

TMD 설치 질량 변화에 따른 대공간 구조물과 고층건물의 변위 응답 특성

Displacement Response Properties of Spatial Structures and High-Rise Buildings According to the Change of TMD Mass

이 영 략*
Lee, Young-Rak

김 현 수**
Kim, Hyun-Su

강 주 원***
Kang, Joo-Won

Abstract

In this paper, the displacement response to seismic loads was analyzed after installing TMD in spatial structures and high-rise buildings. In the case of a spatial structures, since it exhibits complex dynamic behavior under the influence of various vibration modes, it is not possible to effectively control the seismic response by installing only one TMD, unlike ordinary structures. Therefore, after installing eight TMDs in the structure, the correlation between displacement response and mass ratio was examined while changing the mass. The TMD must be designed to have the same frequency as the structure frequency so that the maximum response reduction effect can be exhibited. It can be confirmed that the most important variable is to select the optimal TMD mass in order to install the TMD on the structure and secure excellent control performance against the earthquake load. As a result of analyzing the TMD mass ratio, in the case of high-rise buildings, a mass ratio of 0.4% to 0.6% is preferable. In spatial structures, it is desirable to select a mass ratio of 0.1% to 0.2%. Because this study is based on the theoretical study based on numerical analysis, in order to design a TMD for a real structure, it is necessary to select within a range that does not affect the safety of the structure.

Keywords : Spatial structure, High-rise building, TMD, Seismic response control, Dynamic response reduction

1. 서론

지진은 항상 인간의 삶에 영향을 미치고 있으며, 거의 모든 건축과 설계에서 근본적인 역할을 하고 있다. 큰 지진이 발생함으로써 매년 전 세계 사람들의 삶에 피해를 초래한다. 많은 연구자들은 지진으로 인해 발생하는 손실을 최소화하고자 지진과 같은 동적하중을 제어하기 위한 장치 개발과 이론적 연구를 수행하면서 발전시키고 있다¹⁾.

지진으로 인한 지진파는 불규칙한 진동수와 방향성을 가지고 지반 운동을 발생시키며, 구조물의 높이에 따라 다양한 방식으로 흔들리고 진동하는 구조를 만든다. 구

조적으로 내진 성능을 향상시키기 위해 지진동 제어 기술과 결합된 적절한 구조 설계가 필요하다²⁾.

오늘날 건물의 큰 변형과 손상을 방지하는 방법 중 하나는 댐퍼(Damper)를 적용하는 것이다. 댐퍼는 기능 면에서 동일하지만 구조적 또는 지반의 조건에 따라 구조물에 광범위하게 사용된다. 댐퍼 유형 중 질량 댐퍼는 건물의 보조 시스템으로 설치되며 특정 동적 파라미터(질량, 강성 및 감쇠)를 가지고 있다.

동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper, TMD)는 가장 일반적인 형태의 수동형 질량 부가감쇠장치이며 일반적으로 질량체, 스프링 및 감쇠장치로 구성된다. 주어진 감쇠비와 진동수비에 따라 스프링의 강성과 감쇠장치의 감쇠를 조절하며, 스프링의 강성은 구조물의 해석 모델에 기초하여 대략적으로 결정된 후 실제 계측된 구조물 고유진동수에 따라 실제의 값을 조정할 수 있도록 설계된다. 사용 기간 동안 구조물의 고유진동수의 변화에 따라 스프링의 강성을 조절하기도 하지만 초기 동조된 값에서 변하지 않는 것이 일반적이다³⁾.

* 주저자, 학생회원, 영남대학교 건축학과, 박사과정
Dept. of Architecture, Yeungnam University

** 정회원, 선문대학교 건축학부 교수
School of Architecture, Sunmoon University

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

고층건물은 고정하중 및 적재하중과 같은 중력하중보다 지진이나 바람과 같은 횡하중이 건물의 시스템을 결정하는 중요한 요소이다. 건물의 구조설계 시 건물의 안전성 확보는 물론이고 수평변위 및 지진, 바람과 같은 동적하중으로 인한 건물의 진동이 거주자에게 불쾌감을 주지 않도록 고려해야 한다.

최근에 건설 기술의 발전 및 고강도 재료의 개발은 고층 건물, 나아가 초고층 건물의 건설을 가능하게 했다. 고강도, 경량화에 따른 건물 자체의 감쇠 저감으로 인하여 풍하중 및 지진하중에 의한 진동이 커지고 있어서 건물의 사용성에 문제를 일으킬 가능성이 점차 증가하고 있다. 따라서 감쇠 장치를 이용한 별도의 제진시스템으로 횡하중에 의한 구조물의 진동을 효과적으로 줄여서 고층건물의 안전성과 사용성을 증대시키고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다^{4),5)}.

일반적으로 대공간 구조물은 자중이 작은 장경간의 구조물로서 고유진동주기가 다소 길게 나타나며 일반적인 고층건물과는 상이한 동적특성을 가지고 있다. 일반적인 고층건물은 캔틸레버 모델로 간략화하여 모드형상 및 동적거동을 예측할 수 있지만 대공간 구조물은 캔틸레버와는 전혀 다른 동적특성을 지니고 있다. 특히 대공간 구조물의 동적특성에 대한 기존 연구를 살펴보면 형태적 특성에 따라 수평방향 지진하중에 의하여 수평방향 진동보다 수직방향의 진동이 더 크게 발생하는 것을 알 수 있다⁶⁾.

