

# 다중 스마트 TMD를 이용한 대공간 아치구조물의 지진응답 제어

## Seismic Response Control of Spacial Arch Structures using Multiple Smart TMD

김 현 수\*  
Kim, Hyun-Su

강 주 원\*\*  
Kang, Joo-Won

### Abstract

A novel vibration control method for vibration reduction of a spacial structure subjected to earthquake excitation was proposed in this study. Generally, spatial structures have various vibration modes involving high-order modes and their natural frequencies are closely spaced. Therefore, in order to control these modes, a spatially distributed MTMDs (Multiple TMDs) method is proposed previously. MR (Magnetorheological) damper were used to enhance the control performance of the MTMDs. Accordingly, MSTMDs (Multiple Smart TMDs) were proposed in this study. An arch structure was used as an example structure because it has primary characteristics of spatial structures and it is a comparatively simple structure. MSTMDs were applied to the example arch structure and the seismic control performance were evaluated based on the numerical simulation. Fuzzy logic control algorithm (FLC) was used to generate command voltages sent for MSTMSs and the FLC was optimized by genetic algorithm. Based on the analytical results, it has been shown that the MSTMDs effectively decreased the dynamic responses of the arch structure subjected to earthquake loads.

*Keywords : Spacial arch structure, Seismic response control, Multiple smart TMD, Fuzzy logic controller, Genetic algoritrhm*

## 1. 서론

일반적으로 대공 간구조물은 매우 우수한 하중전달성능을 가지고 있기 때문에 골조형식의 일반적인 빌딩구조물에 비해서 경량화가 가능하다. 이에 따라서 강한 지진하중에 대해서도 일반적으로 대공간 구조물이 골조건물에 비해서 보다 안전한 것으로 알려져 왔다. 따라서 지진이 발생한 지역에서 피난처 및 구호활동을 위한 장소로서 체육관이나 강당 같은 대공간 구조시스템이 적용된 건축물이 사용되고 있다. 그러나 강진지역에서 보고된 대공간 구조

물의 피해사례를 살펴보면 구조물 자체의 국부적인 손상뿐만 아니라 천장이나 조명 등과 같은 지붕구조물에 매달린 물체의 낙하로 인하여 지진 후 응급피난 대피소로서 사용되지 못하는 사례가 종종 나타나고 있다<sup>1,2)</sup>. 따라서 고강성 및 상대적으로 작은 자중으로 인하여 지진하중에 대해서 비교적 안전하다고 평가받는 대공간 구조물에 대해서 진동제어 장치를 활용하여 지진응답을 저감시키는 것에 대한 필요성이 제기되고 있다<sup>3)</sup>.

일반적인 캔틸레버 형태의 빌딩구조물의 동적거동은 몇 개의 주요 저차모드에 의해서 지배되는 특성을 보이지만 대공간 구조물은 많은 수의 고차 진동모드가 동적특성에 영향을 미치게 된다. 따라서 일반 고층건물의 지진응답 제어를 위해서는 가장 지배적인 1차모드의 고유진동주기에 조율한 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper; TMD)가 매우 효과

\* 정희원, 선문대학교 건축사회환경학부 부교수, 공학박사  
Div. of Architecture, Architectural & Civil Engineering,  
Sunmoon University.

\*\* 교신저자, 종신회원, 영남대학교 건축학부 교수, 공학박사  
School of Architecture, Yeungnam University  
Tel: 053-810-2429 Fax: 053-810-4625  
E-mail: kangj@ynu.ac.kr

적으로 활용되고 있다<sup>4,5)</sup>. 그러나 대공간 구조물은 다양한 진동모드의 영향으로 대단히 복잡한 동적거동을 나타내기 때문에 인반 건축구조물과는 달리 하나의 TMD만으로는 지진응답을 효과적으로 제어할 수 없다. 따라서, 공간적으로 분포된 MTMD를 이용하여 대공간 구조물의 지진응답을 제어하고자 하는 연구가 진행되었다<sup>6,7)</sup>. 기존의 연구에서는 MTMD를 이용해서 대공간 구조물의 지진응답을 매우 효과적으로 제어할 수 있을 보여주었다. 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 제어성능을 향상시키기 위하여 가력장치(actuator)를 이용하여 원하는 제어력을 얻을 수 있는 ATMD (Active TMD)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 능동 제어장치를 사용하면 일반적인 수동 TMD에 비하여 뛰어난 제어효과를 얻을 수 있지만 초기비용뿐만 아니라 이후 지속적인 운전을 위해서는 많은 전력이 소모되므로 유지보수에도 상당한 비용이 소요된다. 따라서 최근에는 건축 및 토목 구조물의 진동 제어를 위하여 수동제어 시스템이 가지고 있는 신뢰성(reliability) 뿐만 아니라 능동제어 기법의 장점인 적응성(adaptability)을 확보할 수 있는 MR (Magnetorheological) 감쇠기와 같은 스마트 제어장치에 대한 연구가 활발히 진행 중이다<sup>8,9)</sup>.

