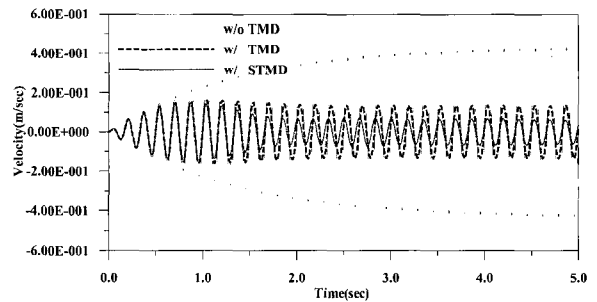
<그림 5> 동적하중에 의한 진동

3.1 기계의 가동으로 인한 바닥판 구조물 진동의 제어

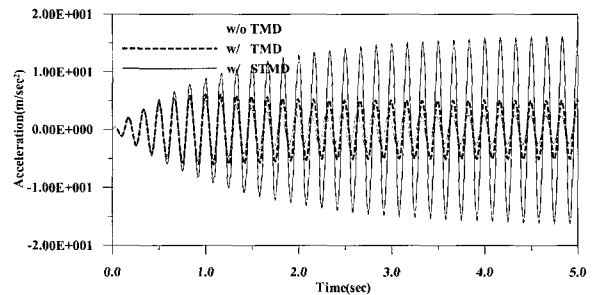
회전 또는 왕복 운동을 하는 기계가 설치된 바닥판 구조물에서는 기계의 작동으로 인하여 바닥판 구조물에 진동이 발생하게 된다. 기계에 의한 동적하중은 진동수 대역이 비교적 뚜렷한 주기하중으로 바닥판 구조물에 가해지게 된다. 이러한 동적하중이 바닥판 구조물의 고유진동수와 일치하거나 유사할 경우에 바닥판 구조물은 공진과 같은 과도한 진동이 발생하게 되어 바닥판 구조물의 사용성에 많은 지장을 초래한다. 따라서 이러한 바닥판 구조물에 발생하는 진동응답에 대한 정확한 분석과 진동제어



<그림 6> (a) 기계하중에 의한 바닥판 구조물의 변위 시간이력



<그림 6> (b) 기계하중에 의한 바닥판 구조물의 속도 시간이력



<그림 6> (c) 기계하중에 의한 바닥판 구조물의 가속도 시간이력

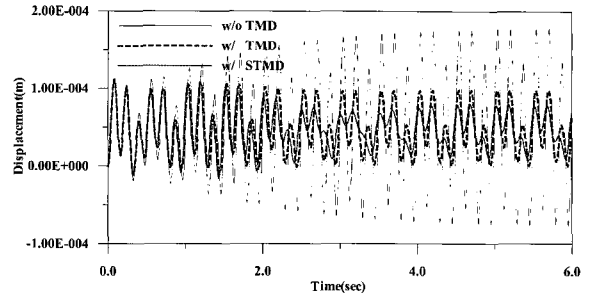
가 필요하다.

일정한 진동수를 갖는 동적하중을 예제 바닥판 구조물에 가하여 예제 바닥판 구조물의 변위, 속도, 가속도 시간이력을 <그림 6> (a), (b), (c)에 나타내었다. 동적하중의 주기는 바닥판 구조물의 주기와 같게 하여 공진이 일어나도록 하였다. 따라서 진동 제어 장치를 설치하지 않았을 때에는 진동응답이 크게 발생하고 있으며 진동제어 장치인 TMD나 STMD를 설치한 경우에는 진동응답이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 특히, STMD를 설치한 경우의 진동응답은 STMD가 제어력을 발휘하기 이전에는 TMD의 진동응답과 유사하다가 STMD가 제어력을 발휘하기 시작하면서 TMD를 설치한 경우의 진동응답보다 더 줄어드는 것을 볼 수 있다. 따라서 STMD의 제어성능이 TMD의 제어성능보다 우수한 것을 확인할 수 있다.

