

준능동 TMD를 이용한 아치구조물의 지진응답제어

Seismic Response Control of Arch Structures using Semi-active TMD

강주원*
Kang, Joo-Won

김기철**
Kim, Gee-Cheol

김현수***
Kim, Hyun-Su

요약

본 연구에서는 지진하중을 받는 대공간 구조물의 지진응답을 저감시키기 위하여 준능동 동조질량제어장치(STMD)를 이용한 제어기법의 가능성을 검토하여 보았다. 이를 위하여 대공간구조물의 기본적인 동적특성을 가지고 있으며 동시에 가장 간단한 구조이기도 한 아치 구조물에 일반적인 TMD 및 STMD를 설치하여 지진응답 제어성능을 평가하였다. STMD의 감쇠력을 조절하기 위해서 널리 사용되고 있는 준능동 제어알고리즘인 그라운드훅(groundhook) 제어기법을 이용하였다. STMD 및 수동 TMD의 성능검토를 위하여 조화지반가속도와 El Centro (1940) 및 Northridge (1994) 지진하중을 사용하였다. 해석결과 수동 TMD에 의해서 아치구조물의 지진응답을 효과적으로 저감시킬 수 있었으며 STMD를 사용하면 수동 TMD 보다 더욱 우수한 응답저감효과를 얻을 수 있는 것을 확인하였다.

Abstract

In this study, the possibility of seismic response control of semi-active tuned mass damper (TMD) for spatial structures has been investigated. To this end, an arch structure was used as an example structure because it has primary characteristics of spatial structures and it is a comparatively simple structure. A TMD and semi-active TMD were applied to the example arch structure and the seismic control performance of them were evaluated based on the numerical simulation. In order to regulate the damping force of the semi-active TMD, groundhook control algorithm, which is widely used for semi-active control, was used. El Centro (1940) and Northridge (1994) earthquakes and harmonic ground motion were used for performance evaluation of passive TMD and semi-active TMD. Based on the analytical results, the passive TMD could effectively reduce the seismic responses of the arch structure and it has been shown that the semi-active TMD more effectively decreased the dynamic responses of the arch structure compared to the passive TMD with respect to all the excitations used in this study.

키워드 : 진동제어, 아치구조물, 준능동 TMD, 지진응답, 그라운드훅

Keywords : Vibration control, Arch structure, Semi-active TMD, Seismic response, Groundhook

1. 서론

일반적으로 대공간 구조물은 자중이 작은 장경간의 구

조물로서 고유진동주기가 다소 길게 나타나며 일반적인 빌딩건물과는 상이한 동적특성을 가지고 있다. 일반적인 고층건물은 캔틸레버 모델로 간략화하여 모드형상 및 동적거동을 예측할 수 있지만 대공간 구조물은 캔틸레버와는 전혀 다른 동적특성을 지나고 있으므로 이에 대한 다수의 연구가 수행되고 있다¹⁻³⁾. 대공간 구조물의 동적 특성에 대한 기존의 연구를 살펴보면 대공간 구조물은 그 형

* 정회원 · 영남대학교 건축학부 부교수

** 정회원 · 서일대학 건축과 조교수

*** 정회원 · 신문대학교 건축학부 조교수

Tel : 031-530-2315 Fax:031-530-2839

E-mail : hskim72@sunmoon.ac.kr

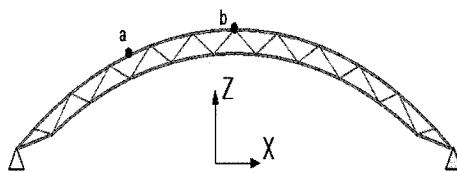
태적 특성으로 인하여 수평방향 지진하중에 의하여 수평 방향 진동보다 수직방향의 진동이 더 크게 발생하는 것을 알 수 있다⁴⁻⁵⁾. 대공간 구조물은 주로 다수의 사람들이 이용하는 경기장이나 관람, 집회시설로 사용되기 때문에 지진하중에 의하여 구조물이 손상된다면 매우 심각한 인명 피해가 예상되므로 대공간 구조물의 지진응답을 최소화 하기 위한 내진, 제진, 면진 등의 다양한 연구가 수행되고 있다.