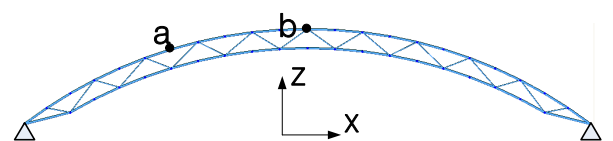
일반적인 빌딩구조물의 횡방향 지진응답이나 슬래브의 연진방향 진동을 제어하기 위해서 준능동 스마트 TMD가 제안되었고 매우 효과적인 제어성능을 나타내는 것으로 알려졌다<sup>10,11)</sup>. 그러나 이러한 스마트 TMD를 이용하여 대공간 구조물의 지진응답을 제어하고자하는 연구는 아직 국내외적으로 발표된 사례를 찾기 어렵다. 강주원 등의 연구<sup>12)</sup>에서는 준능동 TMD를 이용하여 대공간 아치구조물의 지진응답 제어성능을 검토하였으나 감쇠장치의 물리적 특성을 고려하지 않은 이상적인 준능동 감쇠장치를 사용한 한계가 있었다.

이에 본 연구에서는 실제 구조물의 진동제어에 적용되어 널리 사용되고 있는 MR 감쇠기를 사용하

여 구성한 MSTMD를 제안하였고 대공간 구조물에 대한 지진응답 제어성능을 검토하여 보았다. MSTMD가 설치된 아치구조물의 동적응답을 효과적으로 제어하기 위해서는 MSTMD 및 구조물의 동적응답에 따라서 MR 감쇠기의 감쇠력을 실시간으로 조절하는 것이 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 계산이 단순하면서도 효과적인 제어성능을 나타내는 것으로 알려진 그라운드훅(groundhook)<sup>13)</sup> 제어알고리즘을 사용하였다. 제어성능의 검토를 위하여 역사지진인 El Centro (1940) 및 Northridge (1994) 지진하중을 사용하였다. 또한 중약진지역의 특성을 가진 국내지반을 고려하여 국내 설계기준 (KBC2009)을 바탕으로 생성한 인공지진하중을 사용하였고 공진 조화지반가속도를 사용하여 가장 피해가 클 것으로 예상되는 공진하중에 대한 MSTMD의 성능을 검토하였다.

## 2. 예제구조물 및 지진하중

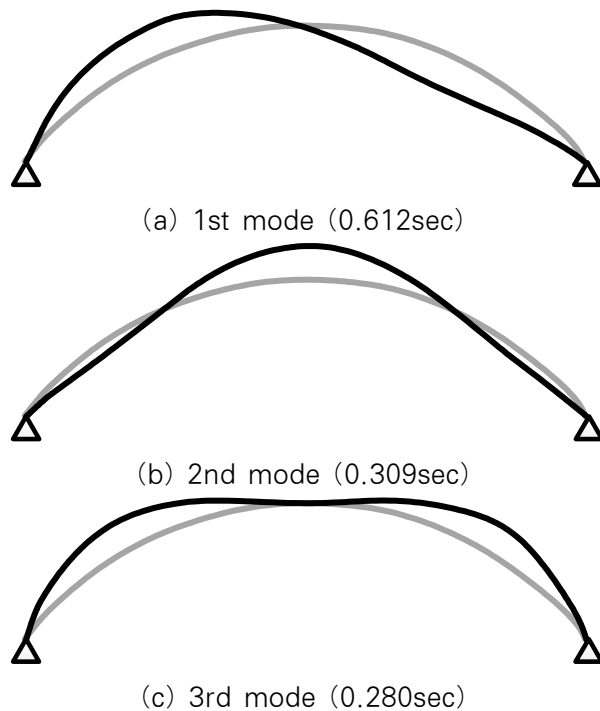
본 논문에서는 선행연구<sup>12)</sup>에서 사용한 트러스 아치구조물을 공간 예제구조물로 사용하였고 <Fig. 1>에 나타내었다. 예제 트러스 아치의 경간은 60m, 높이는 8m이며 트러스 아치의 춤은 2m이다. 트러스 아치의 상현재와 하현재는  $\varnothing 216.3 \times 4.5$ , 사재는  $\varnothing 101.6 \times 3.2$  크기의 파이프를 구성되어 있다. 예제 구조물의 동적특성은 일반적인 트러스 아치구조물의 동적특성을 보이고 있다.



<Fig. 1> Truss arch example structure

예제 트러스 아치구조물의 저차모드 모드형상과 모드별 고유진동주기를 <Fig. 2>에 나타내었다. 모드별 진동주기를 보면 구조물의 지진응답에 많은 영향을 미치는 저차모드의 주기가 일반적인 지진하중의 지반가속도 스펙트럼이 매우 커지는 1초 이내에 존재하는 것을 알 수 있다. 따라서 지진하중에 대하여 대공간 아치구조물의 동적응답이 작지 않게

발생하리라는 것을 예측할 수 있다.

