

돔 형상 대공간 구조물의 TMD 질량 변화에 따른 변위응답분석

Displacement Response Analysis According to TMD Mass Change of Dome-Shaped Large Spatial Structures

이 아 롬*
Lee, A-Rom

강 주 원**
Kang, Joo-Won

Abstract

As people's living standards and cultural standards have developed, interest in culture and art has increased, and the demand for large space structures where people can enjoy art, music, and sports has increased. As it accommodates a large number of personnel, it is most important to ensure safety of large spatial structures, and can be used as a space where people can evacuate in case of a disaster. Large spatial structures should be prepared for earthquake loads rather than wind loads. In addition to damage to the structure due to earthquakes, there are cases in which it was not utilized as a space for evacuation due to the fall of objects installed on top of the structure. Therefore, in this study, the dome-shaped large spatial structure is generalized and the displacement response according to the number of installations, position and mass is analyzed using a tuned mass damper(TMD) that is representative vibration control device.

Keywords : Dome shape, Large spatial structure, Tuned mass damper, Mass ratio, Displacement response

1. 서론

대공간 구조물은 수직적인 일반 라멘 구조물과는 달리 부재를 3차원으로 배치하여 자중과 외부의 하중에 저항하고, 기둥 없이 넓은 공간을 덮는 수평적인 구조물을 말한다. 시대와 함께 다양한 대공간 구조시스템이 발전되어 왔다¹⁾. 건설 재료가 발전되고, 공장 생산으로 인해 구조물의 크기는 점점 거대해짐에 따라 전시장, 집회장, 경기장 등 다양한 용도로 활용되는 대공간 구조물이 건설되기 시작하였다. 현대사회에 이르러 사람들의 생활 및 문화 수준이 빠르게 발전하면서 문화, 예술 등에 대한 관심도 높아졌다. 이에 따라 올림픽, 월드컵, 엑스포 등의 국제 행사를 개최하고 미술, 음악, 스포츠 등을 즐길 수 있는 대공간 구조물에 대한 수요가 증가하였다²⁾.

다수의 인원을 수용하는만큼 대공간 구조물은 초기 계획 단계에서부터 시공 및 유지관리에 이르기까지 안

전성을 확보하는 것이 가장 중요하다. 안전성이 확보된 대공간 구조물은 본래의 용도뿐만 아니라 화재, 태풍, 지진 등의 재난 상황 시 많은 사람들이 대피할 수 있는 피난처의 역할로도 활용될 수 있다. 대공간 구조물은 일반적인 라멘 구조물에 비해 하중 전달 능력이 뛰어나 경량화가 가능하고, 지진하중과 풍하중에 대하여 비교적 안전하다고 알려져있다. 대공간 구조물은 초고층이 아닌 중저층의 형상을 띠고 있어 풍하중보다 지진하중에 대비할 필요가 있다. 지진에 의한 여러 피해 사례를 살펴보면 구조물 자체의 손상뿐만 아니라 진동에 의해 구조물 상부에 설치된 조명 등의 물체가 떨어져 재난 발생 시 다수의 인원이 안전하게 대피할 수 있는 공간으로 활용되지 못하는 경우가 있다. 이처럼 대공간 구조물은 지진과 같은 동적하중에 대한 대비가 필요하다. 현재 국내 외에서 외부의 진동을 제어할 수 있는 장치를 활용하여 대공간 구조물의 지진하중에 대한 응답을 줄이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다³⁾.

지진의 발생 빈도는 전 세계적으로 꾸준히 증가하고 있다. 우리나라 또한 2016년 경주와 2017년 포항에서 발생한 지진 및 수차례의 크고 작은 여진들로 인해 더 이상 지진으로부터 안전하다고 안심할 수 없으며, 향후

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

다가을 지진에 대비할 필요성이 대두되었다.