본 연구에서는 지진하중을 받는 대공간 구조물에 대한 준능동 동조질량감쇠기(Semi-active Tuned Mass Damper; STMD)의 진동제어성능을 검토하고자 한다. TMD는 진동을 제어하고자하는 주 시스템에 설치되어 주 시스템의 진동방향과 반대로 움직여서 진동을 제어하는 장치로서 특정한 진동수성분을 주로 갖는 동적하중에 대하여 뛰어난 성능을 발휘하는 것으로 알려져 있다. 근래에는 일반적인 TMD의 개념을 더욱 발전시켜서 여러 가지 진동수 성분을 갖는 임의의 동적하중인 지진하중이나 풍하중에 대해서 보다 효과적인 제어성능을 나타내기 위하여 복수의 TMD(Multiple Tuned Mass Damper; MTMD)에 대한 연구나 가력장치(actuator)를 이용하여 원하는 제어력을 얻을 수 있는 ATMD(Active TMD)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 가력장치와 같은 능동 제어장치를 사용하면 엔지니어가 원하는 제어력을 용이하게 얻을 수 있으므로 일반적인 수동 TMD에 비하여 뛰어난 제어효과를 얻을 수 있다. 그러나 이러한 능동제어 장치를 구성하기 위해서는 많은 초기비용뿐만 아니라 이후 지속적인 운전을 위해서는 많은 전력이 소모되므로 유지보수에도 상당한 비용이 소요되고, 또한 제어력도 구조물에 가해지는 하나의 외력이므로 구조시스템을 불안정하게 할 가능성이 있다. 따라서 최근에는 건축 및 토목 구조물의 진동제어를 위하여 수동제어 시스템이 가지고 있는 신뢰성(reliability) 뿐만 아니라 능동제어 기법의 장점인 적응성(adaptability)을 확보할 수 있는 준능동 제어장치에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 지금까지 몇몇의 연구자들에 의하여 준능동 제어장치로 TMD를 구성함으로써 TMD의 성능을 개선시키고자 하는 노력이 수행되었고 그 필요성과 가능성이 제시되었다. 그러나 대부분의

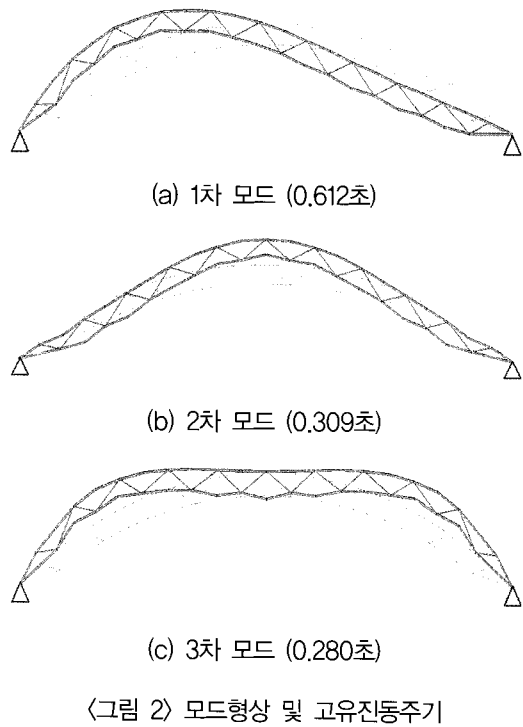
연구가 일반적인 빌딩 건물의 횡방향 진동제어나 슬래브의 연직진동 제어에 집중되어 있고 대공간 구조물에 대한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 준능동 제어장치를 이용하여 STMD를 구성하고 대공간 구조물에 대한 STMD의 제어성능을 검토해 보고자 한다. 일반적인 TMD를 구성하고 있는 수동 감쇠기를 대신하여 준능동 감쇠기를 사용한 STMD는 구조물의 응답에 따라서 실시간으로 TMD의 감쇠를 변화시킬 수 있으므로 수동 TMD보다 효과적인 진동제어 성능을 나타낼 수 있을 것으로 기대되는 새로운 형태의 제어장치이다. 본 연구의 대상 구조물로는 대공간구조물의 기본적인 동적특성을 가지고 있으며 동시에 가장 간단한 구조이기도 한 아치구조물을 사용하였고 TMD 및 STMD를 설치하여 각각 장치의 지진응답 제어성능을 평가하였다. STMD가 설치된 아치구조물의 동적응답을 효과적으로 제어하기 위해서는 STMD 및 구조물의 동적응답에 따라서 준능동 감쇠기의 감쇠력을 실시간으로 조절하는 것이 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 준능동 제어알고리즘으로 널리 사용되고 있는 그라운드훅(groundhook)⁶⁾ 제어알고리즘을 사용하였다. 수치해석을 위하여 El Centro (1940) 및 Northridge (1994) 지진하중을 사용하였고 공진 조화지반가속도를 사용하여 가장 피해가 클 것으로 예상되는 공진하중에 대한 TMD와 STMD의 성능을 검토하였다.

