

# 개폐식 대공간 구조물을 위한 스마트 TMD 설계기법 개발

## Design Method Development of Smart TMD for Retractable-Roof Spatial Structure

김 현 수\*  
Kim, Hyun-Su

강 주 원\*\*  
Kang, Joo-Won

### Abstract

In this paper, a structural design method of a smart tuned mass damper (TMD) for a retractable-roof spatial structure under earthquake excitation was proposed. For this purpose, a retractable-roof spatial structure was simplified to a single degree of freedom (SDOF) model. Dynamic characteristics of a retractable-roof spatial structure is changed based on opened or closed roof condition. This condition was considered in the numerical simulation. A magnetorheological (MR) damper was used to compose a smart TMD and a displacement based ground-hook control algorithm was used to control the smart TMD. The control effectiveness of a smart TMD under harmonic and earthquake excitation were evaluated in comparison with a conventional passive TMD. The vibration control robustness of a smart TMD and a passive TMD were compared along with the variation of natural period of a simplified structure. Dynamic responses of a smart TMD and passive TMD under resonant harmonic excitation and earthquake load were compared by varying mass ratio of TMD to total mass of the simplified structure. The design procedure proposed in this study is expected to be used for preliminary design of a smart TMD for a retractable-roof spatial structure.

**Keywords :** Retractable-roof spatial structure, Smart tuned mass damper, Structural design, Control device optimization

### 1. 서론

최근 국내외적으로 생활 및 문화수준이 점차 향상되어 가면서 문화시설 및 운동시설에 대한 요구가 크게 높아지고 있다. 특히 대공간 구조물의 지붕 개폐에 따른 공간의 가변적 활용성에 대한 필요가 높아지고 있으므로 개폐식 지붕을 가진 대공간 구조물이 많이 건설되고 있다<sup>1)</sup>. 세계적인 대공간 건축물의 건설사례를 살펴보면 대다수의 나라에서 개폐식 대공간 건축물을 건설하는 추세에 있으며 스타디움과 같은 관람객 30,000명 이상의 대규모 대공간 건축물의 경우에는 대부분이 개폐식 지붕구조를 갖는 대공간 건축물을 건설하고 있다. 각종 공연이나 스포츠를 관람할 때에 많은 인원이 모이기 때문에

지진이 발생하여 구조물이 붕괴하거나 구조적 손상이 발생할 경우에 큰 인명피해가 유발될 것으로 우려가 된다<sup>2)</sup>. 지진하중이 발생하여 대공간 구조물이 붕괴하거나 큰 구조적 손상이 발생하지 않더라도 지붕에 설치된 각종 기계적 장치들이 낙하한다면 인명피해가 발생할 가능성이 커진다. 따라서 지진하중을 받는 대공간 구조물의 동적응답을 줄이기 위한 연구가 지속적으로 수행되어 왔다<sup>3-6)</sup>.

근래에 스마트 동조질량감쇠기(Smart Tuned Mass Damper; STMD)가 개발되어 진동제어에 대한 효용성이 많은 연구자들에 의해서 해석적·실험적으로 검증되고 있다<sup>7-9)</sup>. 일반적인 수동 TMD는 제어하고자 하는 구조물의 고유진동주기에 맞추어 적절하게 조율이 되었을 때에는 매우 우수한 동적응답 제어성능을 나타내는 것으로 알려져 있다. 이를 바탕으로 TMD를 활용하여 지진하중을 받는 대공간 구조물의 동적응답 제어에 대한 연구도 수행되고 있다<sup>10,11)</sup>. 그러나 개폐식 대공간 구조물과 같이 지붕의 개폐여부에 따라서 구조물의 강성 및 질량분

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

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

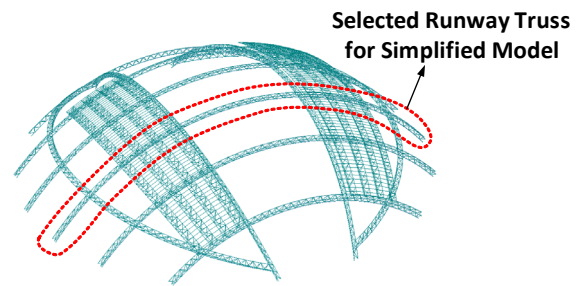
포가 변화하기 때문에 개폐상태에 따른 구조물의 동적특성이 변하는 구조물에 대해서는 일반적인 TMD의 제어성능이 저하될 것이다. 따라서 스마트 TMD를 활용한 개폐식 대공간 구조물의 지진응답 제어에 대한 연구<sup>4)</sup>가 시작되었고 이에 대한 연구가 국내외적으로 거의 초기단계에 있다고 판단된다.