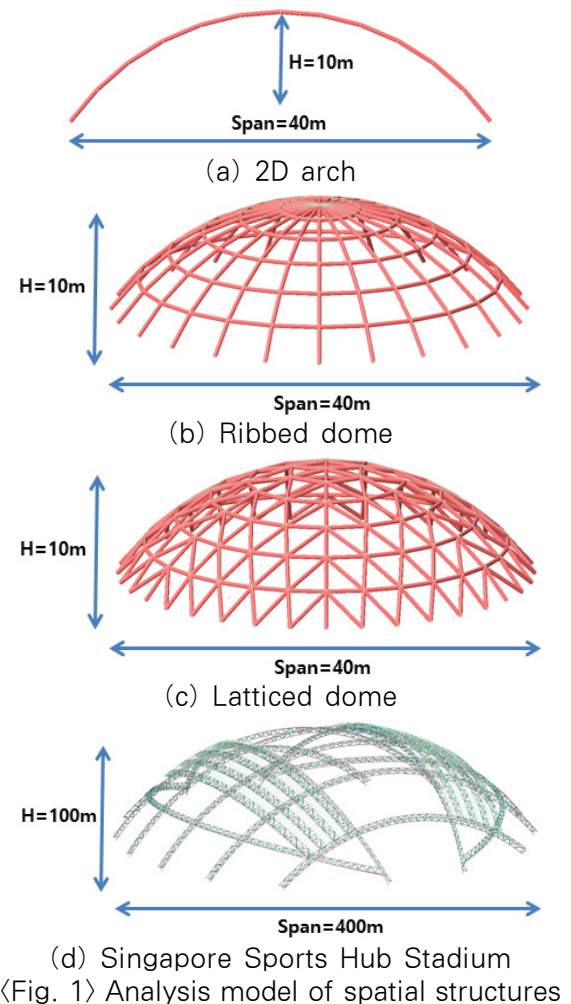
대공간 구조물은 지진 등 자연재해 발생 시 피난시설로 사용되는 공공성이 높은 건축물로 동적하중에 의한 진동응답 분석 및 진동제어가 필요하다. 지진이 발생하여 대공간 구조물이 붕괴하거나 구조적 손상이 발생하지 않더라도 지붕에 설치되어 있는 각종 기계적 장치들이 떨어지게 되면 많은 인명피해가 발생할 가능성이 크다. 따라서 지진하중 작용 시 대공간 구조물의 동적응답을 줄이기 위한 연구는 반드시 수행되어야 한다.

최근 TMD와 관련된 연구동향을 분석해보면 대부분의 연구가 일반적인 고층건물의 횡방향 진동제어나 슬래브의 연직진동 제어에 집중되어 있거나 토목 분야의 교량에 일부 이용되는 연구가 주를 이루고 있다. 국내는 물론이고 국외의 연구 동향을 분석하더라도 대공간 구조물에 TMD를 설치한 후 동적응답 특성을 분석한 연구는 거의 전무한 실정이다.

본 연구에서는 대공간 구조물과 고층건물에 TMD를 설치한 후 지진하중에 대한 변위 응답을 분석하였다. 대공간 구조물의 경우 다양한 진동모드의 영향으로 복잡한 동적거동을 나타내기 때문에 일반 건축물과는 달리 하나의 TMD만 설치하여 지진응답을 효과적으로 제어할 수 없다. 따라서 선행 연구⁷⁾ 결과를 바탕으로 대공간 구조물에 TMD를 설치하였을 때 최적의 설치 개수를 가지고 변위 응답을 확인하였으며, 고층건물 역시 대공간 구조물에 설치한 TMD 개수와 동일하게 설정하여 연구를 수행하였다. 아울러 구조물에 설치되는 TMD 질량을 점진적으로 감소시키며 변위 응답과 질량비와의 상관관계를 검토하였다.

2. 해석 모델 개요

2.1 대공간 구조물 해석 모델

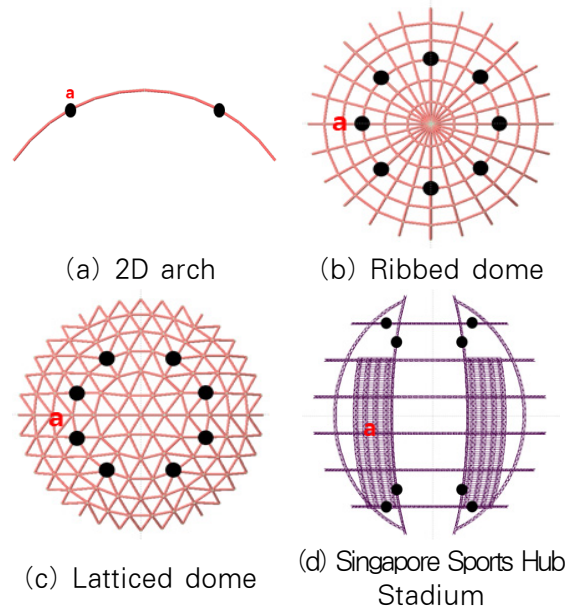
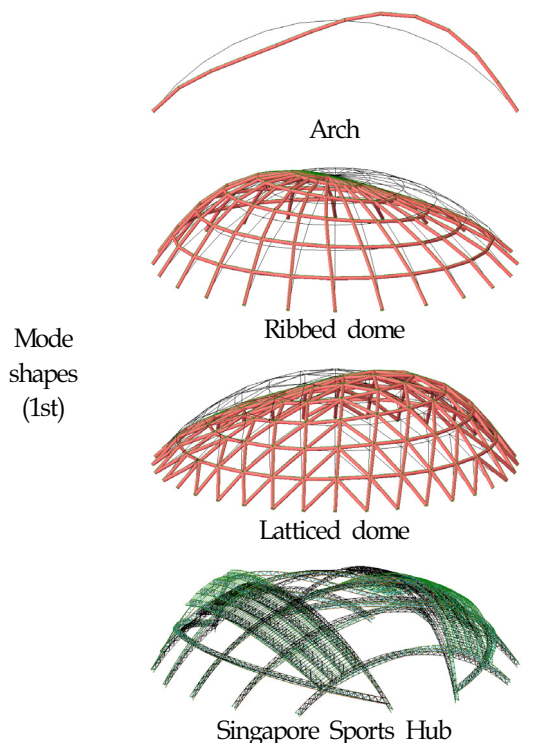


(Fig. 1) Analysis model of spatial structures

해석모델에 사용된 대공간 구조물은 2차원 아치 구조물과 3차원 돔 구조물을 설정하여 <Fig. 1>과 같이 나타내었다. 3차원 대공간 구조물은 지붕 구조에 일반적으로 이용되는 형상인 리브 돔(Ribbed dome)과 래티스 돔(Latticed dome)을 설정하였으며, 추가적으로 실제 건설된 싱가포르 스포츠 허브 경기장을 해석모델로 설정하였다. 2차원 아치 구조와 리브 돔, 래티스 돔을 선택한 이유는 선행 연구^{7),8)}를 바탕으로 기본적인 대공간 구조물에 TMD를 설치한 후 지진하중에 대한 변위 응답 특성을 파악하고자 단순화된 모델링을 선정하였다.