2. 아치 예제구조물

본 연구에서는 <그림 1>에 나타낸 트러스 아치구조물을 대공간 예제구조물로 사용하였다. 예제 트러스 아치의 경간은 60m, 높이는 8m이며 트러스 아치의 춤은 2m이다. 트러스 아치의 상현재와 하현재는 $\phi 216.3 \times 4.5$, 사재는 $\phi 101.6 \times 3.2$ 크기의 파이프로 구성되어 있다. 예제구조물의 동적특성은 일반적인 트러스 아치구조물의 동적특성을 보이고 있다.



<그림 1>. 트러스 아치 예제구조물



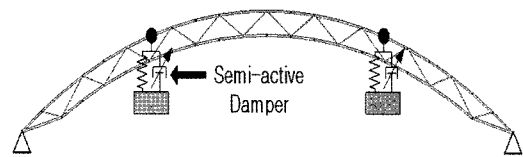
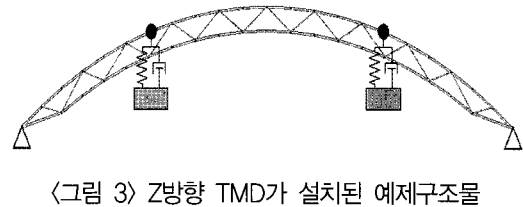
예제 아치구조물의 주요 저차모드 형상을 보면 1차 모드형상은 역대칭모드를 나타내고 2차 및 3차 모드형상은 대칭모드를 나타낸다. 그림을 보면 대칭모드는 주로 수직방향 지진하중에 반응하여 구조물이 상하로 진동하는 지진응답이 발생하는데 기여할 것으로 생각되며 역대칭모드인 1차모드는 주로 수평방향 지진하중에 대하여 응답이 크게 발생할 것으로 예상된다. 그러나 대칭 또는 역대칭 모드에 관계없이 구조물의 수평방향 진동보다는 수직방향 진동이 더 크게 발생할 것이라는 것을 모드형상을 통해서 예측할 수 있다. 이러한 특성 때문에 대공간 구조물은 일반 라멘구조와 달리 수평지진하중에 의하여 수평방향 응답뿐만 아니라 수직방향응답도 크게 발생하는 것으로 알려져 있다⁵⁾

3. STMD를 이용한 아치구조물의 제어

3.1 STMD가 설치된 예제구조물

본 연구에서는 트러스 아치 예제구조물의 지진응답 제어를 위하여 TMD 및 STMD를 사용한다. TMD와 STMD는 예제구조물의 저차모드 형상을 기초로 하여 수평 및 수직변위가 가장 많이 발생하는 트러스 경간의 1/4

지점에 각각 하나씩, 총 두 개를 설치하였고 이를 〈그림 3〉과 〈그림 4〉에 나타내었다. 모드형상에 근거하여 트러스 아치구조물은 수직방향 진동이 크게 발생할 것으로 예측되므로 그림에서 보는 바와 같이 TMD 및 STMD를 Z 방향(수직 방향)으로 설치하였다. STMD는 〈그림 4〉에 나타난 바와 같이 TMD를 구성하는 수동 감쇠기대신에 준능동 감쇠기를 사용하여 구성된다.