선행연구에서는 개폐식 대공간 구조물을 대상으로 스마트 TMD가 일반적인 수동 TMD에 비해서 우수한 지진응답 제어성능을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 스마트 TMD를 개폐식 대공간 구조물의 지진응답 제어에 실제적으로 적용하기 위해서는 스마트 TMD의 설계방법에 대한 연구가 필요한데 이에 대해서는 아직 국내외적으로 수행된 연구결과를 찾기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 개폐식 대공간 구조물의 지진응답 제어를 위한 스마트 TMD의 초기설계과정에 적용할 수 있는 설계기법을 개발하고자 한다. 이를 위해서 개폐식 대공간 구조물의 동적특성을 나타낼 수 있는 단순화된 단자유도 해석 모델을 개발하였다. 우선 일반적인 수동 TMD와 스마트 TMD가 설치된 해석모델에 대하여 조화하중의 진동주기를 변화시켜서 스마트 TMD의 제어성능을 검토하였다. 그리고 TMD와 스마트 TMD의 질량을 구조물 질량의 0.1%에서 10%까지 변화시키면서 공진조화하중 및 지진하중에 대한 최대치 응답을 검토함으로써 설계 조건을 만족시킬 수 있는 TMD의 질량을 선택하는 방법을 제시하였다. 비동조(Off-tuning) 현상에 대한 스마트 TMD의 제어성능을 검토하기 위하여 대공간 구조물의 개폐상태를 고려한 고유진동주기를 변화시켜 수치해석을 수행하였다. 수치해석을 위하여 MATLAB 버전 R2011a와 SIMULINK를 사용하여 운동방정식을 해석하였다.

## 2. 개폐식 대공간 구조물의 등가 해석 모델

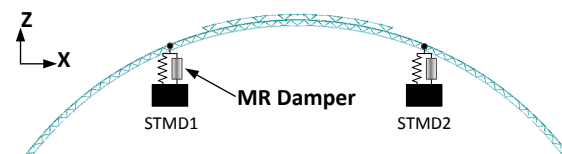
개폐식 대공간 구조물에 대한 스마트 TMD의 설계기법을 개발하기 위하여 우선 예제구조물을 선택하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 선행연구에서

사용하였던 <Fig. 1>에 나타난 개폐식 대공간 예제 구조물을 사용하였다. 그림에 나타난 개폐식 대공간 예제구조물은 현재 최대의 규모를 자랑하는 Singapore sports hub와 일본의 Oita bank dome을 기반으로 하여 디자인하였다.



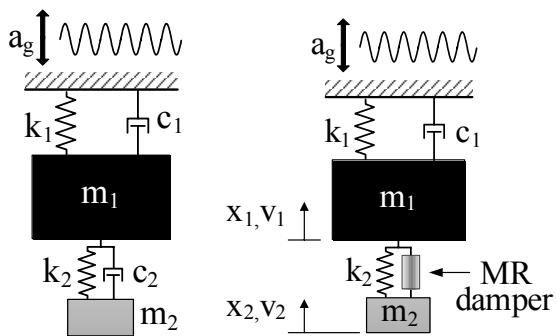
<Fig. 1> 3D model of retractable-roof spatial structure

본 연구에서 수행하고자 하는 스마트 TMD를 이용한 개폐식 대공간 구조물의 지진응답 성능 검토는 MIDAS와 같은 상용 구조해석프로그램을 통해서서는 불가능하고 Matlab을 기반으로 작성한 전용 구조해석프로그램을 통해서만 가능하다. 이러한 전용 해석모델은 자유도가 큰 모델은 해석이 불가능하므로 <Fig. 1>에 나타난 바와 같이 구조물 가운데 부분에 있는 한 열의 횡방향 Runway 트러스를 취하여 단순화된 해석모델을 만들고자 한다. 그림에 나타난 Runway 트러스를 선택한 이유는 수평방향 지진하중에 의하여 실제로 가장 큰 응답을 나타내는 부재이기 때문이다. TMD의 설치위치를 결정하기 위하여 선행연구<sup>4)</sup>에서 주요 저차모드의 모드형상을 분석한 후 <Fig. 2>와 같이 진폭이 가장 큰 위치를 TMD 설치위치로 결정하였다. 즉, 그림에 나타난 것처럼 좌측과 우측 경간의 1/4 지점에 TMD 및 스마트 TMD를 설치한다.