<Table 1> Analysis model specifications of spatial structures

	Arch	Ribbed dome	Latticed dome	Singapore Sports Hub
Material	SM355			
Section	P400 X 5		P300~600 X 10	
Structure mass (kN)	20.28	406.69	5466.1	38038.8
Structure period (sec)	0.3513	0.2502	0.1998	2.9987
Structure frequency (Hz)	2.8463	3.9974	5.0038	0.3335



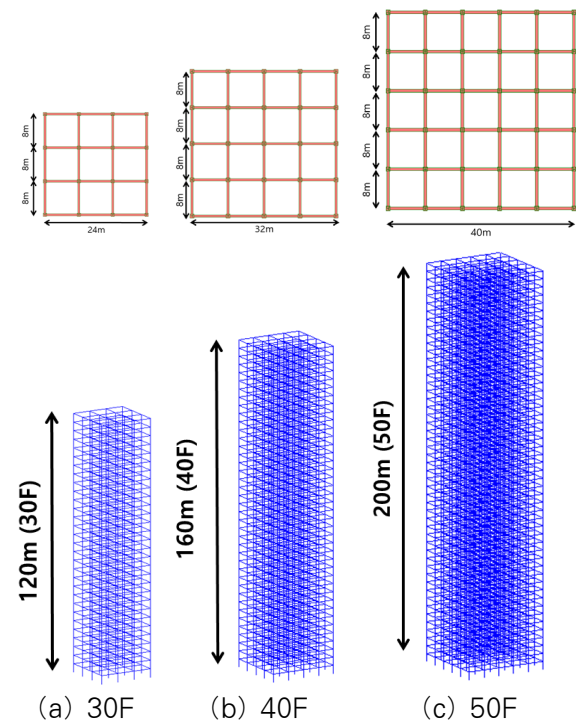
※ ●: Installation position of TMD
<Fig. 2> Plot planning of TMD (Spatial structures)

해석모델의 높이와 경간은 <Fig. 1>에 나타내었으며, 해석모델에 대한 제원과 1차 모드 주기 및 고유진동수는 <Table 1>에 나타내었다. 그리고 1차 모드에 대한 모드형상도 함께 확인할 수 있다.

<Fig. 2>는 TMD의 설치 위치를 나타내었으며, 아치 구조에는 좌·우측 1/4지점에 하나씩 총 2개의 TMD를 설치하였다. 리브 돔과 래티스 돔은 기본적으로 1/4지점의 위치에 TMD를 설치하고, 선행 연구^{7),8)} 결과에 따라 8개의 TMD를 설치하였다. 또한 싱가포르 스포츠 허브 경기장은 선행 연구^{8),9)} 결과에서 지진하중에 대한 변위 응답 저감 효과가 가장 뛰어났던 해석모델을 선정하여 8개의 TMD를 설치하였다.

2.2 고층건물 해석 모델

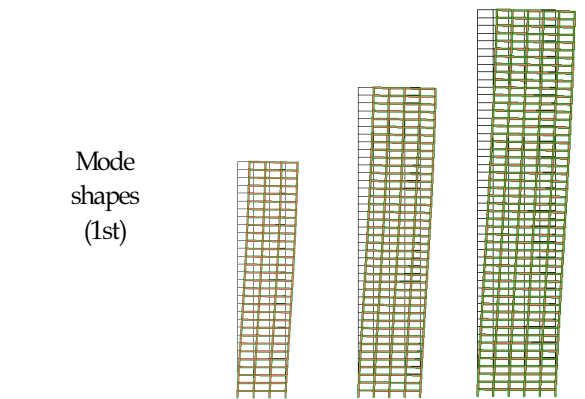
TMD를 설치한 후 대공간 구조물과 특성을 비교하고자 <Fig. 3>과 같이 고층건물을 모델링하였다. 해석모델의 경간과 높이는 그림과 같으며, 30층, 40층, 50층 총 3개의 해석모델을 선정하였다. 층수는 서로 다르게 설정하였으나 동일한 세장비를 가지도록 모델링 하였으며, 높이 및 경간에 대한 정보는 그림과 표에 함께 나타내었다. 고층건물의 제원은 <Table 2>에 나타내었다. 대공간 구조물 제원과 동일하게 1차 모드에 대한 모드형상도 함께 확인할 수 있다.



〈Fig. 3〉 Analysis model of high-rise buildings

〈Table 2〉 Analysis model specifications of high-rise buildings

	30F	40F	50F
Height (m)	120 (4m×30F)	160 (4m×40F)	200 (4m×50F)
Width (m)	24	32	40
Slenderness ratio	1 : 5		
Material	Concrete / $f_{ck}=24\text{MPa}$		
Section (mm)	Column 800×800 Girder 500×800	900×900 500×900	900×900 600×900
Period (sec)	3.2781	4.0709	5.2296
Frequency (Hz)	0.3051	0.2456	0.1912



(a) Installation position (b) Installation detail¹⁰⁾

※ ●: Installation position of TMD

〈Fig. 4〉 Plot planning of TMD (High-rise buildings)

〈Fig. 4 (a)〉는 TMD를 고층건물의 최상층에 배치한 평면도이며, TMD 설치 개수는 대공간 구조물과 동일하게 8개이다. 〈Fig. 4 (b)〉는 X방향과 Y방향에 설치한 TMD를 도식화한 그림이다.