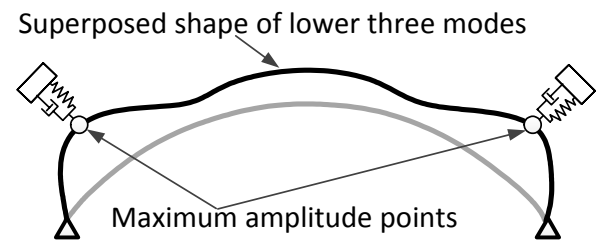


<Fig. 2> Mode shapes and natural periods

구조물의 동적응답을 제어하기 위해서 동조질량 감쇠기를 설치할 때 설치위치를 선정하는 것이 가장 중요한 일이다. TMD의 설치위치는 동적하중에 의한 진폭이 가장 큰 위치를 선택하는 것이 일반적이다. 이를 파악하기 위해서 예제 아치구조물의 주요 저차모드 형상을 보면 1차 모드형상은 역대칭모드를 나타내고 2차 및 3차 모드형상은 대칭모드를 나타내는 것을 볼 수 있다. 그림을 보면 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 응답보다 오히려 수직방향응답이 크게 발생하는 것으로 알려져 있다<sup>14)</sup>.

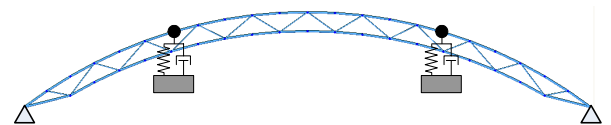
아치구조물의 동적변위는 주요 저차모드에서 발생하는 변위를 중첩해서 대략적으로 예측해 볼 수 있다. 따라서, <Fig. 2>에 나타난 3개의 저차모드 형상을 중첩한 그림을 <Fig. 3>에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 주요 저차모드에 의한 아치구조물의 변형 진폭이 가장 큰 곳은 좌우측 1/4 지점인 것

을 알 수 있다. 설치되는 TMD가 가장 큰 진동제어 효과를 나타내기 위해서는 가장 큰 진폭이 나타나는 방향으로 <Fig. 3>과 같이 TMD를 경사지게 설치하는 것이 바람직하다. 그러나 현실적으로 TMD를 <Fig. 3>과 같이 경사진 상태로 설치하는 것이 불가능하므로 큰 변형을 나타내는 수직방향(Z방향)으로 설치하였다.



<Fig. 3> Superposed mode shape

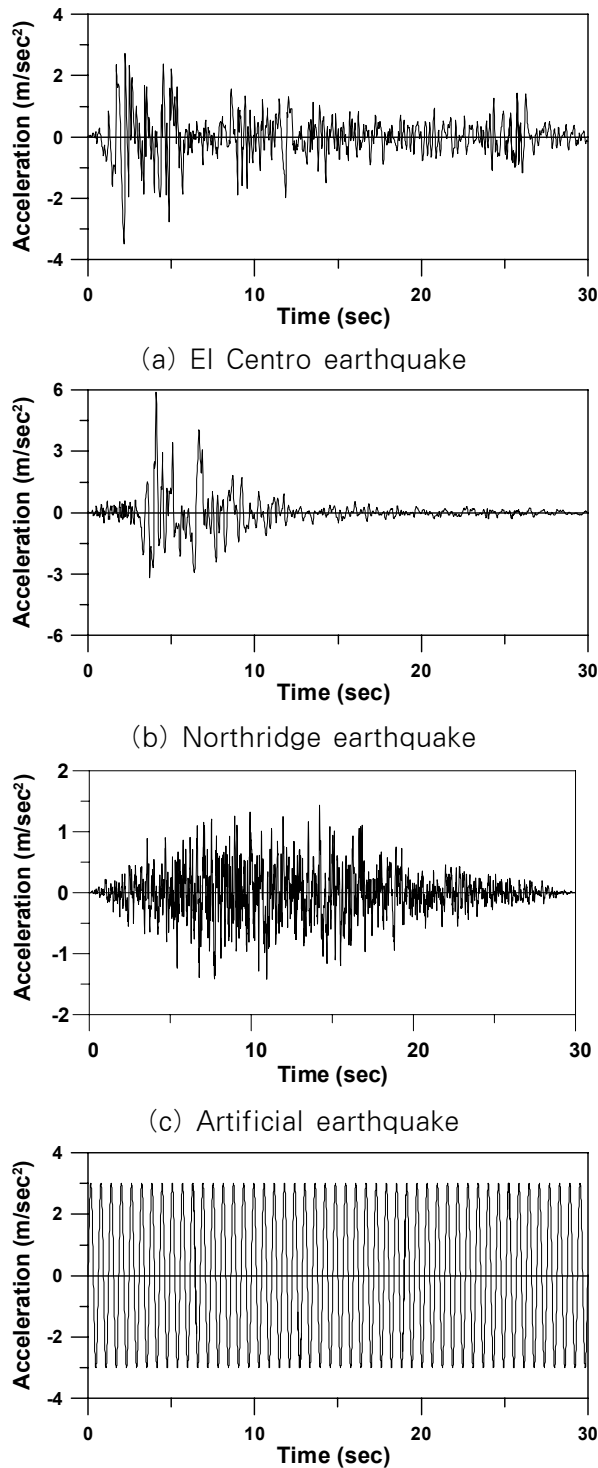
본 논문에서 제안하는 MSTMD의 제어성능을 비교검토하기 위하여 일반적으로 사용하는 MTMD를 사용하였고 이를 <Fig. 4>에 나타내었다. 본 연구에서는 예제 아치구조물의 감쇠비를 3%로 가정해서 수치해석을 수행하였다. 예제 구조물의 총질량은 40.6 kgf/g이고 TMD의 질량은 구조물 총질량의 1%인 0.406 kgf/g로 하였다. TMD의 최적 감쇠비 및 진동수비에 대한 연구는 기존에 많이 수행되어 왔다<sup>15)</sup>. 본 연구에서는 기존 연구를 토대로 TMD의 감쇠비를 4.98%로 하였고 TMD의 진동수는 1.613 Hz로 하였다.