<Fig. 2> Install location of TMDs

본 논문에서는 <Fig. 2>의 2차원 구조물을 더 단순화 시켜서 단자유도 구조물을 구성하였다. 단자유도 구조물의 질량은 <Fig. 2>에 나타난 2차원 구조물에서 TMD 질량이 제어할 수 있는 범위와 모드형상을 고려하여 2차원 구조물의 1/4로 하였다. 즉, <Fig. 2>에 나타난 2차원 구조물의 질량이 15,400 kg 이므로 단자유도 예제구조물의 질량은 3,850 kg으로 하였다. 단자유도 예제구조물에 TMD 및 스마트 TMD를 설치한 단순화한 해석모델을 <Fig. 3>에 나타내었다. 수평방향 지진하중이 가해지는 대공간 구조물의 동적응답은 주로 수직방향으로 나타나기 때문에 예제구조물도 수직방향으로 응답이 나타나도록 모형화하였고 지진하중도 그림에 나타난 바와 같이 수직방향으로 가하였다. 앞서 설명한 바와 같이 주구조물의 질량인  $m_1$ 은 3,850 kg으로 하였고 주구조물의 고유진동주기를 결정하기 위해서 강성인  $k_1$ 을 설정하였다. 선행연구<sup>4)</sup>에서 예제 대공간 구조물의 지붕이 열린 상태와 닫힌 상태에서 1차모드 고유진동주기는 각각 3.00초와 2.66초로 계산되었다. 따라서 본 연구에서는 이 값을 SDOF 예제구조물의 지붕 개폐에 따른 고유진동주기로 선택하였고 이 값을 구현하기 위해서 지붕이 열린 경우와 닫힌 경우의 강성값( $k$ )을 각각  $1.68 \times 10^4$  N/m와  $215 \times 10^4$  N/m로 하였다. 주구조물의 감쇠비는 3%로 하였고 이를 구현하기 위해서 주구조물의 감쇠계수  $c_1$ 은 483.8 Nsec/m로 두었다.



(a) TMD model (b) Smart TMD model  
<Fig. 3> Simplified SDOF model

본 연구에서 제안된 방법으로 단자유도로 대공간 구조물을 단순화하면 전체모델을 사용했을 때의 응

답에 대해 10% 이내의 오차를 가지는 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 이러한 단자유도 구조물을 이용하면 초기설계 단계에서 다양한 제어시스템을 검토하는데 효율적이라고 판단된다. 구조물의 동적응답을 제어하기 위한 전통적인 수동 TMD의 최적 감쇠비 및 최적 진동수비에 대한 연구는 기존에 많이 수행되어 왔다. 본 연구에서는 Warburton<sup>12)</sup>이 제안한 단자유도 구조물에 대한 TMD 설계변수 최적값을 사용하였다. 즉,  $\sqrt{\mu(1-\mu/4)/(4(1+\mu)(1-\mu/2))}$ 를 TMD의 최적 감쇠비로  $\sqrt{1-\mu/2}/(1+\mu)$ 를 최적 진동수비로 사용하였다. 여기서  $\mu$ 는 TMD와 주구조물의 질량비이다. 만약 질량비를 1%로 설정한다면 계산된 최적 감쇠비는 4.98%이고 최적 진동수비는 0.988이다. TMD의 최적 진동수비를 나타내기 위해서 지붕이 열린 상태의 개폐식 대공간 구조물을 대상으로 조율된  $k_2$ 는 164.7 N/m이다. 스마트 TMD의 진동수도 TMD와 동일하게 두었다.

본 연구에서는 스마트 TMD를 구성하는 MR 감쇠기의 감쇠력을 제어하기 위해서 전통적인 준능동 제어알고리즘인 그라운드훅(Groundhook) 제어알고리즘<sup>7)</sup>을 사용하였다. 그라운드훅 제어알고리즘은 구조물과 지반에 연결된 가상의 감쇠기를 모사하여 준능동 감쇠기의 감쇠력을 제어하는 방법으로 비교적 단순한 계산을 통해서 우수한 제어성능을 나타낼 수 있는 것으로 알려져 있다.

그라운드훅 제어알고리즘은 평형위치에 대한 주구조물의 변위( $X_1$ )와 주구조물과 스마트 TMD의 상대속도( $V_1-V_2$ )의 관계를 이용하여 정의된다. 이 때 상대속도가 음수이면 스마트 TMD와 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.

$$X_1(V_1 - V_2) \geq 0 \Rightarrow V = V_{max} \quad (1)$$

$$X_1(V_1 - V_2) < 0 \Rightarrow V = V_{min} \quad (2)$$

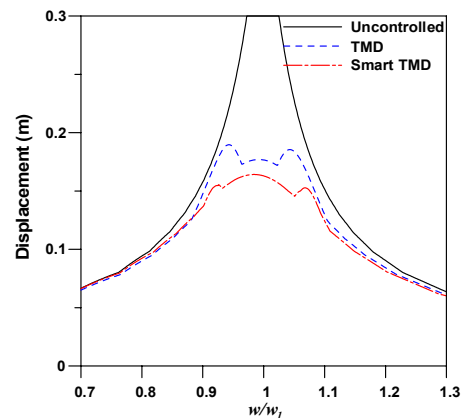
여기서  $V$ 는 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압을 의미하며  $V_{max}$ 는 감쇠기로 전달되는 최대 명령전압,  $V_{min}$ 은 최소 명령전압을 의미한다. 이 값은 각각 5V와 0V이다. 식의 구성을 보면 알 수 있듯이 그라운드혹 제어알고리즘은 비교적 간단한 연산으로 스마트 TMD를 제어할 수 있으므로 실시간 제어에 매우 유리하다.