2.3 TMD 설계

고유진동수는 TMD의 성능을 확보하는데 있어 가장 중요한 변수이다. 구조물의 고유진동수에 동조되어야 최적의 제어 성능을 확보할 수 있으며, 동조되지 않을 경우 질량체는 단순히 수직하중의 증기를 가져올 뿐 아니라 특정한 경우에는 오히려 구조물의 변위 응답을 증폭시킬 수 있다. 감쇠비는 질량체 자체의 거동을 줄이기 위한 것으로 일반적으로 질량비 및 구조물의 감쇠비에 따라 특정한 값에서 최적의 성능을 보이는 것으로 알려져 있다¹⁵⁾.

구조물의 동적응답을 제어하기 위해 TMD의 최적 감쇠비 및 최적 진동수비에 대한 연구가 그간 많이 수행되어 왔다. Den Hartog(1947)는 조화하중이 구조물을 직접 가진하는 비감쇠 구조물에 대하여 구조물이 변위 응답을 최소화하는 최적진동수비와 감쇠비를 제안하였다¹¹⁾. Warburton(1982)은 비감쇠 구조물에 대하여 하중의 종류, 하중 작용 위치 그리고 최적화 기준에 따른 최적설계변수의 변화를 정리하였다¹²⁾. Sadek et al.(1998)은 지진하중을 받는 구조물에 대하여 TMD가 설치된 구조물의 고유치해석을 통해 최적진동수비와 최적감쇠비 산정식을 제안하였다¹³⁻¹⁵⁾.

본 연구에서는 Warburton(1982)이 제안한 TMD 설계변수 최적값을 사용하였다. 식 (1)은 최적감쇠비, 식 (2)는 최적진동수비를 산정하는 방정식이다.

$$\xi_d = \sqrt{\frac{\mu(1-\mu/4)}{4(1+\mu)(1-\mu/2)}} \quad (1)$$

$$f_{opt} = \frac{\sqrt{1-\mu/2}}{1+\mu} \quad (2)$$

여기서, ξ_d 는 TMD의 최적감쇠비, f_{opt} 는 최적진동수비, μ 는 질량비(m_d/m_s)를 의미한다. 질량비는 전체 구조물의 질량(m_s)과 TMD의 질량(m_d)에 대한 비를 의미한다.

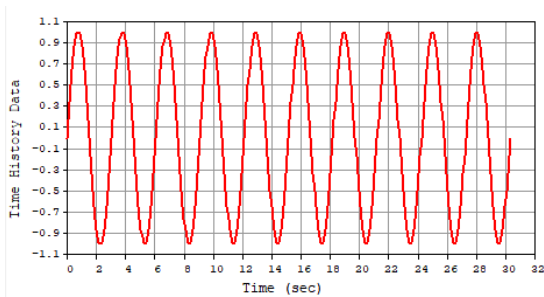
식 (3)은 TMD의 강성, 식 (4)는 TMD의 감쇠를 산정하는 방정식이다.

$$K_d = w_d^2 m_d \quad (3)$$

$$C_d = 2\xi_d w_d m_d \quad (4)$$

여기서, w_d 는 TMD 고유진동수($w_d = f_{opt} w_s$), m_d 는 TMD 질량($m_d = \mu m_s$)을 의미한다.

앞서 언급한 바와 같이 TMD는 구조물의 진동수와 동일한 진동수를 가지도록 설계되어야 최대의 응답 저감 효과를 나타낼 수 있다. 그러므로 TMD는 최적감쇠비와 최적진동수비 식에 의해 전체구조물의 1차 고유진동수에 맞춰 설계하였다. 기본적으로 TMD 1개의 질량은 구조물 질량의 1%로 설정하고, 점진적으로 질량을 줄여가며 변위 응답을 분석하였다. 그리고 <Fig. 5>와 같이 사용한 지진하중은 해석모델별로 전체구조물의 1차 고유진동수와 동일한 공진조화하중을 가진하여 해석을 수행하였다.



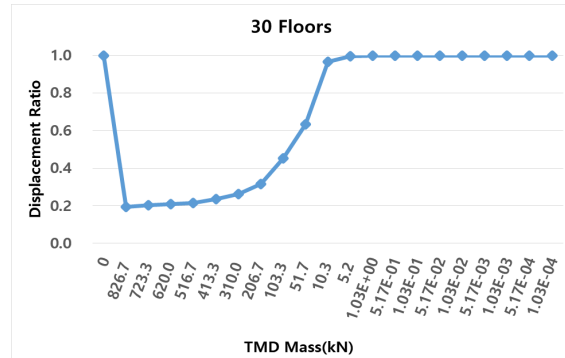
<Fig. 5> Earthquake wave
(Resonance harmonic loads: $f = 0.33Hz$)

3. 변위 응답 분석

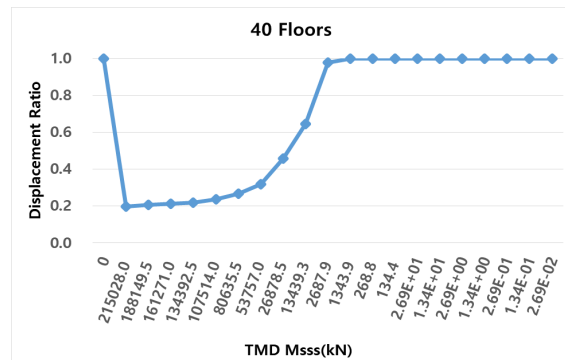
해석결과에 대한 분석은 고층건물의 변위 응답 분석을 먼저 수행하였고, 대공간 구조물에 대한 변위 응답을 분석한 후 비교하는 방식으로 나타내었다.