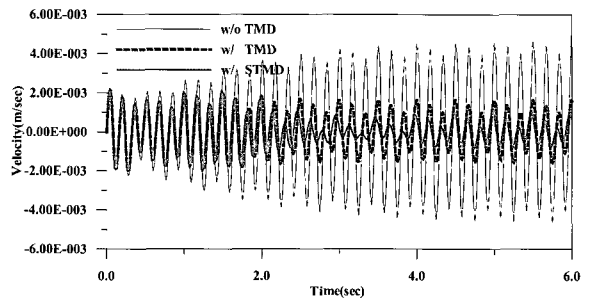
3.2. 사람의 움직임에 의한 바닥판 구조물 진동의 제어

쇼핑몰, 콘서트홀, 대형 사무실과 같은 장경간의 바닥판 구조물의 경우에 구조물의 고유진동수가 낮아 거주자의 걷기, 뛰기 그리고 발 구르기와 같은 사람의 움직임에 의하여 공진 또는 공진과 유사한 동적거동이 발생할 수 있다. 이러한 동적거동에 의하여 바닥판 구조물에서 과도한 진동이 발생하며 진동으로 인하여 거주자에게 불쾌감을 유발시키거나 일의 능률을 떨어뜨리는 등 건축물의 사용성에 많은 영향을 주게 된다. 그리고 진동이 심할 경우에는 천장과 벽체의 마감재 또는 부착물이 떨어질 수도 있다. 그리고 진동이 한층 더 심할 경우에는 구조물에 균열이 발생하는 등 구조적 성능을 저하시키는 것은 물론 구조물의 안정성에도 심각한 영향을 미칠 수가 있다. 따라서 사람의 움직임에 의하여 야기되는 바닥판 구조물의 진동에 대한 사용성 및 안전성 검토가 요구된다.

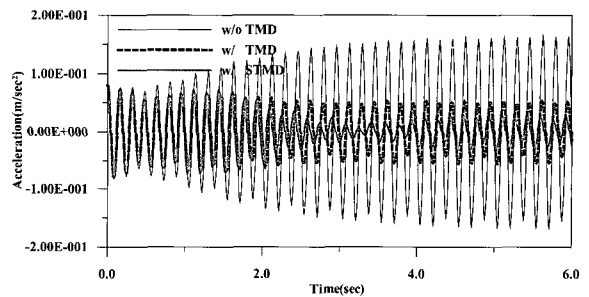
보행하중을 예제 바닥판 구조물에 가하여 진동해석을 수행하였다. <그림 7> (a), (b), (c)는 예제 바닥판 구조물의 변위, 속도, 가속도 시간이력을 나타낸 것이다. 보행하중의 주기는 2.0Hz로 보행하중의 3



<그림 7> (a) 보행하중에 의한 바닥판 구조물의 변위 시간이력



<그림 7> (b) 보행하중에 의한 바닥판 구조물의 속도 시간이력



<그림 7> (c) 보행하중에 의한 바닥판 구조물의 가속도 시간이력

차 조화하중이 바닥판 구조물의 주기와 같게 하여 공진이 일어나도록 하였다. <그림 7>에서 진동제어 장치를 설치하지 않았을 때에는 바닥판 구조물이 공진과 유사한 거동을 하여 진동응답이 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 그리고 TMD나 STMD를 설치한 경우에는 <그림 6>과 마찬가지로 진동응답이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 특히, STMD가 제어력을 발휘하기 시작하면서 STMD를 설치한 경우의 진동응답이 TMD를 설치한 경우의 진동응답보다 더 줄어드는 것을 볼 수 있다.