### 3. 조화지반가속도에 의한 최대응답 제어성능 검토

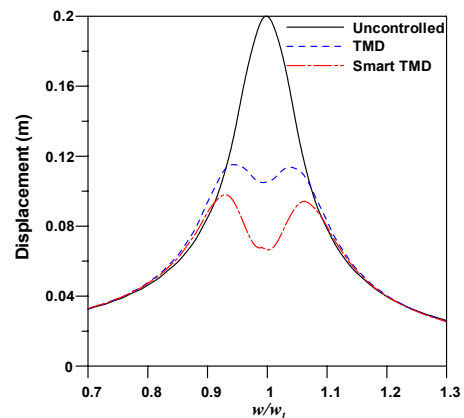
지진하중이나 풍하중과 같은 동적하중에 대해서 구조물이 가장 큰 피해를 입을 경우는 공진현상이 발생할 때이다. 따라서 본 연구에서는 공진 조화지반가속도를 사용하여 TMD와 스마트 TMD의 제어성능 차이를 검토하여 보았다. 또한 조화지반가속도의 진동수를 변화시켜서 두 제어장치의 제어성능 차이의 변화를 고찰하였다. 조화지반가속도의 최대 진폭은  $0.1 \text{ m/s}^2$ 으로 하였고 재하시간은 50초, 시간 간격은 0.001초로 하였다. 조화지반가속도를 생성하기 위해서 일반적인 사인파를 사용하였다. 주구조물의 진동수( $w_1$ )에 대한 조화지반가속도의 진동수( $w$ )를 0.7에서 1.3까지 변화시키면서 TMD와 스마트 TMD의 제어성능을 검토하였고 이를 <Fig. 4~7>에 나타내었다. 해석 시 사용한 구조물의 특성은 앞 절에서 설명한 바와 같고 지붕이 열린 상태의 구조물을 사용하였다.

구조물의 최대변위를 비교한 <Fig. 4>를 보면 진동제어장치가 설치되지 않은 구조물(Uncontrolled)은 공진대역에서 매우 큰 응답이 발생하지만 TMD와 스마트 TMD에 의해서 응답이 크게 저감하는 것을 볼 수 있다. 최대변위응답에 대해서 TMD보다 스마트 TMD가 더 우수한 제어성능을 나타내었는데 공진하중에 대해서는 약 8.4% 더 줄일 수 있었다. <Fig. 4>를 보면 공진진동수 좌우로 TMD의 응답이 증가하는 부분이 있는데 이 부근에서 TMD와 스마트 TMD의 응답차이가 가장 크게 발생하였다. 구조물과 하중의 진동수비( $w/w_1$ )가 왼쪽 0.94 지점에서 22%의 제어성능 차이가 났고 오른쪽 1.05 지

점에서는 26%의 차이가 났다. RMS 변위응답의 경우에는 TMD와 스마트 TMD의 제어성능 차이가 더 많이 나는 것을 <Fig. 5>를 보면 확인할 수 있다. 특히 공진진동수에서 TMD를 사용한 경우에 105 mm의 변위응답을 나타내는 반면에 스마트 TMD는 66 mm를 나타내었다. 그래프를 보면 RMS 변위응답의 경우에는 공진진동수 대비  $\pm 10\%$ 의 하중진동수에 대해서 스마트 TMD가 매우 우수한 제어성능을 나타내는 것을 알 수 있다. 이렇게 우수한 스마트 TMD의 제어성능과 비슷한 성능을 나타내는 TMD를 설계하기 위해서는 TMD의 질량을 증가시키는 것이 필요하다.



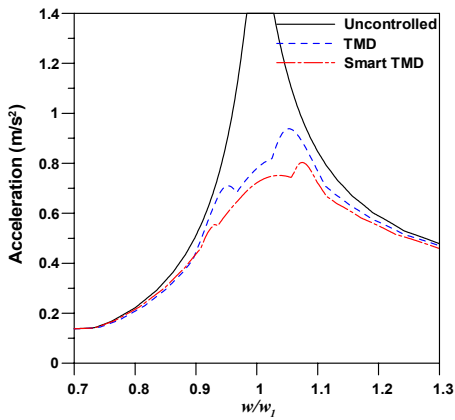
<Fig. 4> Comparison of peak displacement



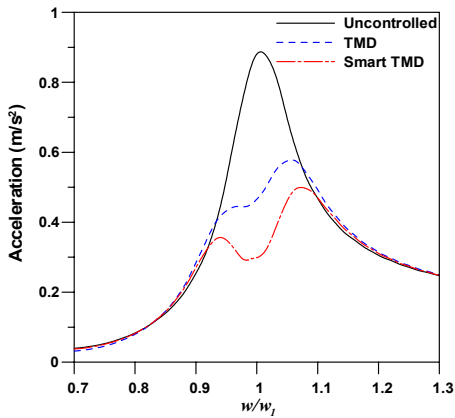
<Fig. 5> Comparison of RMS displacement

조화지반가속도의 진동수 변화에 따른 구조물의 최대 및 RMS 가속도응답을 <Fig. 6>과 <Fig. 7>에 나타내었다. TMD와 스마트 TMD의 제어성능 차이는 변위의 결과와 거의 비슷하게 나타나는 것을 알 수 있다. 그러나 변위 응답의 그래프처럼 공진진동

수 양쪽에 있는 최대응답값이 비슷하지 않고 오른쪽 최대값이 왼쪽값에 비해서 상당히 큰 것을 알 수 있다. 이것은 본 연구에서 TMD를 설계할 때 사용한 값이 가속도가 아니라 변위를 최적제어할 수 있는 값을 사용하였고 그라운드혹 제어알고리즘도 변위기반 제어알고리즘이기 때문인 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 가속도 제어에 있어서도 스마트 TMD의 제어성능이 우수한 것을 알 수 있다.