대공간 구조물의 지진하중에 대한 응답을 감소시키기 위해 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper; TMD)를 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다. TMD는 구조물의 고유 진동 주기에 동조하여 기계적 감쇠비를 증가시킴으로써 지진에 의한 진동을 제어하는 원리이다. 구조물의 특성에 맞춰 진동 제어 효과를 예측하고 제어할 수 있는 특징이 있어 응답 제어 성능이 우수하여 지진 응답 제어에 가장 많이 활용되고 있는 장치 중 하나이다^{4),5)}.

따라서 본 연구에서는 전 세계의 돔 형상 대공간 구조물의 형상과 규모를 파악하여 단순 일반화한 대공간 구조물에 TMD를 설치하여 최적의 설치 개수 및 위치를 분석한 선행 연구⁶⁾의 결과를 바탕으로 TMD 총 질량비를 고정하고 설치 개수를 늘림으로써 개당 질량비를 감소시켜나가는 방법과 TMD의 총 질량비를 위치에 따라 분배하는 방법으로 TMD의 개당 질량비 변화에 따른 지진하중에 대한 구조물의 변위응답을 분석하고자 한다.

TMD 개당 질량비를 전체 구조물의 1%로 설정한 선행 연구의 결과를 바탕으로 제어 성능이 우수한 Case의 개수와 위치를 기준이 되는 Case로 선정하여 질량을 변화시키기 위해 계획한 2가지 방법을 실시하였다. 기본적인 아치 구조물의 특성을 바탕으로 대공간 구조물을 구성하는 아치 구조물 경간의 1/4지점에 TMD를 설치하였다. 설치 개수가 많을 경우 1/8지점과 3/8지점에도 추가로 설치하였다. 또한 해석 모델에서 응답이 가장 크게 나타난 1/4지점에서의 변위응답을 측정하였다. 이후 해석의 결과로 나타난 기준이 되는 Case 및 질량을 변화시킨 Case의 지진하중에 대한 변위응답을 비율의 그래프로 나타내어 비교·분석하였다. TMD 개당 질량을 감소시킴으로써 상대적으로 질량이 큰 TMD가 부재 및 구조물 전체에 걸쳐 부담이 되는 것을 방지하고 변위응답을 분석하여 TMD 질량의 변화가 지진하중에 대한 응답 제어성능에 어떠한 영향을 미치는지 중점적으로 파악하고자 하였다.

2. 기존 연구 및 이론적 고찰

2.1 아치 구조물의 특성

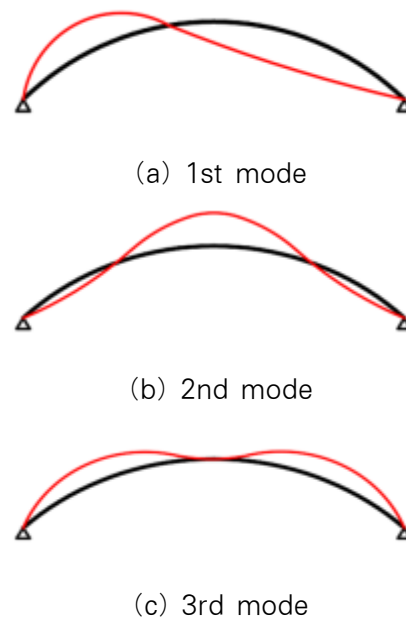
대공간 구조물은 수평 방향 진동의 영향을 크게 받아

수평 방향 변위응답과 함께 수직 방향 변위응답이 발생한다. 경간과 라이즈가 큰 아치 구조 형식의 대공간 구조물에서 이러한 영향이 더 크게 나타난다. 또한 경간이 클수록 고유주기도 길게 나타나 수직 방향 고유주기가 진동의 탁월주기 영역에 근접하게 되면 응답이 증폭되어 큰 변위응답이 나타날 수 있다. 이러한 특성은 돔 형상 구조물에서도 유사하게 나타난다. 돔 형상 구조물은 기본적으로 아치 구조물의 특성을 기반으로 하므로 그 특성을 파악하여 돔 형상 대공간 구조물에 적용할 수 있다.