4. Off-tuning에 대한 제어 성능평가

동조질량감쇠기(TMD)는 구조물의 동적거동에 가장 큰 영향을 끼치는 진동수에 대하여 설계하여 진동을 제어하게 된다. 그러나 TMD 설치 후, 시간이 경과함에 따라 설계과정에서 고려하였던 바닥판 구조물 또는 TMD의 질량과 강성이 변하게 되어 TMD가 바닥판 구조물에 대하여 제대로 동조하지 못하게 된다. 이를 off-tuning이라하며 이러한 현상으로 인하여 처음 설계된 TMD가 제대로 성능을 발휘하지 못하게 된다. 이러한 off-tuning 상태에서 TMD와 STMD의 제어성능을 분석하면 STMD의 건설성을 판단할 수 있을 것이다.

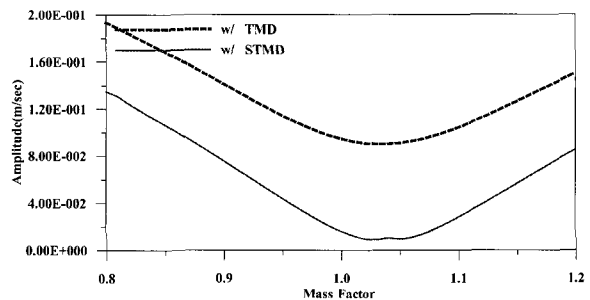
바닥판 구조물의 질량변화에 따른 STMD와 TMD의 제어성능을 비교분석하기 위하여 바닥판 구조물의 질량을 -20%에서 +20%까지 변화시켜 진동해석을 수행하였다. 이때 TMD와 STMD의 동적특성은 일정하게 유지하였으며 동적하중의 주기는 구조물의 진동주기와 같게 하여 진동응답이 크게 나오도록 하였다.

<그림 8>은 회전형 기계가 설치된 바닥판 구조물의 질량변화에 따른 RMS 변위응답, RMS속도응답 그리고 RMS 가속도응답 나타낸 것이다. 그림 8에서 주구조물의 질량의 변화에 따른 STMD와 TMD의 제어성능을 살펴보면, STMD에 의한 진동응답이 TMD에 의한 진동응답보다 30%정도 더 작은 것을 볼 수 있다. 즉, STMD의 제어성능이 TMD의 제어성능보다 건설성이 좋은 것을 확인 할 수 있는 것이다. 그리고 STMD와 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 적응하지 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.

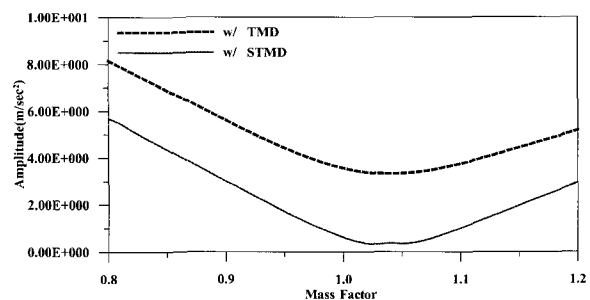
<그림 9>는 보행하중이 가해지는 바닥판 구조물의 질량변화에 따른 RMS 변위응답, RMS속도응답 그리고 RMS 가속도응답 나타낸 것이다. <그림 9>에서 주구조물의 질량의 변화에 따른 STMD와

TMD의 제어성능을 살펴보면, STMD에 의한 진동응답이 TMD에 의한 진동응답보다 최소 5%에서 최대 50%까지 더 작은 것을 볼 수 있다. 즉, STMD의 제어성능이 TMD의 제어성능보다 건설성이 좋은 것을 확인 할 수 있는 것이다. 그리고 바닥판 구조물의 질량이 증가하거나 감소할 때 보다 바닥판 구조물의 질량변화가 없을 때 STMD와 TMD의 제어성능 차이가 더 많은 것을 볼 수 있다. STMD에 의한 바닥판 구조물의 제어성능은 가속도응답 제어에 가장 우수한 건설성을 보이고 있으며 다음으로 RMS 속도응답 제어 그리고 RMS 변위응답 제어 순