3.1 고층 건물의 변위 응답

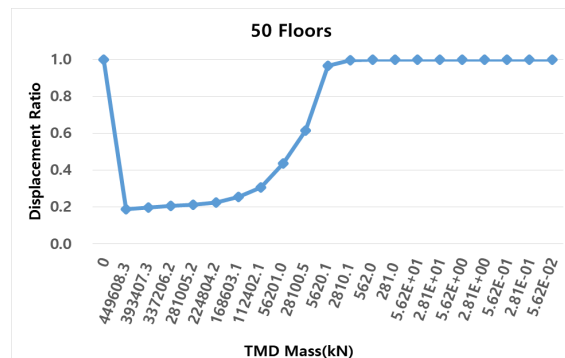
<Fig. 6>은 고층건물에 8개의 TMD를 설치한 후 최상층의 수평 변위 응답을 나타내었다. 그래프에서 x축은 TMD 1개의 질량이며, y축은 TMD를 설치하지 않은 해석모델에 대한 최대 수평 변위 응답비를 나타낸다.



(a) 30F



(b) 40F



(c) 50F

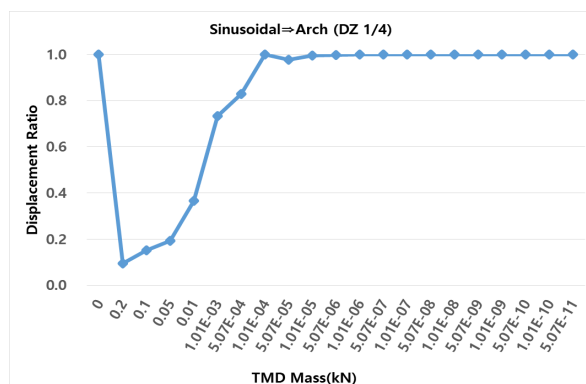
<Fig. 6> Maximum horizontal displacement of high-rise buildings

〈Fig. 6〉에 나타난 대표적인 특징은 3개의 해석모델 모두 그래프의 양상이 유사하다는 것이다. 층수와 TMD의 개당 질량은 모두 상이하지만, 동일한 세장비와 평면의 형상이 유사하여 이와 같이 나타난 것으로 판단된다. 30층 해석모델의 경우 TMD의 개당 질량을 1% (826.7kN)로 설치하였을 때 최대 81%의 응답 저감 효과를 나타냈다. 그리고 TMD 질량을 점차 줄여가면서 개당 질량이 0.125%(103.3kN)까지 줄었을 경우에는 55%까지 변위 응답이 감소하였다. 하지만 TMD의 개당 질량을 0.0125%(10.3kN)로 설정한 이후부터는 TMD를 설치하지 않았을 때와 동일한 변위 응답을 나타내었고, TMD로서의 역할을 하지 못하였다. 이러한 양상은 40층과 50층의 해석모델 모두 비슷하게 나타났다.

3.2 대공간 구조물의 변위 응답

고층건물에서는 수평방향의 지진하중에 대해서 수평방향 변위 응답 결과를 검토하였으나, 대공간 구조물은 수직방향 변위 응답에 대한 검토를 실시하였다. 그 이유는 대공간 구조물이 가지는 특성 중 하나로 수평방향의 지진하중에 대해 동적응답은 주로 수직방향으로 나타난다는 것이다. 본 연구에서 설정한 대공간 구조물을 통해 검증한 결과, TMD를 설치하지 않은 해석모델의 'a'지점에서는 수직방향 변위 응답이 다소 크게 나타남을 확인하였다.

〈Fig. 7〉은 2차원 아치구조물에 2개의 TMD를 설치한 후 'a'지점에서의 최대 수직 변위 응답을 그래프로 나타내었다. 그래프의 양상은 앞서 고층건물의 그래프와



〈Fig. 7〉 Maximum vertical displacement of arch structure ('a' point)

유사한 형태를 나타내고 있다. 1개의 TMD 질량을 1%(0.2kN)로 설치하였을 때 최대 90.5%의 응답 저감 효과가 나타났으며, 0.0005%(1.0E-04kN)까지 감소시킨 이후부터는 TMD로서의 역할을 다하지 못하였다.

3차원 대공간 구조물의 해석 결과는 〈Fig. 8〉에 나타내었다. 3개의 해석모델은 전반적으로 유사한 그래프 양상을 띄고 있다. 지진하중에 대한 응답 저감 효과가 뛰어난 해석모델은 싱가포르 스포츠 허브 경기장이다. 최대 95.5%까지 변위 응답이 줄었으며, 질량을 줄여가며 특정 구간까지는 71.4%까지 변위 응답이 줄어든 후 설치하지 않았을 때의 변위 응답과 같아졌다.