돔 형상 대공간 구조물에 TMD를 설치하기 위한 최적의 설치 위치를 찾기 위해 분석한 기본적인 아치 구조물의 저차모드 형상은 <Fig. 1>과 같다. 아치 구조물의 저차모드인 1차 모드에서 3차 모드까지의 형상을 분석한 결과, 모드벡터가 가장 큰 지점은 구조물의 좌우측 1/4지점으로 나타났다. 이를 바탕으로 Kim & Kang(2012)은 기본적인 돔 형상 구조물에 TMD를 경간의 1/4지점에 설치하고 1/2지점에도 추가로 설치하여 지진하중에 대한 응답제어성능을 분석하였다⁷⁾.

2.2 대공간 구조물의 지진응답제어

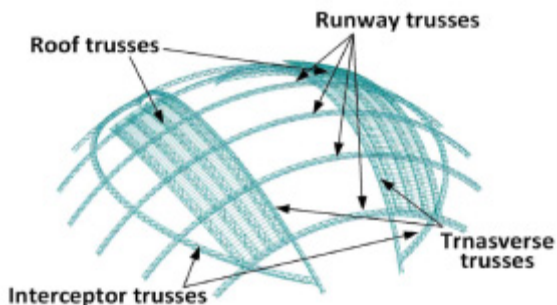
동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper; TMD)는 제어 성능이 우수하고 설치 및 원리가 단순하여 진동제어 장치로 가장 많이 활용되고 있다. 진동을 제어하고자 하



<Fig. 1> Vibration mode shape of arch structure

는 구조물의 고유진동주기에 맞춰 조절될 경우 뛰어난 응답제어성을 나타내어 대공간 구조물의 지진응답을 제어하기 위해 TMD를 활용한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 우수한 성능을 나타내는 것으로 보고되고 있다.

TMD를 조절하고 대공간 구조물의 응답을 효과적으로 제어하기 위해 구조물의 동적특성을 파악하는 것이 가장 중요하다. 특히 일반적인 라멘 구조물이 아닌 돔 형상의 대공간 구조물이나 지붕의 개폐가 가능한 개폐식 대공간 구조물은 부재의 재료, 단면의 크기 그리고 지붕의 개폐 여부 등에 따라 강성 및 질량이 변하고, 다양한 진동모드의 영향과 복잡한 거동을 보인다. 이 때문에 TMD를 구조물에 맞춰 조절하기 위해서는 구조물의 동적특성을 정확하게 파악하는 것이 필수적으로 선행되어야 한다. 또한 하나의 TMD를 설치하는 것만으로 동적하중에 의한 응답을 효과적으로 제어할 수 없기 때문에 다수의 TMD를 설치하여 대공간 구조물을 제어하는 연구가 진행되었다. Lee, Kim & Kang(2018)은 <Fig. 2>와 같이 실제 개폐식 대공간 구조물인 Singapore sports hub를 단순화한 모델에 고유치해석을 수행하여 주요모드형상과 고유진동주기를 파악하였다. 이후 구조물의 동적특성에 맞춰 조절한 TMD를 설치하여 지진하중에 대한 응답제어성을 분석하였다. TMD는 기본적인 아치 구조물의 특성을 적용하여 트러스 경간의 좌우측 1/4지점에 설치하였으며, 최대변위응답이 나타나는 1/4지점에서의 변위응답을 측정하였다. 설치할 수 있는 TMD의 개수와 위치를 변화시켜 다양한 Case에서 나타나는 변위응답을 TMD를 설치하지 않은 모델과 비교하여 응답제어성능이 뛰어난 최적의 개수 및 위치를 분석하였다⁸⁾.