<Fig. 4> Example structure with MTMD

수치해석을 통한 다중 스마트 TMD 제어성능의 검토를 위하여 대표적인 역사지진인 El Centro (1940) 및 Northridge (1994) 지진하중을 사용하였고 중약진지역의 특성을 가진 국내지반을 고려하여 국내 설계기준(KBC2009)을 바탕으로 생성한 인공지진하중을 사용하였다. 또한 일반적으로 공진에 의한 구조물의 피해가 가장 클 것으로 예상되기 때문에 예제구조물의 1차모드 고유진동주기와 일치하는

공진 조화지반가속도를 사용하여 MSTMD의 성능을 검토하였다. 본 연구에서 사용한 4개의 지반가속도의 시간이력을 <Fig. 5>에 나타내었다.

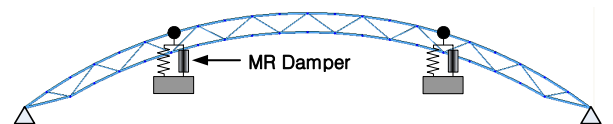


(a) El Centro earthquake  
(b) Northridge earthquake  
(c) Artificial earthquake  
(d) Resonant ground motion  
<Fig. 5> Ground acceleration time histories

인공 지반운동성분을 생성하기 위해 국내 건축구조설계기준(KBC2009)을 바탕으로 설계응답 가속도 스펙트럼을 작성하였고 이를 잘 표현할 수 있는 인공지진을 생성하여 수치해석에 사용하였다. 설계응답 가속도스펙트럼 작성시 지역계수는 0.22, 지반종류는  $S_B$ 의 보통암 지반으로 선택하였다. 생성된 인공지진하중 가속도시간이력 데이터 중의 가장 큰 값(Peak Ground Acceleration; PGA)은 0.144g로서 우리나라에서 주로 발생하는 지진하중의 특성이 고려된 중약진지역의 지진하중으로 생각할 수 있다. 생성된 지진하중의 길이는 30초로 하였고 시간간격은 0.01초로 하였다.

### 3. MSTMD의 구성 및 제어알고리즘

본 논문에서는 MSTMD를 구성하기 위해서 현재 건축 및 토목구조물 제어에 실제 활용되고 있는 스마트 제어장치인 MR 감쇠기를 사용하였다. 이때 <Fig. 5>에 나타낸 바와 같이 일반 MTMD를 구성하는 수동 감쇠기를 대신하여 MR 감쇠기를 사용하였다. MR 감쇠기를 모형화하기 위해서는 일반적으로 사용되는 Bouc-Wen 모델<sup>16)</sup>을 사용하였다. 본 연구에서는 약 300 N의 최대 감쇠력을 가지는 MR 감쇠기를 <Fig. 6>에 나타낸 것처럼 좌측과 우측 아치경간 1/4 지점에 사용하였다. 이 MR 감쇠기의 용량은 예제구조물의 최적제어를 위한 값을 찾기 위해 반복해석을 통하여 결정하였다. MR 감쇠기의 감쇠력은 감쇠기로 전달되는 명령전압에 의해서 결정되는데 사용된 MR 감쇠기는 0 volt의 전압이 전달될 때 최소 감쇠력을 나타내고 5 volt의 전압에서 최대 감쇠력을 나타낸다.