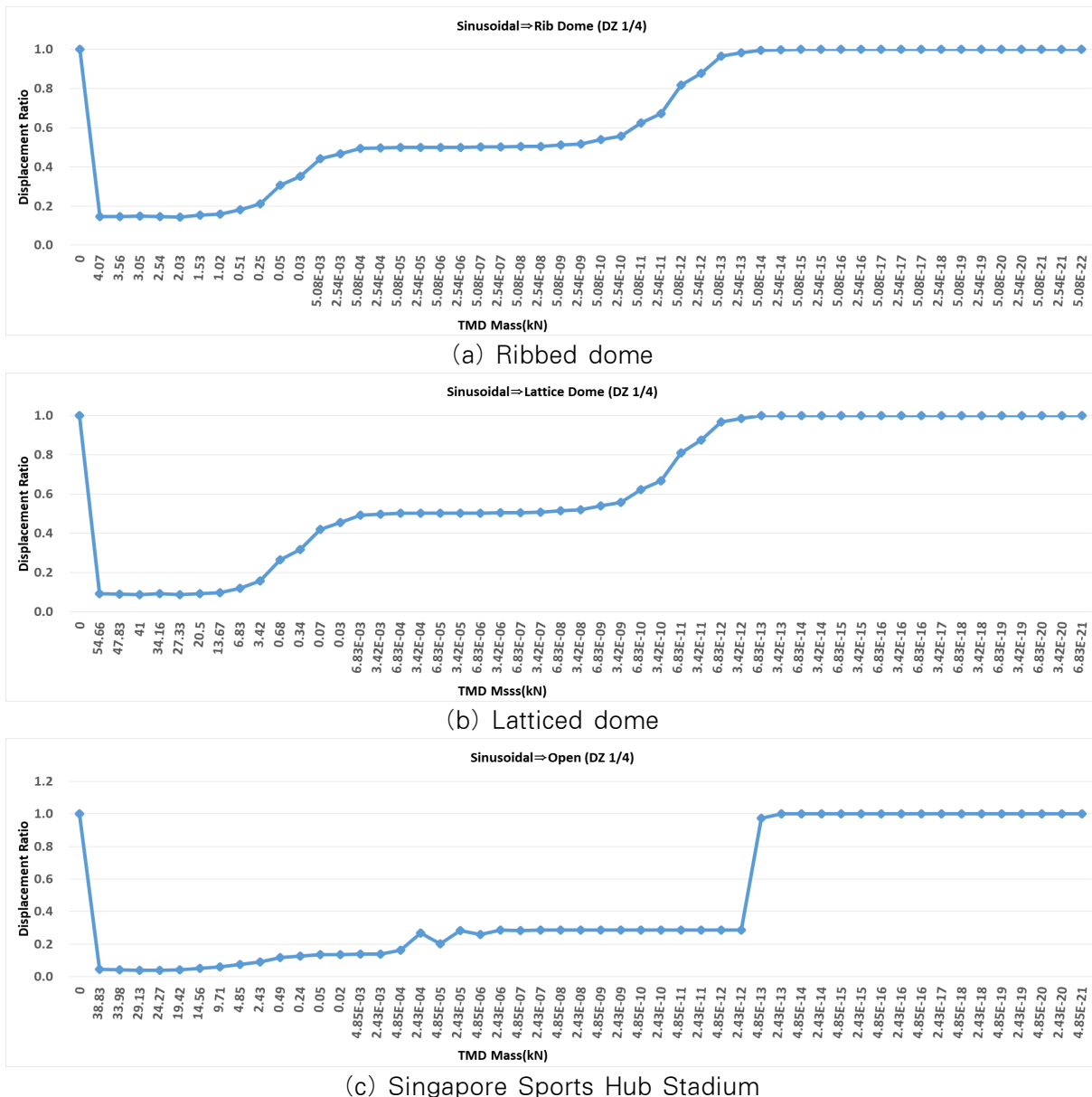
리브돔은 최대 85%, 래티스돔은 최대 90%의 변위 응답 저감 효과를 나타내었다. 질량을 점점 줄여가면서 제어 효과가 50%가량 일정하게 나타난 이후 TMD를 설치하지 않은 해석모델과 같은 변위를 나타내었다.

3차원 대공간 구조물의 해석 결과 그래프를 보고 참고해야 할 사항으로 TMD 질량값에 대한 수치적인 부분에 의미를 부여하기보다 그래프의 양상에 더욱 주목해야 할 것으로 사료된다.

선행 연구^{7),8)}를 통해서 대공간 구조물에 TMD를 설치하고 지진하중에 대한 응답을 분석한 바 있다. 대공간 구조물에 TMD를 설치할 때는 설치 질량에 대한 부분도 중요하지만 설치되는 위치도 중요한 요인으로 작용한다. 특히 싱가포르 스포츠 허브 경기장의 경우는 선행 연구를 통해 응답 저감 효과가 가장 좋은 위치에 TMD를 설치하고 개당 질량을 감소시킨 것이기에 설치 질량을 무수히 감소시켜도 지진하중에 대한 응답 저감 효과는 뛰어난 것으로 판단된다. 리브돔과 래티스돔도 마찬가지로 설치 위치의 영향이 동시에 작용하여 응답 저감 효과가 뛰어났다.

대공간 구조물은 고층건물에 비해 큰 강성을 가지고 있으나 상대적으로 구조물의 질량은 작은 편이다. 이에 작은 질량의 TMD를 설치하여도 응답 저감 효과가 우수하게 나타난 것으로 사료된다. 동시에 최적의 위치에 구조물의 고유진동수에 맞게 동조된 TMD 질량을 사용하여 그래프와 같은 결과가 나타난 것으로 판단된다.

가령 3차원 대공간 구조물에 8개의 TMD를 중앙부에 집중시켜서 설치한 후 동일한 방법으로 질량을 줄여가며 동적응답을 분석하였다면 〈Fig. 8〉과 같은 응답을 기대하기는 힘들었을 것이다. 선행 연구⁷⁾에서 TMD 설치



(Fig. 8) Maximum vertical displacement of spatial structures ('a' point)

위치에 대한 구획화(Zoning)를 제안하면서 설치 위치에 대한 중요성을 언급하였으며, 해석 결과를 통해 이를 뒷받침할 만한 결론을 도출한 바 있다.

3.3 질량비와 변위 응답비의 관계

3.1절과 3.2절에서 분석한 결과를 바탕으로 (Fig. 9)는 1개당 TMD 질량비와 변위 응답비의 상관관계를 그래프로 정리하였다. TMD의 질량비를 0~1%로 변화시켜 가면서 구조물의 변위 응답을 검토하였다. 일반적으로 구조물에 설치되는 TMD의 질량을 크게 할수록 동적응답 제어 성능이 증가하게 된다. 이러한 원리에 따라

(Fig. 9)에서 볼 수 있듯이 고층건물과 대공간 구조물의 그래프 모두 TMD의 질량비가 증가함에 따라 제어 성능이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

(Fig. 9 (a))에서 일반적인 고층건물의 변위 응답을 전반적으로 살펴보면 TMD 질량비가 0.4%가 될 때까지는 급격하게 줄어들었다. 그리고 0.4~0.6%까지는 완만하게 줄어들고, 0.6% 이후부터는 변위 응답이 거의 비슷하다고 볼 수 있다. 이러한 양상은 3개의 해석모델 모두 유사하게 나타난다.