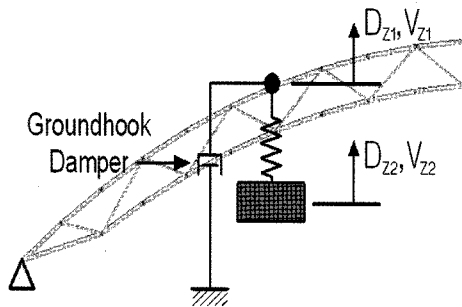
〈그림 4〉 Z방향 STMD가 설치된 예제구조물

본 연구에서는 예제 아치구조물의 감쇠비를 3%로 가정해서 수치해석을 수행하였다. 예제 구조물의 총질량은 40.6 kgf/g이고 TMD 및 STMD의 질량은 구조물 총질량의 1%인 0.406 kgf/g로 하였다. TMD의 최적 감쇠비 및 진동수비에 대한 연구는 기존에 많이 수행되어 왔다. 본 연구에서는 Warburton⁹⁾이 제안한 $\sqrt{(1-\mu/4)/(4(1+\mu)(1-\mu/2))}$ 를 TMD의 최적 감쇠비로 $\sqrt{(1-\mu/2)/(1+\mu)}$ 를 최적 진동수비로 사용하였다. 여기서 μ 는 TMD와 주구조물의 질량비로서 본 연구에서는 1%이다. 이렇게 계산한 최적 감쇠비가 4.98%이고 TMD의 진동수는 1.613 Hz이다. STMD의 최대 감쇠비는 30%로 하였고 진동수는 TMD와 동일하게 1.613 Hz로 하였다.

3.2 그라운드훅 제어알고리즘

본 연구에서는 STMD를 구성하는 준능동 감쇠기의 감쇠력을 제어하기 위해서 전통적인 준능동 제어알고리즘인 그라운드훅(groundhook) 제어알고리즘을 사용하였다. 이 알고리즘을 설명하기 위하여 아치 구조물에 설치된 TMD의 이상적인 그라운드훅 시스템을 〈그림 5〉에 나타내었다. 아치 구조물의 응답을 감소시키기 위하여

수동 감쇠기를 구조물과 땅(그라운드) 사이에 연결한 것을 볼 수 있다. 이러한 가상의 시스템이 존재한다면 그라운드혹 댄퍼는 다양한 외부의 동적하중에 대하여 아치 구조물이 정상 평형상태에서 벗어나려는 것을 방해하는 역할을 하게 된다. 그러나 이러한 시스템은 실제 구현이 불가능하기 때문에 본 연구에서는 <그림 4>에 나타난 STMD를 이용하여 가상의 그라운드혹 시스템을 모사한다. 즉, 그라운드혹 제어알고리즘의 목적은 <그림 5>에 나타난 그라운드혹 감쇠기가 발휘하는 감쇠력을 <그림 4>에 나타난 STMD를 구성하는 준능동 감쇠기를 이용하여 제공하는 것이다. 그라운드혹 제어알고리즘은 평형위치에 대한 아치 구조물의 변위(D_{Z1})와 아치 구조물과 STMD의 상대속도(V_{Z1}-V_{Z2})의 관계를 이용하여 정의된다. 이때 상대속도가 음수이면 STMD와 구조물이 분리되는 방향으로 움직이는 것을 의미하며 감쇠기에는 인장력이 발생하게 되고 반대로 상대속도가 양수이면 감쇠기에는 압축력이 발생하게 된다. 또한 주구조물의 중심이 평형상태의 위쪽에 있으면 변위(D_{Z1})가 양수이고, 아래쪽에 있으면 음수이다. 이러한 정의를 이용해서 그라운드혹 알고리즘은 식 (1)과 (2)로 간단하게 정리될 수 있다. 여기서 *C_{Controllable}* 은 준능동 감쇠기의 감쇠력을 의미하며 *C_{max}* 는 감쇠기의 최대 감쇠값, *C_{min}* 은 감쇠기의 최소 감쇠값을 의미한다. 식의 구성을 보면 알 수 있듯이 그라운드혹 제어알고리즘은 비교적 간단한 연산으로 STMD를 제어할 수 있으므로 실시간 제어에 매우 유리하다. 본 연구에서는 이 그라운드혹 제어알고리즘을 이용하여 STMD의 구성성분인 준능동 감쇠기의 감쇠력을 조절한다.



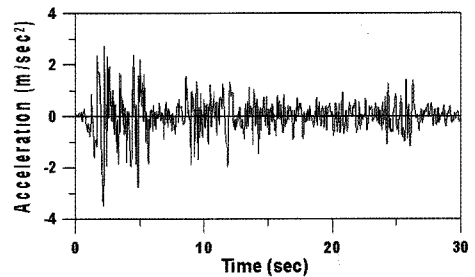
<그림 5> 아치 구조물에 설치된 STMD의 제어를 위한 그라운드혹 시스템

$$D_{Z1}(V_{Z1}-V_{Z2}) \geq 0 \rightarrow C_{Controllable} = C_{max} \quad (1)$$