<Fig. 6> Example structure with MSTMD

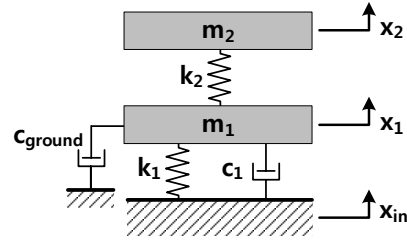
본 논문에서 제안된 MSTMD를 제어하기 위해서 준능동 제어알고리즘으로 널리 사용되고 있는 그라

운드훅(groundhook)<sup>13)</sup> 제어알고리즘을 사용하였다. 지금까지 그라운드훅 제어알고리즘이 여러 가지 형태로 제안되어 왔는데 그중에서 변위기반 on-off 그라운드훅 제어알고리즘을 적용하였다. 그라운드훅 제어알고리즘이 모사하는 이상적인 시스템은 <Fig. 7>에 나타낸 바와 같이 주구조물( $m_1$ )에 댐퍼( $c_{ground}$ )를 설치하고 고정된 지반에 연결시켜서 주구조물의 진동을 저감시킬 수 있는 형태로 되어 있다.

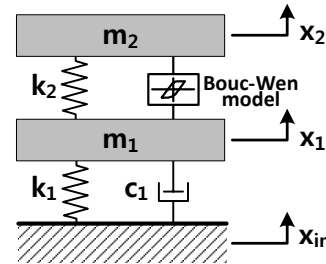
그러나 이러한 시스템은 실제 구현이 불가능하기 때문에 본 연구에서는 <Fig. 8>에 나타낸 STMD를 이용하여 이상적인 그라운드훅 시스템을 모사한다. 즉, 그라운드훅 제어알고리즘의 목적은 <Fig. 7>에 나타낸 그라운드훅 감쇠기가 발휘하는 감쇠력을 <Fig. 8>에 나타낸 STMD를 구성하는 MR 감쇠기를 이용하여 제공하는 것이다. 그라운드훅 제어알고리즘은 평형위치에 대한 주구조물 (여기서는 아치 구조물)의 변위( $x_1$ )와 아치 구조물과 STMD의 상대속도( $v_1-v_2$ )의 관계를 이용하여 정의된다. 이때 상대속도가 음수이면 STMD와 구조물이 분리되는 방향으로 움직이는 것을 의미하며 MR 감쇠기에는 인장력이 발생하게 되고 반대로 상대속도가 양수이면 MR 감쇠기에는 압축력이 발생하게 된다. 또한 주구조물의 중심이 평형상태의 위쪽에 있으면 변위( $x_1$ )가 양수이고, 아래쪽에 있으면 음수이다. 이러한 정의를 이용해서 그라운드훅 알고리즘은 식 (1)과 (2)로 간단하게 정리될 수 있다. 여기서  $V$ 는 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압을 의미하며  $V_{max}$ 는 본 연구에서 사용된 MR 감쇠기의 최대 명령전압인 5V,  $V_{min}$ 은 최소 명령전압인 0V를 의미한다. 식의 구성을 보면 알 수 있듯이 그라운드훅 제어알고리즘은 비교적 간단한 연산으로 STMD를 제어할 수 있으므로 실시간 제어에 매우 유리하다. 또한 본 연구에서와 같이 한 개 이상의 스마트 진동제어장치를 사용하면 진동제어장치간의 상호작용을 고려해서 제어 알고리즘을 설계하게 되므로 복잡해질 가능성이 있다. 그러나 본 연구에서 사용하는 그라운드훅 제어 알고리즘은 단순히 STMD와 STMD가 연결되는 위치의 주구조물 응답만을 이용하여 MR 감쇠기를 제어하므로 상대적으로 매우 단순한 계산만이 요구된다.

$$x_1(v_1 - v_2) \geq 0 \Rightarrow V = V_{max} \tag{1}$$

$$x_1(v_1 - v_2) < 0 \Rightarrow V = V_{min} \tag{2}$$



<Fig. 7> Ideal configuration of groundhook



<Fig. 8> Smart TMD model

#### 4. 수치해석 결과

전술한 바와 같이 본 논문에서는 MSTMD의 이차구조물에 대한 지진응답 제어성능을 검토해보기 위해서 수치해석을 수행하였다. 응답의 비교 지점은 <Fig. 1>에 나타낸 바와 같이 동적변형이 가장 크게 나타날 것으로 예상되는 아치경간의 1/4 지점인 'a' 점과 중간 지점인 'b'로 하였다. 수평방향 지진하중에 대해서 가장 큰 응답을 나타내는 곳인 'a' 점에서 Z방향 및 X방향 응답을 비교하였고 'b' 지점에서의 Z방향 응답의 거의 발생하지 않으므로 X방향 응답만을 비교하였다. 수치해석을 위해서 MATLAB 버전 R2011a와 SIMULINK를 사용하여 구조물 및 MR 감쇠기를 모형화하였다. 본 연구에서 제안한 MSTMD의 제어성능을 검토하기 위해서 일반적인 수동 MTMD의 지진응답과 함께 제어하지 않은 경우의 응답을 비교하여 <Table 1-4>에 나타내었다. 각 표에는 사용한 4개의 지진하중에 의해서 발생하는 각 방향별 최대치 응답을 비교하였다.