상대적으로 지진하중에 대한 제어 효과가 가장 우수한 50층의 해석모델을 보면 TMD 질량비가 0.125%까지

는 변위 응답이 56.5% 정도로 감소하였다. 이후 질량비가 0.375%까지는 변위 응답이 74.6% 줄었으며, 질량비가 0.625%까지는 변위 응답이 78.9% 줄어들었다. 이후 질량비가 1%일 때는 최대 81.3%까지 줄어들었다. 사실 상 0.625~1% 구간의 질량비를 가질 때는 응답 저감율이 2.4% 이내로 변화폭이 크지 않고 비슷하다고 할 수 있다. 그렇기 때문에 상대적으로 작은 질량비를 설치하는 것이 더 효과적일 것이라 판단된다. 따라서 일반적인 고층건물에 TMD 질량비를 설계할 때는 0.4~0.6% 범위가 최적 질량비라고 할 수 있다.

〈Fig. 9 (b)〉에서 대공간 구조물의 변위 응답을 전반적으로 살펴보면 일반적인 고층건물과는 확연히 다른 차이를 확인할 수 있다. 대부분의 질량비에서 20% 이상 변위 응답을 줄일 수 있었다. TMD 질량을 작은 비율로 설치하여도 제어 성능이 뚜렷하게 나타나는 것이 특징이다.

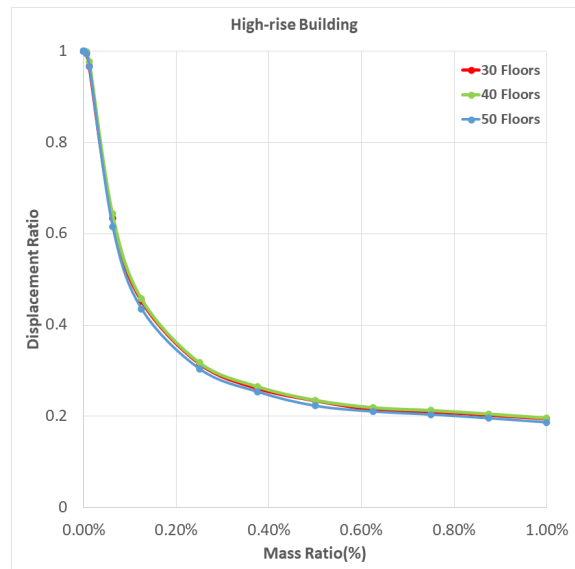
2차원 아치 구조물의 경우 TMD 질량비가 0.25%까지는 변위 응답이 80.7% 줄었으며, 질량비가 0.5%까지는 변위 응답이 85% 줄어들었다. 이후 질량비가 1%일때는 최대 90%까지 줄어들었다.

3차원 해석모델에서 싱가포르 스포츠 허브 경기장의 그래프를 보면 TMD 질량비가 0.125%까지는 변위 응답이 92.4% 정도로 크게 감소하였다. 이후 질량비가 0.25%까지는 변위 응답이 94% 줄었으며, 질량비가 1%까지는 변위 응답이 95.5% 줄어들었다. 고층건물의 분석 결과와 마찬가지로 0.25~1% 구간에서는 변화폭이 크지 않고 비슷함을 알 수 있다. 이러한 양상은 응답저감율만 다를 뿐 리브돔과 래티스돔에서도 유사하게 나타난다.

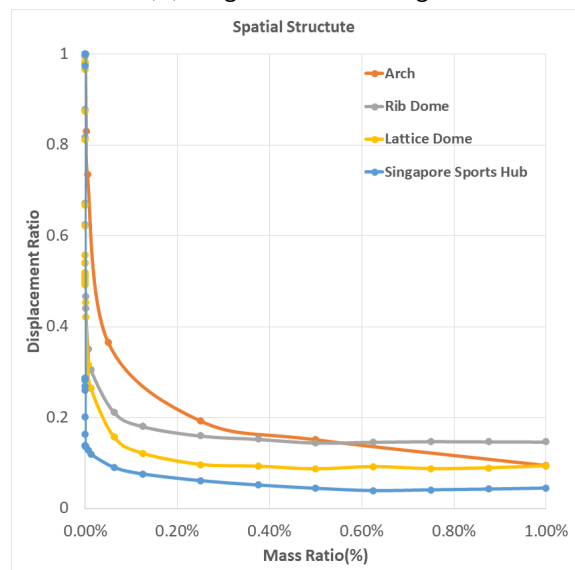
리브돔의 경우 TMD 질량비가 0.25%까지는 변위 응답이 84% 줄었고, 질량비가 1%일때는 85.3% 줄었다. 래티스돔의 경우 TMD 질량비가 0.25%까지는 변위 응답이 87.9% 줄었고, 질량비가 1%일때는 90.7% 줄었다. 질량비가 0.25~1% 구간에 대해서는 각각 1.5%와 2.8%로 변화폭이 크지 않고 비슷함을 알 수 있다. 따라서 대공간 구조물에 TMD 질량비를 설계할 때는 0.1~0.2% 범위가 최적 질량비라고 판단된다.

이처럼 평면이 유사하고 동일한 세장비를 가진 고층건물과 달리 대공간 구조물은 평면의 형상이 상이함에도 불구하고 해석모델 모두 TMD 설치에 따른 제어 성

능이 우수함을 알 수 있다. 즉, 대공간 구조물에 TMD를 설치하는 것이 고층건물에 TMD를 설치하였을 때보다 상대적으로 작은 질량의 TMD를 설치하여도 큰 효과를 볼 수 있다는 것이다.