<Fig. 2> Singapore sports hub analysis model

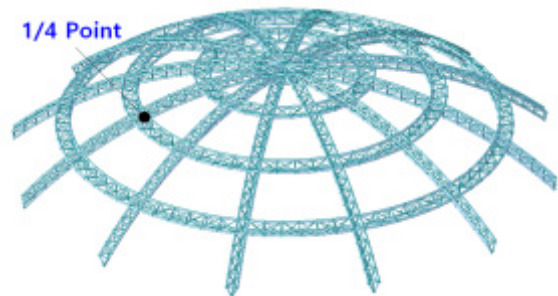
3. 해석 모델 일반사항

3.1 해석 모델

본 연구에서 사용된 3가지 해석 모델은 돔 형상을 가진 전 세계의 여러 대공간 구조물을 조사하고 분류한 뒤 형상과 규모에 따라 표본의 수가 가장 많은 3가지 형상으로 단순 일반화한 것이다. 3가지 해석 모델은 리브형, 래티스형, 타원형으로 모두 3차원 아치 트러스로 모델링하였다. 각 해석 모델의 제원 및 변위응답을 측정할 위치는 다음과 같다.

리브형 해석 모델은 대표적인 리브형 돔 구조물인 Millennium Dome, Brick Breeden Fieldhouse 등의 구조 및 형상의 특징을 바탕으로 모델링하였다. <Fig. 3>은 리브형 해석 모델과 변위응답을 측정할 위치를 나타낸 것이다. 해석 모델의 제원은 <Table 1>과 같다.

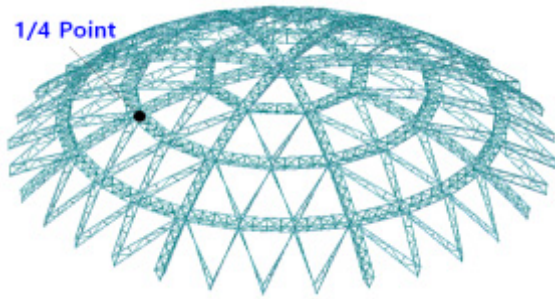
래티스형 해석 모델은 대표적인 래티스형 돔 구조물인 Astrodome, Fukuoka Dome 등의 구조 및 형상의 특징을 바탕으로 모델링하였다. 리브형 해석 모델에서 격자 형태의 부재가 추가된 구조 형태로 리브형 해석 모



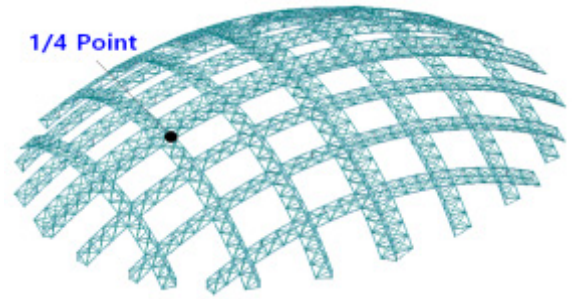
<Fig. 3> Ribbed type analysis model

<Table 1> Specification of ribbed type

Span	200m	
Height	40m	
Material	Steel / KS18-SNT275	
Total mass of structure	6098kN/g (609.8ton)	
1st mode period	0.9404sec	
1st mode frequency	1.0534Hz	
Section (Pipe)	Brace	D = 200mm, t = 10mm
	Vertical	D = 500mm, t = 10mm
	Chord	D = 1,000mm, t = 30mm



〈Fig. 4〉 Latted type analysis model



〈Fig. 5〉 Elliptical type analysis model

〈Table 2〉 Specification of latted type

Span	200m	
Height	40m	
Material	Steel / KS18-SNT275	
Total mass of structure	1893kN/g (189.3ton)	
1st mode period	0.4639sec	
1st mode frequency	2.1554Hz	
Section (Pipe)	Brace	D = 100mm, t = 5mm
	Vertical	D = 300mm, t = 10mm
	Chord	D = 500mm, t = 10mm

〈Table 3〉 Specification of elliptical type

Span	200m X 150m	
Height	40m	
Material	Steel / KS18-SNT275	
Total mass of structure	1457kN/g (145.7ton)	
1st mode period	0.5695sec	
1st mode frequency	1.7561Hz	
Section (Pipe)	Brace	D = 100mm, t = 5mm
	Vertical	D = 300mm, t = 10mm
	Chord	D = 500mm, t = 10mm

텔보다 부재의 양이 많기 때문에 강성이 크고 안정적이다. 〈Fig. 4〉는 래티스형 해석 모델과 변위응답을 측정 한 위치를 나타낸 것이다. 해석 모델의 제원은 〈Table 2〉와 같다.