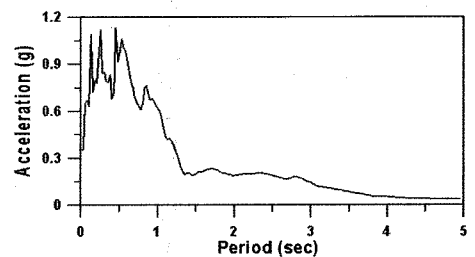
$$D_{Z1}(V_{Z1}-V_{Z2}) < 0 \rightarrow C_{Controllable} = C_{min} \quad (2)$$

3.3 지진하중 및 조화지반가속도

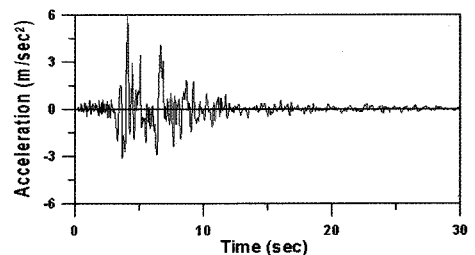
본 연구에서는 수치해석을 위하여 El Centro (1940, NS) 지진하중과 Northridge (1994, N90S) 지진하중을 수평방향으로 가하여 시간이력해석을 수행하였다. El Centro 지진하중과 Northridge 지진하중의 시간이력 및 응답스펙트럼 그래프를 <그림 6-9>에 각각 나타내었다. 응답스펙트럼 생성시 구조물의 감쇠비는 예제 구조물의 감쇠비와 같은 3%를 사용하였다. 응답스펙트럼 그림에서 볼 수 있듯이 지진하중은 대부분 1초 이내의 주기를 가지는 구조물에서 큰 응답을 유발하므로 주요 진동모드의 주기가 1초 이내인 대공간 구조물에 큰 영향을 미칠 수 있다는 것을 예측할 수 있다.



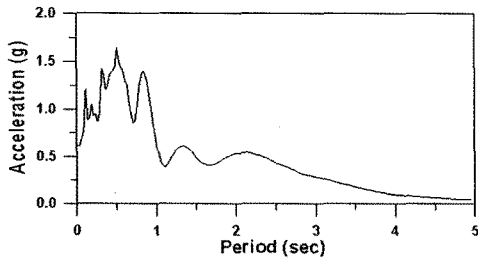
<그림 6> El Centro 지진하중의 시간이력



<그림 7> El Centro 지진하중의 응답스펙트럼

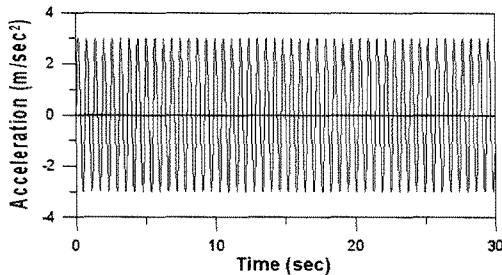


<그림 8> Northridge 지진하중의 시간이력



〈그림 9〉 Northridge 지진하중의 응답스펙트럼

동적하중에 대하여 구조물에 가장 큰 피해가 발생하는 경우는 구조물에 공진이 발생할 때 이다. 이렇게 구조물에 가장 큰 피해를 입힐 수 있는 지반운동이 발생할 경우를 가정하고 이러한 경우에 TMD 및 STMD의 동적응답 저감효과를 검토하기 위하여 〈그림 7〉에 나타난 조화지반가속도를 사용하였다. 조화지반가속도의 최대값은 3.0m/sec^2 으로하였고 조화지반가속도의 진동주기를 예제 아치구조물의 1차모드 진동주기와 같게 두어 공진을 유발하였다. 수치해석은 Matlab과 Simulink를 이용하여 수행하였고 모든 하중에 대해 0.005초의 시간간격을 사용하였다.