<Table 1> Peak responses of El Centro EQ

Point	Dir.	Uncon.	MTMD	MSTMD
a	DZ	8.50 cm	8.02 cm	7.79 cm
	DX	3.93 cm	3.99 cm	3.70 cm
b	DX	2.40 cm	2.57 cm	2.37 cm

<Table 2> Peak responses of Northridge EQ

Point	Dir.	Uncon.	MTMD	MSTMD
a	DZ	15.69 cm	14.21 cm	13.85 cm
	DX	7.51 cm	6.78 cm	6.58 cm
b	DX	4.67 cm	4.24 cm	4.10 cm

<Table 3> Peak responses of Artificial EQ

Point	Dir.	Uncon.	MTMD	MSTMD
a	DZ	3.40 cm	2.97 cm	2.05 cm
	DX	1.72 cm	1.41 cm	0.97 cm
b	DX	1.14 cm	0.90 cm	0.63 cm

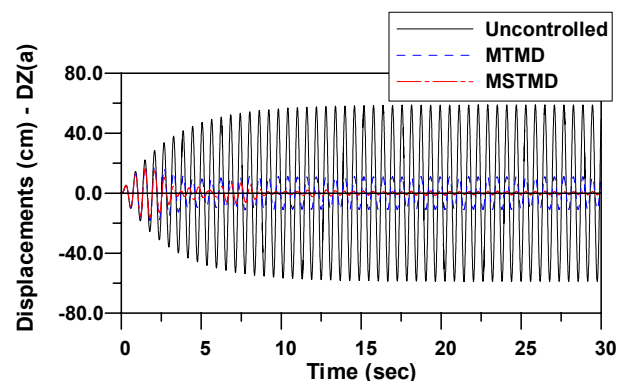
<Table 4> Peak responses of Resonant EQ

Point	Dir.	Uncon.	MTMD	MSTMD
a	DZ	58.85 cm	18.25 cm	16.43 cm
	DX	28.59 cm	8.77 cm	7.92 cm
b	DX	17.78 cm	5.40 cm	4.91 cm

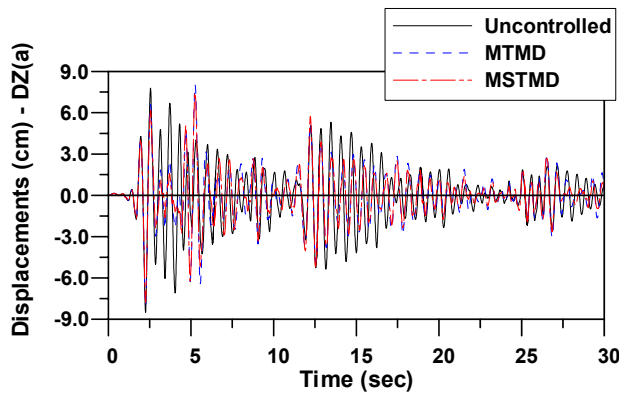
각 지진하중에 대한 응답을 살펴보면 지반운동가 속도의 특성에 관계없이 'a'점의 수평방향(X방향) 응답보다는 수직방향(Z방향) 응답이 2배가량 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 즉, 아치구조물에 수평방향 지진하중이 가해져도 수직방향 지진응답이 가장 크게 발생하는 것을 알 수 있는데 이것은 일반 빌딩건물과 구별되는 대공간 구조물의 동적 특성이 다. 제어하지 않은 경우에 비해서 MTMD를 사용한 경우를 비교해 보면 Northridge 지진에 대해서는 각 위치별 10% 정도의 저감효과가 있고 인공지진에 대해서는 20% 안팎의 저감효과가 있는 것을 알 수 있다. 특히 구조물에 큰 피해를 줄 수 있는 공진조화지반운동의 경우에는 제어하지 않은 경우의 응답을 약 70% 정도 이상 대폭 줄일 수 있다. 그러나 El Centro 지진하중의 경우에는 제어효과가 미약하거나 오히려 응답을 증가시키는 것을 볼 수 있다. 따

라서 MTMD의 경우에는 대체적으로 제어성능이 우수하지만 지반운동의 특성에 따라서 제어효과가 크게 저감될 수도 있는 것을 알 수 있다. MSTMD의 경우에는 모든 지반운동 및 모든 방향의 응답에 대해서 MTMD보다 우수한 제어성능을 나타내었다.