타원형 해석 모델은 대표적인 타원형 돔 구조물인 Nipro Hachiko Dome, Joe and Rika Mansueto Library 등의 구조 및 형상의 특징을 바탕으로 모델링하였다. 리브형과 래티스형 해석 모델보다 많은 3차원 아치 트러스로 구성되어 상대적으로 TMD를 설치할 수 있는 위치가 많다. 〈Fig. 5〉는 타원형 해석 모델과 변위응답을 측정 한 위치를 나타낸 것이다. 해석 모델의 제원은 〈Table 3〉과 같다.

3.2 입력지진하중

TMD를 설치하였을 때 지진하중에 대한 응답제어성을 분석하기 위해 각 해석 모델에 공진조화하중과 2가지 역사지진하중을 가진하였다. 각 해석 모델의 1차 모드 고유진동수를 이용하여 생성한 공진조화하중은 공진현상으로 인해 구조물에 큰 응답이 발생한다. 이러한 현상을 이용하여 TMD의 응답제어성능을 파악하기 위해 가진하였다. 역사지진하중은 지진하중에 의한 응답을 분석

할 때 많이 사용되는 El Centro 지진하중(1940)과 Kobe 지진하중(1995)을 가진하였다. 3가지 지진하중 모두 최대 지반가속도를 1g로 설정하여 X, Y방향으로 60초간 가진하였다.

4. TMD 질량 변화에 따른 변위응답분석

4.1 TMD 설치 개수 증가에 따른 질량비 감소

TMD 개당 질량비를 전체 구조물 질량의 1%로 설정한 선행 연구의 결과를 바탕으로 리브형, 래티스형, 타원형 돔 형상 해석 모델에 TMD를 설치하였을 때 변위응답이 가장 작게 나타난 Case의 설치 개수와 위치는 리브형, 래티스형 해석 모델의 경우 8개, 타원형 해석 모델의 경우 6개이다. 3가지 해석 모델 모두 중심에 집중적으로 설치하는 것보다 가장자리 부분으로 분산시켜 설치하는 것이 전반적으로 변위응답이 작게 나타났다. 이를 바탕으로 TMD 총 질량비는 리브형, 래티스형 해석 모델의 경우 8%, 타원형 해석 모델의 경우 6%로 고정하였다. 여기에서 리브형, 래티스형 해석 모델은 8개씩 증가시켜 최대 24개, 타원형 해석 모델은 6개씩 증가시켜 최대 18개까지 2배, 3배로 개수를 증가시켜 TMD 설