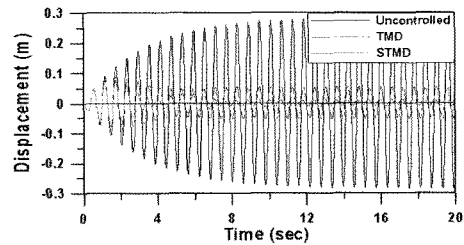
〈그림 10〉 공진 조화 지반가속도의 시간이력

4. 지진하중을 받는 아치 구조물에 대한 STMD의 제어성능 평가

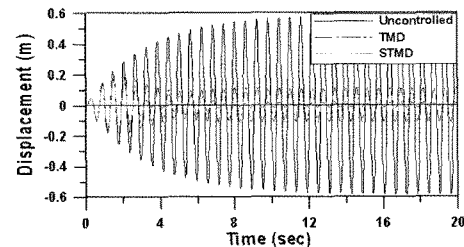
4.1 공진 조화 지반가속도에 대한 제어성능

공진 조화지반가속도가 예제 아치구조물에 가해질 때 〈그림 1〉의 'a' 점과 'b' 점의 변위시간이력을 〈그림 11-13〉에 나타내었다. 각각의 그래프에서는 제어장치가 설치되지 않은 경우의 응답(Uncontrolled)과 TMD 및 STMD가 설치된 경우의 응답을 비교하였다. 그림에서 'a' 점의 응답을 보면 수평방향 지진하중이 가해질 때에도 수평방향(X방향) 응답보다는 수직방향(Z방향) 응답이

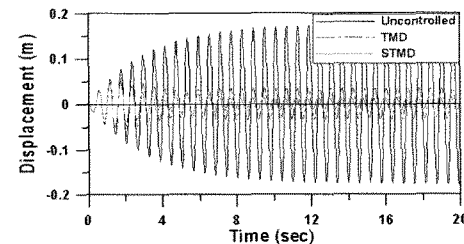
2배가량 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 전술한 바와 같이 이것은 일반 빌딩 건물과 구별되는 대공간 구조물의 동적 특성이다. 그림을 보면 공진 조화지반가속도에 대해서는 비교하는 응답의 위치나 방향에 관계없이 TMD와 STMD가 매우 효과적으로 아치구조물의 응답을 저감시킬 수 있는 것을 확인할 수 있다. 특히 천이상태를 지나 정상상태에 도달하면 구조물 응답의 차이가 분명하게 드러나는데 평균적으로 TMD는 제어하지 않은 상태의 응답을 약 80% 줄일 수 있음을 확인할 수 있었다. 특히 STMD는 TMD에 의해서 제어된 구조물의 동적 변위 응답을 약 60% 더 줄일 수 있었다. 따라서 대공간 구조물에 큰 피해가 발생할 수 있는 공진상태가 발생할 때 TMD와 STMD는 매우 우수한 제어성능을 발휘하고 특히 STMD는 수동 TMD에 비해서 2배 이상의 개선된 성능을 나타내는 것을 알 수 있다.



〈그림 11〉 조화지반가속도에 대한 예제구조물 'a' 점의 X방향 변위시간이력



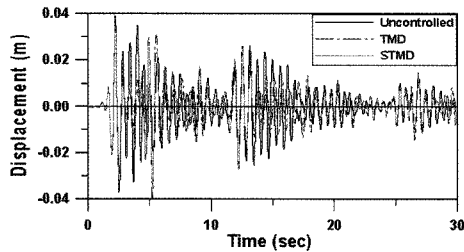
〈그림 12〉 조화지반가속도에 대한 예제구조물 'a' 점의 Z방향 변위시간이력



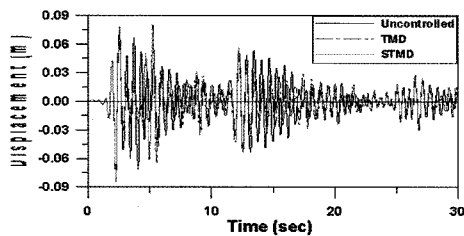
〈그림 13〉 조화지반가속도에 대한 예제구조물 'b' 점의 X방향 변위시간이력

4.2 지진하중에 대한 제어성능

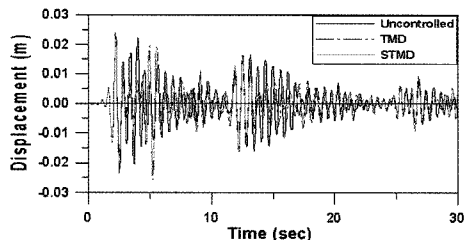
EI Centro 지진하중이 가해질 때 예제 아치구조물의 동적 변위응답을 TMD 및 STMD를 설치하였을 경우와 그렇지 않았을 경우를 비교하여 <그림 14-16>에 나타내었다. 그래프를 통한 정성적인 비교와 더불어 제어성능의 정량적인 검토를 위하여 <표 1>과 <표 2>에 'a' 점과 'b' 점의 각 방향별 변위 및 가속도응답의 최대값과 RMS 값을 나타내었다. 그래프를 보면 전반적으로 제어하지 않은 경우보다는 TMD를 사용해서 제어한 경우의 응답이 줄어드는 것을 알 수 있고 TMD보다는 STMD가 더욱 우수한 제어성능을 나타내는 것을 알 수 있다. 하지만 그 차이가 공진 조화지반가속도를 가했을 때보다는 작다. 이를 통해서 구조물에 가해지는 동적하중이 주구조물의 공진대역과 일치하는 성분을 주로 포함하고 있다면 TMD와 STMD의 제어성능이 더 많은 차이를 나타낼