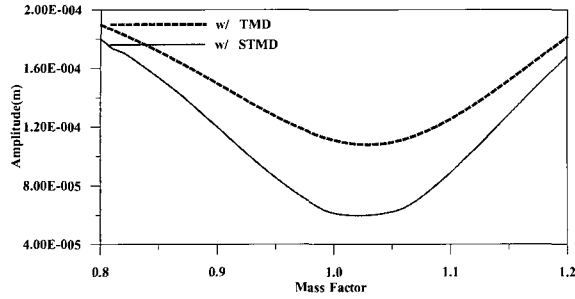
<그림 8> (a) 바닥판 구조물의 질량변화에 따른 RMS 변위응답-기계하중



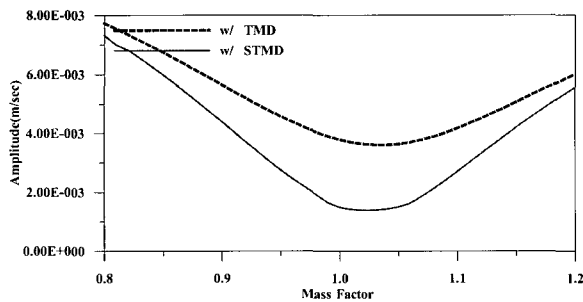
<그림 8> (b) 바닥판 구조물의 질량변화에 따른 RMS 속도응답-기계하중



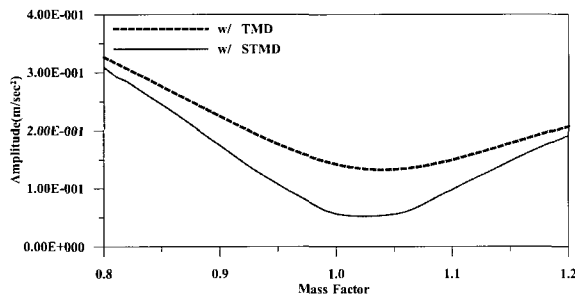
<그림 8> (c) 바닥판 구조물의 질량변화에 따른 RMS 가속도응답-기계하중



〈그림 9〉 (a) 바닥판 구조물의 질량변화에 따른 RMS 변위응답-보행하중



〈그림 9〉 (b) 바닥판 구조물의 질량변화에 따른 RMS 속도응답-보행하중



〈그림 9〉 (c) 바닥판 구조물의 질량변화에 따른 RMS 가속도응답-보행하중

으로 건실성이 우수한 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 바닥판 구조물의 진동제어에 대한 TMD와 STMD의 제어성능을 비교 분석하여 보았다. 바닥판 구조물의 진동응답에 따라서 STMD의 감쇠력을 적절히 조절하기 위하여 Groundhook 제어알고리즘을 사용하였다.

바닥판 구조물의 진동제어를 위하여 TMD와 STMD를 적용한 결과, STMD를 적용한 바닥판 구

조물의 진동응답이 TMD를 적용한 바닥판 구조물의 진동응답보다 현저하게 줄어든다. STMD는 주구조물의 공진대역에서 TMD에 비하여 탁월한 진동저감효과를 보여주고 있으므로 공진으로 인하여 야기되는 바닥판 구조물의 과도한 진동을 매우 효과적으로 제어할 수 있을 것이다. 그리고 주구조물의 질량변화에 따른 off-tuning상태에서의 TMD와 STMD의 제어성능을 비교분석 결과, STMD가 TMD보다 제어성능의 건실성이 더욱 뛰어난 것을 확인할 수 있었다. 따라서 수동 TMD에 MR 감쇠기를 적용한 준능동 진동제어 시스템이 바닥판 구조물의 진동제어에 있어서 매우 효과적인 것을 확인할 수 있었다.

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

감사의 글

본 논문은 2005년도 서일대학 학술연구비에 의해 연구되었음

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.