〈Fig. 6〉 Comparison of peak acceleration



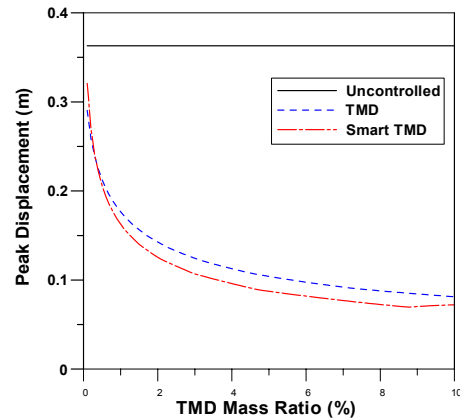
〈Fig. 7〉 Comparison of RMS acceleration

위의 해석결과를 보면 변위응답과 가속도응답 모두 최대값보다 RMS값에서 스마트 TMD의 제어성능이 더 우수한 것을 알 수 있다. 이것은 스마트 TMD가 조화지반가속도에 의한 초기의 천이상태보다 정상상태에서 더 우수한 성능을 나타내기 때문이다. 정상상태의 구조물 응답은 MR 감쇠기의 에너지 소산기능만으로 충분히 감소시킬 수 있지만 천이상태의 구조물 응답을 저감시키기 위해서는 능동 제어장치처럼 추가적인 외부의 에너지가 필요하게 된다<sup>13)</sup>. 따라서 스마트 TMD가 RMS 응답을 TMD

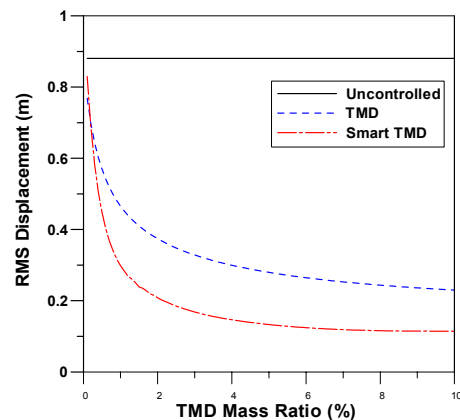
에 비하여 매우 탁월하게 줄일 수 있는 반면에 최대 응답에 대한 제어성능은 상대적으로 부족하다는 것을 알 수 있다.

#### 4. TMD 질량 변화에 의한 응답검토

구조물의 동적응답을 저감시키기 위해서 설치하는 질량감쇠기를 설계할 때 가장 중요한 것은 질량의 크기를 결정하는 것이다. 일반적으로 질량감쇠기의 질량을 크게 할수록 동적응답 제어성능이 증가하게 된다. 그러나 대공간 구조물과 같이 강성이 크고 질량이 상대적으로 작은 구조물에는 큰 질량감쇠기를 설치하는 것이 구조물의 안전성에 나쁜 영향을 미칠 가능성이 크다. 따라서 목표치 응답을 달성하기 위한 적절한 TMD의 질량을 선택하는 것이 스마트 TMD를 설계하는 단계에 있어서 매우 중요하다.

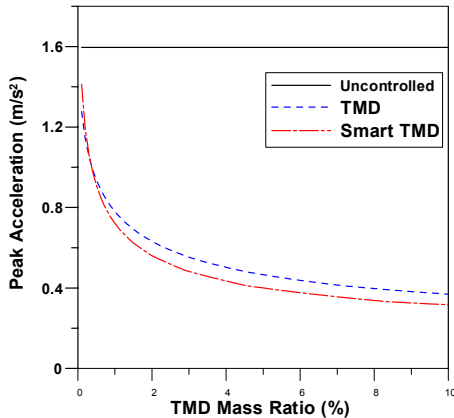


〈Fig. 8〉 Peak displacement vs. TMD mass ratio due to resonance acceleration

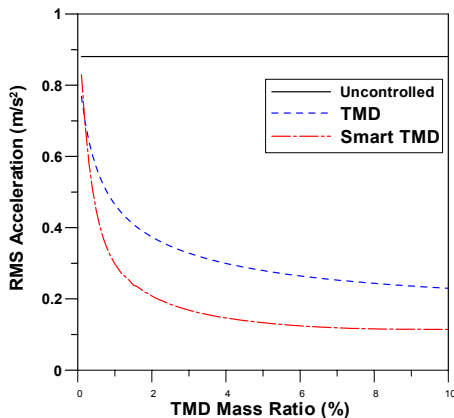


〈Fig. 9〉 RMS displacement vs. TMD mass ratio due to resonance acceleration

TMD의 초기설계 단계에서 질량의 크기를 결정하는데 활용하기 위해서 주구조물의 질량에 대한 TMD의 질량비를 0~10%로 변화시켜가면서 구조물의 응답을 검토하여 보았다. 우선 <Fig. 8~11>에는 공진 조화지반가속도에 대하여 TMD의 질량비 변화에 따른 변위응답과 가속도응답에 대한 제어성능 변화를 검토하였다.