<그림 14> EI Centro 지진에 대한 예제구조물 'a' 점의 X방향 변위시간이력



<그림 15> EI Centro 지진에 대한 예제구조물 'a' 점의 Z방향 변위시간이력



<그림 16> EI Centro 지진에 대한 예제구조물 'b' 점의 X방향 변위시간이력

것이고 공진에 의한 피해를 크게 줄일 수 있을 것으로 예측할 수 있다.

<표 1>과 <표 2>를 보면 변위 응답뿐만 아니라 가속도 응답에 대해서도 STMD가 TMD보다 우수한 제어성능을 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 최대치 응답과 더불어 RMS 응답을 줄이는데도 매우 효과적인 성능을 발휘하였다. 본 연구에서는 대칭의 아치구조물에 수평방향 지진하중만을 가해서 해석을 수행하였으므로 아치의 중앙점('b' 점)에서 Z방향 응답은 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

<표 1> EI Centro 지진하중에 대한 최대 응답치

응답	위치	방향	Uncon	TMD	STMD
변위 (m)	'a' 점	X	0.0393	0.0361	0.0361
		Z	0.0850	0.0802	0.0785
	'b' 점	X	0.0240	0.0257	0.0224
		Z	0.0000	0.0000	0.0000
가속도 (m/s ²)	'a' 점	X	7.5384	7.4532	7.2333
		Z	18.4640	17.7460	17.3730
	'b' 점	X	8.3019	9.3584	9.1233
		Z	0.0000	0.0000	0.0000

<표 2> EI Centro 지진하중에 대한 RMS 응답치

응답	위치	방향	Uncon	TMD	STMD
변위 (m)	'a' 점	X	0.0104	0.0088	0.0077
		Z	0.0214	0.0184	0.0160
	'b' 점	X	0.0065	0.0054	0.0047
		Z	0.0000	0.0000	0.0000
가속도 (m/s ²)	'a' 점	X	1.3689	1.1799	1.1236
		Z	2.8544	2.4701	2.4647
	'b' 점	X	1.4835	1.4188	1.4059
		Z	0.0000	0.0000	0.0000

Northridge 지진하중에 대한 제어장치별 구조물의 응답을 <그림 17-19>에 나타내었다. 그래프를 보면 EI Centro 지진하중의 경우보다 TMD와 STMD의 제어효

과가 더 우수한 것을 알 수 있다. 이것은 전술한 바와 같이 Northridge 지진하중의 진동수 성분 중 아치 구조물의 공진대역과 일치하는 성분이 많이 포함되어 있음을 의미한다. 즉, Northridge 지진하중에 의한 구조물의 동적응답이 El Centro 지진하중의 경우보다 크다. 공진 조화지반가속도가 가해진 경우에 천이상태보다는 정상상태에서 STMD와 TMD의 제어성능이 효과적으로 나타났던 것을 확인하였고 지진하중이 가해진 경우에도 지진하중이 가해지기 시작했을 때보다는 어느 정도 구조물에 동적응답이 발생한 이후부터 STMD와 TMD의 제어성능이 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 능동제어장치와는 달리 수동 및 STMD는 외부의 하중에 의하여 TMD의 질량이 움직이면서 제어에 필요한 힘을 얻을 수 있기 때문이다. 제어의 효율성에도 불구하고 능동제어장치는 지진하중이 가해져서 구조물에 피해가 발생하여 전원공급이

끊어지면 전혀 제어성능을 발휘하지 못하는 반면에 STMD는 전원공급이 끊어져도 수동 TMD과 동일한 제어성능을 발휘할 수 있는 장점이 있다.

또한 능동 제어장치를 사용하여 충분한 제어력을 얻기 위해서는 큰 전력이 필요하지만 준능동 제어장치의 경우에는 건전지와 같은 작은 전력으로도 운용이 가능하므로 매우 효과적이다.