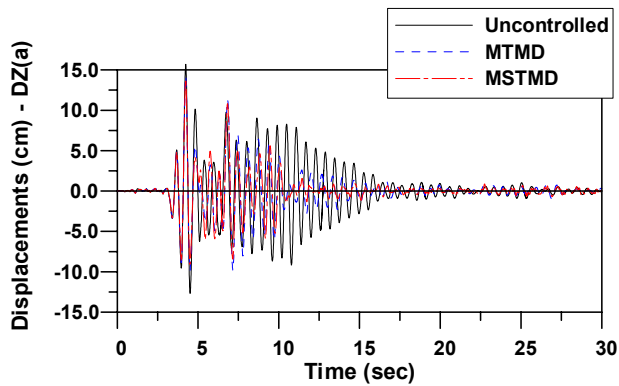
각 제어장치별 구조물의 동적응답 변화를 검토해 보기 위해서 구조물 응답 중 가장 큰 'a'점의 수직방향 시간이력을 <Fig. 9-12>에 나타내었다. 앞서 표에서 보았듯이 공진 조화지반가속도에 대해서는 비교하는 응답의 위치나 방향에 관계없이 MTMD와 MSTMD가 매우 효과적으로 아치구조물의 응답을 저감시킬 수 있는 것을 확인할 수 있다. 시간이력 그래프를 보면 특히 천이상태를 지나 정상상태에 도달하면 구조물 응답의 차이가 분명하게 드러나는데 평균적으로 MTMD는 제어하지 않은 상태의 응답을 약 80% 줄일 수 있고 MSTMD는 MTMD에 의해서 제어된 구조물의 동적 변위응답을 약 60% 더 줄일 수 있었다. 따라서 대공간 구조물에 큰 피해가 발생할 수 있는 공진상태가 발생할 때 MTMD와 MSTMD는 매우 우수한 제어성능을 발휘하고 특히 MSTMD는 수동 MTMD에 비해서 2배 이상의 개선된 성능을 나타내는 것을 알 수 있다. El Centro 지진하중에 대해서는 MTMD와 MSTMD 모두 제어효과가 있지만 그다지 탁월한 성능은 나타내지 못하고 있다. 그러나 Northridge 지진이나 인공지진의 경우에는 MTMD와 MSTMD가 모두 제어하지 않은 경우에 비해서 탁월한 진동저감효과를 나타내는 것을 볼 수 있고 MTMD와 MSTMD의 진동제어성능 차이도 확인할 수 있다.



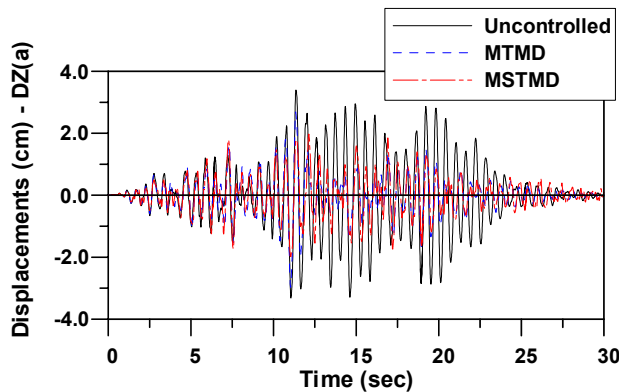
<Fig. 9> Z Dir. displacement time histories due to resonant ground acceleration



〈Fig. 10〉 Z Dir. displacement time histories due to El Centro earthquake



〈Fig. 11〉 Z Dir. displacement time histories due to Northridge earthquake



〈Fig. 12〉 Z Dir. displacement time histories due to Artificial earthquake

## 5. 결론

본 연구에서는 지진하중을 받는 아치 대공간구조물에 대한 MSTMD의 제어성능을 검토하여 보았다. 선행연구에서는 이상적인 준능동 감쇠기를 이용한 가상의 준능동 TMD에 대한 제어성능을 검토하였

지만 본 연구에서는 현재의 기술로 실제 구조물 제어에 활용되고 있는 스마트 MR 감쇠기로 구성된 스마트 TMD의 아치구조물에 대한 지진응답 제어 성능을 검토하였다. MSTMD를 구성하기 위해서 현재 실제 구조물에 적용되고 있는 스마트 제어장치인 MR 감쇠기를 사용하였고 MR 감쇠기의 감쇠력을 구조물의 응답에 따라서 실시간으로 조절하기 위해서 그라운드혹 제어알고리즘을 사용하였다. 지진하중으로는 공진 조화지반가속도와 El Centro, Northridge 지진하중 및 KBC2009를 바탕으로 생성한 인공지진하중을 사용하였다. 아치구조물의 동적응답에 가장 큰 영향을 미치는 주요 저차모드를 중첩하여 가장 큰 진폭을 나타내는 곳에 MSTMD를 설치하였다.