<Fig. 10> Peak acceleration vs. TMD mass ratio due to resonance acceleration

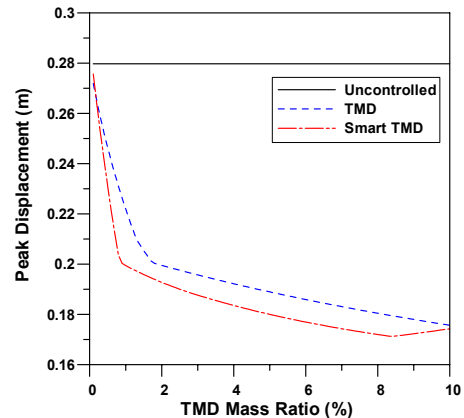


<Fig. 11> RMS acceleration vs. TMD mass ratio due to resonance acceleration

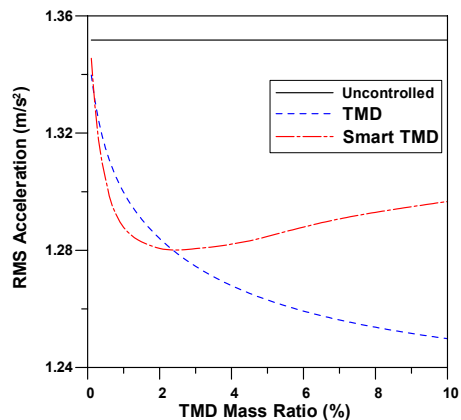
그림에서 볼 수 있듯이 질량비가 증가함에 따라서 TMD와 스마트 TMD의 제어성능이 함께 증가하는 것을 볼 수 있다. 최대 및 RMS 변위응답과 가속도응답에 대해서 모두 동일하게 TMD의 질량비가 2% 정도로 증가할 때까지는 응답이 급격하게 감소하다가 그 이후에는 감소속도가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한 최대치 변위응답과 가속도응답에 비해서 RMS 변위응답과 가속도응답에 대해서 TMD와 스마트 TMD의 제어성능 차이가 더 크게

벌어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 스마트 TMD의 제어성능이 정상상태일 때 크게 증가하기 때문이다. 조화지반가속도에 대해서 TMD와 스마트 TMD의 제어성능차이는 TMD의 질량비가 증가할수록 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

일반적인 지진하중에 대한 TMD 질량비에 따른 제어성능을 검토하기 위해 El Centro (1940, NS) 지진하중을 이용하여 시간이력해석을 수행하였다. 이에 따른 변위 및 가속도응답을 <Fig. 12~15>에 나타내었다.



<Fig. 12> Peak displacement vs. TMD mass ratio due to El Centro earthquake

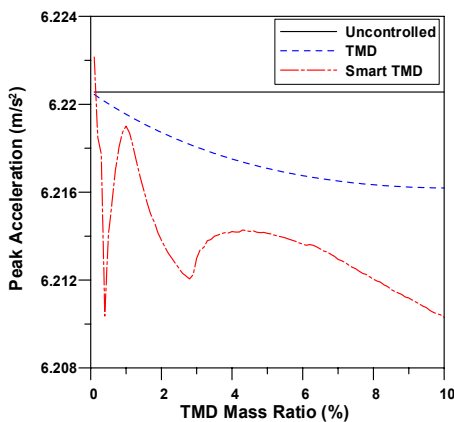


<Fig. 13> RMS displacement vs. TMD mass ratio due to El Centro earthquake

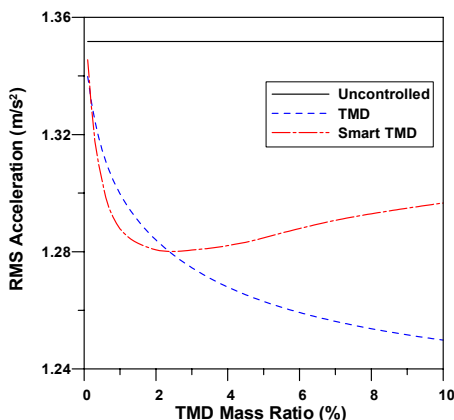
TMD 질량비 변화에 따른 El Centro 지진하중에 대한 예제구조물의 최대변위응답을 보면 스마트 TMD는 질량비 약 1%, 수동 TMD는 약 2% 정도까지 급격히 응답이 저감되는 것을 볼 수 있다. 따라서 질량비가 1%일 때 수동 TMD와 스마트 TMD의

제어성능 차이가 가장 크게 나타난다. 질량비 2% 이후에도 TMD와 스마트 TMD의 제어성능은 지속적으로 향상되며 제어성능 차이도 증가하다가 질량비 8%를 넘어가면 스마트 TMD의 제어성능이 저하되는 것을 볼 수 있다. RMS 변위응답에 대해서는 스마트 TMD의 제어성능이 질량비 약 2%까지는 급격히 증가하다가 그 이후에는 조금씩 저감되었고 TMD의 경우에는 질량비의 증가에 따라 지속적으로 제어성능이 향상되었다.