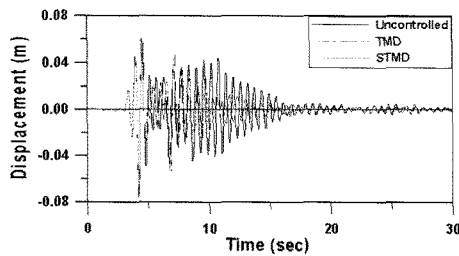
5. 결론

본 연구에서는 지진하중을 받는 대공간구조물의 동적응답을 저감시키기 위한 STMD의 활용가능성을 검토하여 보았다. 이를 위하여 아치 구조물을 예제구조물로 선택하였고 예제구조물에 수동 TMD 및 STMD를 설치하여 지진응답 제어성능을 평가하였다.

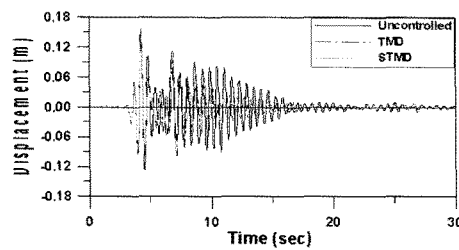
조화지반가속도를 아치 구조물에 가하여 공진이 발생했을 때 TMD 및 STMD는 구조물의 동적응답을 매우 효과적으로 줄일 수 있었다. 특히 STMD는 수동 TMD에 비해서 매우 개선된 제어성능을 나타내었다. 본 논문에서 TMD 및 STMD는 수직방향으로 설치되었지만 수직방향 뿐만 아니라 수평방향 동적응답도 매우 효과적으로 저감시킬 수 있는 것을 확인하였다. El Centro 지진하중에 대해서도 응답점의 위치 및 응답방향에 관계없이 STMD가 매우 효과적인 제어장치로 활용될 수 있음을 확인하였다. 특히, 아치경간 1/4지점에서의 수직방향 RMS 변위는 13%정도 더 줄일 수 있었다. 또한, El Centro 지진하중보다 더 큰 지진응답을 유발하는 Northridge 지진하중에 대해서 더 우수한 제어성능을 발휘하였다. 따라서 공진 등으로 인하여 구조물에 큰 응답이 예상되는 지진하중에 대하여 STMD가 보다 효과적인 제어성능을 나타낼 것으로 기대된다.

-감사의 글-

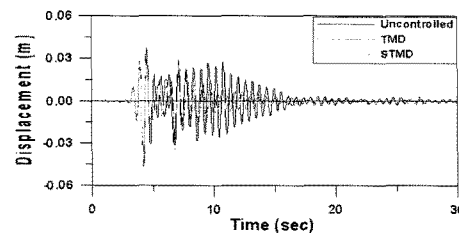
본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호# '06 건설핵심 B03)에 의해 수행되었습니다.



〈그림 17〉 Northridge 지진에 대한 예제구조물 'a' 점의 X방향 변위시간이력



〈그림 18〉 Northridge 지진에 대한 예제구조물 'a' 점의 Z방향 변위시간이력



〈그림 19〉 Northridge 지진에 대한 예제구조물 'b' 점의 X방향 변위시간이력

—참고문헌—

1. Arjang Sadeghi (2004), Horizontal Earthquake Loading and Linear/Nonlinear Seismic Behavior of Double Layer Barrel Vaults, International Journal of Space Structure, Vol.19, No.1, pp.21-37.
2. Ikuo Tatemich and Mamoru Kawaguchi (2000), A New Approach to Seismic Isolation: Possible Application in Space Structures, International Journal of Space Structure, Vol.15, No.2, pp.145-154.
3. Hassan A. Moghaddam (2000), Seismic Behavior of Space Structures, International Journal of Space Structure, Vol.15, No.2, pp.119-135.
4. 강주원, 정찬우 (2008), “대공간 건축물의 형태별 지진거동 특성”, 한국공간구조학회지 학술기사, 제 8권, 1호, pp.5-12.
5. 김기철, 김광일, 강주원 (2008), “면진 트리스-아치 구조물의 지진거동분석”, 한국공간구조학회 논문집, 제8권, 2호, pp.73-84.
6. J.H. Koo (2003), Using magneto-rheological dampers in semiactive tuned vibration absorbers to control structural vibrations. Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA.
7. G.B. Warburton (1982), Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters, Earthquake Engrg. and Struct. Dyn., 10, pp. 381-401.

- ▶ 접수일자 : 2010년 1월 14일
- ▶ 심사 완료일자 : 2010년 2월 8일
- ▶ 게재 확정일자 : 2010년 2월 10일