수치해석결과 조화지반가속도를 아치 구조물에 가하여 공진이 발생했을 때 MTMD 및 MSTMD는 구조물의 동적응답을 매우 효과적으로 줄일 수 있었다. 특히 MSTMD는 수동 MTMD에 비교하여 정상상태에서 2배 이상의 개선된 제어성능을 나타내었다. 따라서 공진 등으로 인하여 구조물에 큰 응답이 예상되는 지진하중에 대하여 MSTMD가 보다 효과적인 제어성능을 나타낼 것으로 기대된다. 또한 강진지역의 지진뿐만 아니라 우리나라와 같은 중약진 지역의 지진하중에 대해서도 MSTMD가 아치구조물의 지진응답 제어에 매우 효과적인 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 MSTMD는 아치구조물의 동적변위가 가장 큰 수직방향으로 설치되었지만 수직방향 뿐만 아니라 수평방향 동적응답도 매우 효과적으로 저감시킬 수 있었다. 본 연구결과 MR 감쇠기로 구성된 MSTMD의 아치구조물 진동제어에 대한 적용성 및 효율성을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 MSTMD를 제어하기 위해서 전통적인 그라운드혹 제어알고리즘을 사용하였지만 제어성능의 개선을 위하여 추후에는 대공간 구조물의 특성을 고려한 보다 효율적인 준능동 제어알고리즘을 개발할 계획이다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구

비지원(15AUDP-B100343-01)에 의해 수행되었습니다.

### References

1. Kawaguchi, K., A report on large roof structures damaged by the Great Hanshin-Awaji Earthquake, *International Journal of Space Structures*, Vol. 12, 1997, pp. 134-147.
2. Kawaguchi, K. and Suzuki, Y., "Damage investigations of public hall in Nagaoka city after Niigata-Chuetu earthquake 2004 in Japan", *Proceedings of the International Symposium of Shell and Spatial Structures*, 2005, pp. 421-428.
3. Kawaguchi, K., Nakaso, Y., Ogi, Y. and Ohya, S., "Non-structural components and life safety in large rooms of spatial structures", *Proceedings of the IASS Symposium*, Wroclaw, Poland, 2013, pp. 23-27.
4. Farghaly, A.A., "Optimum design of TMD system for tall buildings", *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, Vol. 2, No. 4, 2012, pp. 511-532.
5. Xu, Y.L., Kwok, K.C.S. and Samali, B., "Control of wind-induced tall building vibration by tuned mass dampers", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 40, No. 1, 1992, pp. 1-32.
6. Yoshinaka, S. and Kawaguchi, K., "Vibration control of large-span architectures using spatially distributed MTMDs", *Proc. of the 7th European Conference on Structural Dynamics*, Southampton, UK, 2008, pp. 1-11.
7. Yoshinaka, S. and Kawaguchi, K., "Vibration control of spatial structures using spatially distributed MTMDs", *Mem. Fac. Eng., Osaka City Univ.*, Vol. 49, 2008, pp. 19-28.
8. Kim, H.S., Roschke, P.N., Lin, P.Y. and Loh, C.H., "Neuro-fuzzy model of hybrid semi-active base isolation system with FPS bearings and an MR damper", *Engineering Structures*, Vol. 28, 2006, pp. 947-958.
9. Spelta, C., Previdi, F., Savaresi, S.M., Fraternali, G. and Gaudio, N., "Control of magnetorheological dampers for vibration reduction in a washing machine", *Mechatronics*, Vol. 19, No. 3, 2009, pp. 410-421.
10. Kang, J.W., Kim, H.S. and Lee, D.G., "Mitigation of wind response of a tall building using semi-active tuned mass dampers", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 20, 2011, pp. 552-565.
11. Koo, J.H., Ahmadian, M. and Setareh, M., "Experimental robustness analysis of magneto-rheological tuned vibration absorbers subject to mass off-tuning", *Journal of Vibration and Acoustics*, *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, Vol.128, No. 1, 2006, pp. 126-131.
12. Kang, J.W., Kim, G.C. and Kim, H.S., "Seismic response control of arch structures using semi-active TMD", *Journal of the Korean Association for Spatial Structures*, Vol. 10, No. 1, 2010, pp. 103-110.
13. Koo, J.H., Using magneto-rheological dampers in semiactive tuned vibration absorbers to control structural vibrations, Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, 2003.
14. Kim, G.C., Kim, K.I. and Kang, J.W., "The seismic behavior of the truss-arch structure with seismic isolation", *Journal of the Korean Association for Spatial Structures*, Vol. 8, No. 2, 2008, pp. 73~84.
15. 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.



16. Sues, R.H., Mau, S.T. and Wen, Y.K.,  
“System identification of degrading hysteretic  
restoring forces”, Journal of Engineering  
Mechanics, ASCE, Vol. 114, No. 5, 1988, pp.  
833-846.

- Received : January 18, 2016
- Revised : February 05, 2016
- Accepted : February 05, 2016