(a) High-rise buildings



(b) Spatial structures

〈Fig. 9〉 Mass ratio vs. Displacement ratio

4. 결론

본 연구에서는 지진하중을 받는 대공간 구조물과 고층건물에 TMD를 설치한 후 질량 변화에 따른 변위 응답을 분석하였다. 앞선 분석 결과에서 알 수 있듯이 구

조물에 TMD를 설치하고 지진하중에 대해 우수한 제어 성능을 확보하기 위해서는 최적의 TMD 질량을 선정하는 것이 가장 중요한 변수이다. 특히 대공간 구조물과 같이 강성이 크고 질량이 상대적으로 작은 구조물에는 큰 질량감쇠기를 설치하는 것은 구조물의 안전성에 나쁜 영향을 미칠 가능성이 크기 때문에 더욱이 중요하다고 할 수 있다.

TMD를 설치하고 질량비 변화에 따라 해석한 결과를 종합적으로 분석해보면 다음과 같다. 고층건물과 비교하여 대공간 구조물에 나타나는 가장 대표적인 특징은 작은 TMD 질량비에도 제어 성능이 우수하다는 점이다. 또한 구조설계 단계에서 TMD 질량비를 선정할 때는 다음과 같은 범위 내에서 선택하는 것을 제안한다. 고층건물의 경우 0.4~0.6%의 질량비($0.4 < \mu < 0.6$), 대공간 구조물에서는 0.1~0.2%의 질량비($0.1 < \mu < 0.2$)를 선택하는 것이 바람직하다고 판단된다. 전술한 바와 같이 상기 범위 내에서 선정하되, 구조해석 프로그램을 이용한 시뮬레이션 과정을 거쳐 구조물의 안전성이 반드시 확보된 상태에서 TMD 설계가 이루어져야 한다.

향후 대공간 구조물에 설치되는 TMD 질량과 위치를 보다 체계적으로 일반화하고자 다양한 형태의 해석모델을 선정하여 동적하중에 대한 제어 성능을 확보하기 위한 연구를 진행하고 있다. 또한 동적하중에 대해 고려할 때 본 연구에서 사용한 공진조화하중과 더불어 역사지진하중 및 풍하중을 추가하여 분석할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(국토교통부)의 재원으로 국토교통과학기술진흥원(20AUDP-B100343-06)에 의해 수행되었습니다.

References

- Hassani, S., & Aminafshar, M., "Optimization of pendulum tuned mass damper in tall building under horizontal earthquake excitation", *Bulletin de la Societe Royale des Sciences de Liege*, Vol.85, pp.514~531, 2016
- Patil, S. S., Javheri, S. B., & Konapure, C. G., "Effectiveness of Multiple Tuned Mass Dampers", *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, Vol.1, No.6, pp.78~83, 2012
- Lee, S. H., Chung, L., Woo, S. S., & Cho, S. H., "Performance Evaluation of Semi-Active Tuned Mass Damper for Elastic and Inelastic Seismic Response Control", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.11, No.2, pp.47~56, 2007, doi: 10.5000/EESK.2007.11.2.047
- You, K. P., "The Aeroelastic Experiment Vibration Response of Tall Building to Wind Loads Using TMD", *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol.20, No.12, pp.37~44, 2004
- Kim, H. S., & Lee, D. G. (2008). Use of Semi-active TMDs for Reduction of Wind-induced Response of Tall Buildings. *Proceedings of the Earthquake Engineering Society of Korea, Republic of Korea*, pp.221~228
- Kang, J. W., Kim, G. C., & Kim, H. S., "Seismic Response Control of Arch Structure using Semi-active TMD", *Journal of Korean Association for Spatial Structures*, Vol.10, No.1, pp.103~110, 2010
- Lee, Y. R., Kim, H. S., & Kang, J. W., "Investigation Into Optimal Installation Position of TMD for Efficient Seismic Response Reduction of Retractable-Roof Spatial Structure", *Journal of Korean Association for Spatial Structures*, Vol.18, No.2, pp.43~50, 2018, doi: 10.9712/KASS.2018.18.2.43
- Lee, Y. R., Ro, H. S., Kim, H. S., & Kang, J. W., "Seismic Response Control Performance Evaluation of Retractable-Roof Spatial Structure With Variation of TMD Mass", *Journal of Korean Association for*

- Spatial Structures, Vol.19, No.1, pp.75~82, 2019, doi: 10.9712/KASS.2019.19.1.75
9. Kim, D. H., Kim, H. S., & Kang, J. W., "A Study on Optimum Mass of TMD for Improving Seismic Response Control Performance of Retractable-Roof Spatial Structure", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.19, No.3, pp.93~100, 2019, doi: 10.9712/KASS.2019.19.3.93
 10. Farghaly, A. A., "Optimum Design Of TMD System For Tall Buildings", International Journal of Optimization in civil Engineering, Vol.2, No.4, pp.511~532, 2012
 11. Den Hartog, JP., "Mechanical vibrations", 3rd ed., New York, London, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1947.
 12. Warburton, G. B., "Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol.10, No.3, pp.381~401, 1982, doi: 10.1002/eqe.4290100304
 13. Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A. W., & Chung, R. M., "A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol.26, No.6, pp.617~635, 1998, doi: 10.1002/(SICI)1096-9845(199706)26:6<617::AID-EQE664>3.0.CO;2-Z
 14. Leung, A. Y. T., & Zhang, H., "Particle swarm optimization of tuned mass dampers", Engineering Structures, Vol.31, No.3, pp.715~728, 2009, doi: 10.1016/j.engstruct.2008.11.017
 15. Lee, S. H., Woo, S. S., Cho, S. H., & Chung, L., "Optimal Design of Tuned Mass Damper Considering the Friction between the Moving Mass and Rail", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol.17, No.6, pp.553~559, 2007, doi: 10.5050/KSNVN.2007.17.6.553
- Received : August 10, 2020
 - Revised : August 26, 2020
 - Accepted : August 26, 2020