최대가속도응답의 경우에는 질량비가 증가함에 따라서 스마트 TMD의 제어성능이 <Fig. 14>에 나타낸 바와 같이 급격하게 변하는데 약 0.5%에서 최대 성능을 나타낸다. 하지만 전 구간에 걸쳐서 TMD보다는 우수한 제어성능을 나타낸다. RMS 가속도의 경우에는 RMS 변위와 매우 비슷한 경향을 나타내었다.

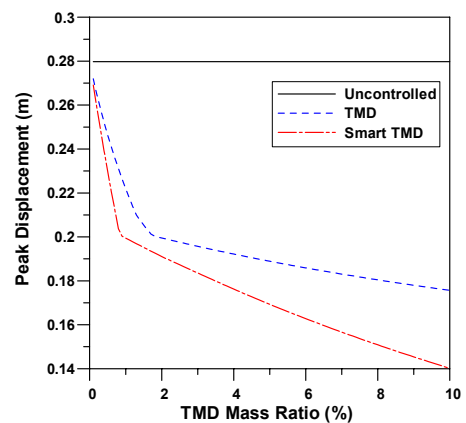


<Fig. 14> Peak acceleration vs. TMD mass ratio due to El Centro earthquake

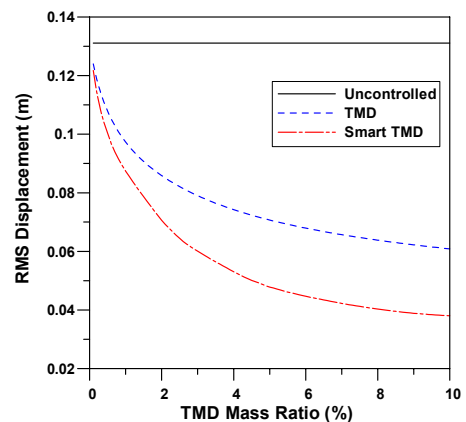


<Fig. 15> RMS acceleration vs. TMD mass ratio due to El Centro earthquake

지금까지 사용된 해석모델에서 스마트 TMD를 구성하는 MR 감쇠기의 용량은 1%의 질량비를 기준으로 하여 최적의 제어성능을 나타낼 수 있는 값인 50N을 사용하였다. 질량비가 증가하게 되면 TMD를 구성하는 최적 감쇠비가 Warburton이 제안한 최적 설계변수에 의하여 증가하게 된다. 이를 기반으로 하여 스마트 TMD를 구성하는 MR 감쇠기의 용량도 질량비에 따라 증가시키면서 해석한 결과를 <Fig. 16~19>에 나타내었다.



<Fig. 16> Peak displacement vs. TMD mass ratio due to El Centro earthquake

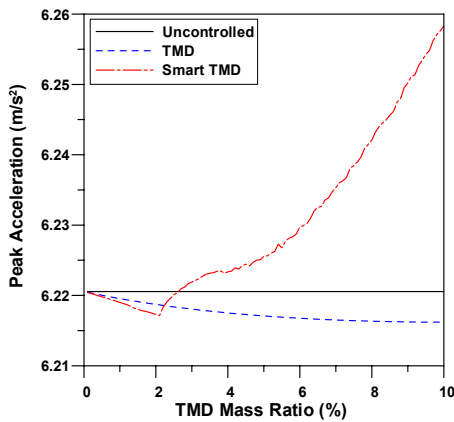


<Fig. 17> RMS displacement vs. TMD mass ratio due to El Centro earthquake

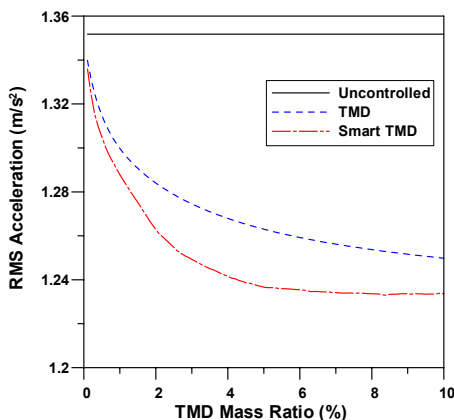
최대변위응답을 보면 질량비 약 2% 정도까지는 고정된 MR 감쇠기 용량을 사용한 경우와 거의 비슷하게 나타나지만 그 이후에는 스마트 TMD의 제어성능이 대폭 개선되는 것을 알 수 있다. 또한 고정 용량의 MR 감쇠기를 사용했을 때에는 질량비 8% 이후에 스마트 TMD의 제어성능이 저하되었지만 MR 감쇠기의 용량을 증가시키면서 제어성능이

꾸준히 향상되는 것을 볼 수 있다. RMS 변위 또한 MR 감쇠기의 용량을 증가시키면서 스마트 TMD와 수동 TMD의 제어성능 차이가 질량비에 따라 꾸준히 증가하는 것을 볼 수 있다.

최대가속도응답의 경우에는 스마트 TMD를 구성하는 MR 감쇠기의 용량을 증가시킴에 따라서 제어 성능이 오히려 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 스마트 TMD에 의한 제어력이 증가하여 구조물에 가해지는 가속도가 증가하기 때문인 것으로 추정된다. 이에 비하여 RMS 가속도는 질량비 전 구간에서 TMD보다 스마트 TMD의 제어성능이 우수하고 질량비 약 4.5 근처에서 가장 큰 차이가 나타나는 것을 알 수 있다.



〈Fig. 18〉 Peak acceleration vs. TMD mass ratio due to El Centro earthquake



〈Fig. 19〉 RMS acceleration vs. TMD mass ratio due to El Centro earthquake

## 5. 결론

본 연구에서는 지진하중을 받는 개폐식 대공간 구조물의 동적응답제어를 위하여 스마트 TMD 설계과정을 검토하였다. 우선 공진지반가속도에 대한 스마트 TMD와 TMD의 제어성능을 비교하였고 공진대역을 중심으로 스마트 TMD가 TMD보다 우수한 제어성능을 발휘하는 것을 알 수 있었다. 이를 통해서 구조물의 피해가 많이 발생할 수 있는 공진에 의한 개폐식 대공간 구조물의 응답을 스마트 TMD를 이용하여 효과적으로 제어할 수 있음을 확인하였다. 스마트 TMD를 이용한 지진응답 설계목표를 만족시키기 위해서 초기설계 단계에서 결정해야 할 가장 중요한 사항은 질량의 크기이므로 주구조물의 질량에 대한 TMD의 질량비를 0~10%로 변화시켜가면서 구조물의 응답을 검토하여 보았다. 이를 통해서 본 연구에서 나타낸 그래프를 이용하여 목표응답을 달성할 수 있는 스마트 TMD 및 TMD의 질량을 쉽게 설계할 수 있었다. 또한 TMD의 질량과 더불어 MR 감쇠기의 용량을 선택하는 것이 설계과정에 있어서 매우 중요한 변수임을 확인할 수 있었고 질량의 크기에 따라 용량을 증가시키는 것이 변위응답제어에 효과적임을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 그라운드혹 제어알고리즘을 사용해서 스마트 TMD를 제어하였는데 추후 지붕이 열린 경우와 닫힌 경우에 대하여 동시에 효과적인 제어가 가능한 제어알고리즘의 개발이 필요하다고 판단된다. 현재 후속연구로 MR 감쇠기의 용량과 스마트 TMD를 구성하는 강성을 동시에 최적 설계하는 방법에 대해서 연구가 진행 중이다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비 지원(17AUDP-B100343-03)에 의해 수행되었습니다.

## References

1. Abel, J.F. and Mungan, I., "Fifty Years of Progress for Shell and Spatial Structures", Multi Science Publishing Co. Ltd., 2011.



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. Kim, H.S. and Kang, J.W., "Seismic Response Control of Spacial Arch Structures using Multiple Smart TMD", Journal of the Korean Association for Spacial Structures, Vol. 16, No. 1, 2016, pp. 43-51.
  4. Kim, H.S. and Kang, J.W., "Seismic Response Control of Retractable-Roof Spatial Structure using Smart TMD", Journal of the Korean Association for Spacial Structures, Vol. 16, No. 4, 2016, pp. 91-100.
  5. Kawaguchi, K., "A report on large roof structures damaged by the Great Hanshin-Awaji Earthquake", International Journal of Space Structures, Vo1. 12, 1997, pp. 134-147.
  6. 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.
  7. 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.
  8. Kim, H.S., Chang, J.H. and Kang, J.W., "Control performance evaluation of semi-active TMD subjected to various types of loads", International Journal of Steel Structures, Vol. 15, No. 3, 2015, pp. 581-594.
  9. Nagarajaiah, S. and Jung, H.Jo., "Smart tuned mass dampers: recent developments", Smart Structures and Systems, Vol. 13, No. 2, 2014, pp.173-176.
  10. 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.
  11. 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.
  12. 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.
  13. Pinkaew, T. and Fujino, Y., "Effectiveness of semi-active tuned mass dampers under harmonic excitation," Engineering Structures, Vol. 23, 2001, pp. 850-856.
- Received : August 14, 2017
  - Revised : August 29, 2017
  - Accepted : August 31, 2017