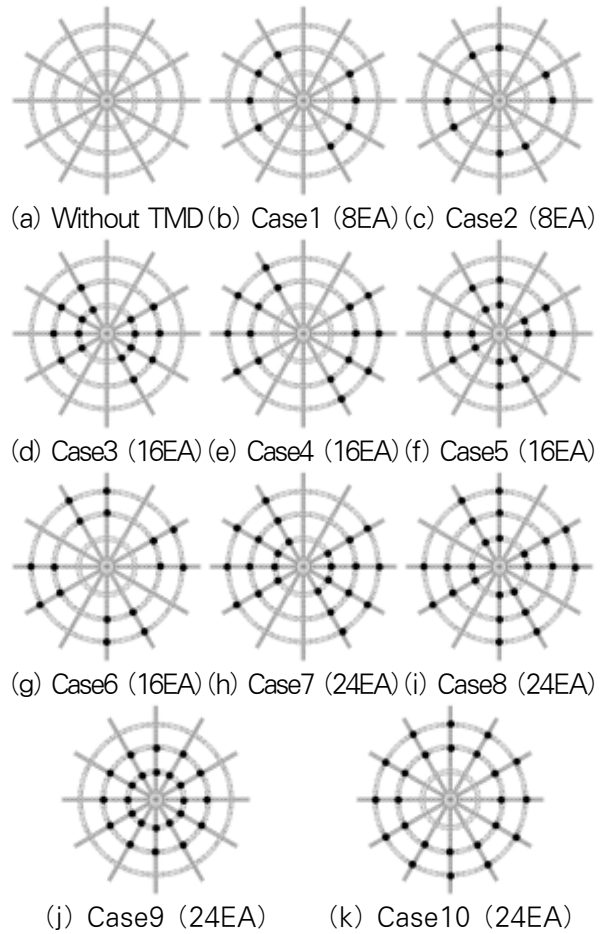
〈Table 4〉 Number and mass of TMD

Type	Number (EA)	Total mass (ton)	Total mass ratio (%)	Mass per each (ton)	Mass ratio per each (%)
Ribbed	8	610	8	6.1	1
	16			3.05	0.5
	24			2.03	0.33
Latticed	8	190	8	1.9	1
	16			0.95	0.5
	24			0.63	0.33
Elliptical	6	146	6	1.46	1
	12			0.73	0.5
	18			0.49	0.33

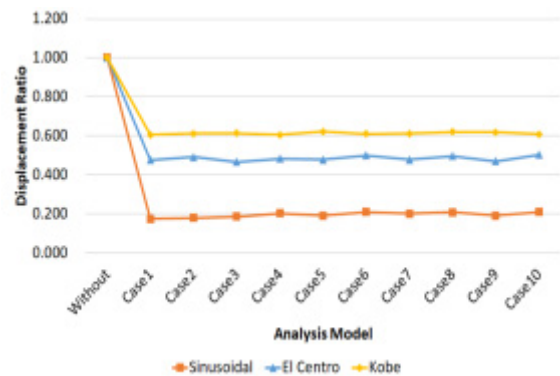
치 개수를 늘리고 개당 질량비를 1/2배, 1/3배로 감소시켰을 때 나타나는 변위응답을 분석하였다. TMD 설치 개수 증가에 따른 각 해석 모델의 개당 질량 및 질량비 변화는 〈Table 4〉와 같다.

〈Fig. 6〉은 리브형 해석 모델의 TMD 개당 질량비 감소에 따른 설치 개수와 위치를 나타낸 것이다. 8개를 설치하였을 때 변위응답이 가장 작게 나타났으므로 8개씩 개수를 증가시켰으며, 아치 트러스의 1/4지점을 기준으로 1/8지점과 3/8지점에 추가로 설치하였다.

〈Fig. 7〉은 리브형 해석 모델에서 3가지 지진하중에 의해 나타난 1/4지점 최대 수직 변위응답과 TMD를 설치하지 않은 모델에 대한 각 Case의 변위응답을 비율로 나타낸 것이다. 전반적으로 리브형 해석 모델은 TMD 개수를 늘려 개당 질량을 변화시켰을 때 변위응답의 편차가 매우 작게 나타났다. 그 중 변위응답이 가장 작게 나타난 Case는 기존의 8개를 설치한 개당 질량비 1%의 Case1이다. Case1의 변위응답은 TMD를 설치하지 않은 모델 대비 공진조화하중에 대하여 약 17%, El Centro 지진하중에 대하여 약 48%, Kobe 지진하중에 대하여 약 61%로 나타났다. 반면 변위응답이 가장 크게 나타난 Case는 24개를 설치한 개당 질량비 0.33%의 Case10이다. 이는 공진조화하중에 대하여 약 21%, El Centro 지진하중에 대하여 약 50% 그리고 Kobe 지진하중에 대하여 약 61%의 변위응답이 나타났다. Case1과 Case10에서 나타난 변위응답의 편차는 약 0~4%로 매우 근소하다. 리브형 해석 모델은 기존에 8개를 설치한 개당 질량비가 1%인 Case1의 변위응답이 가장 작게 나타났다.



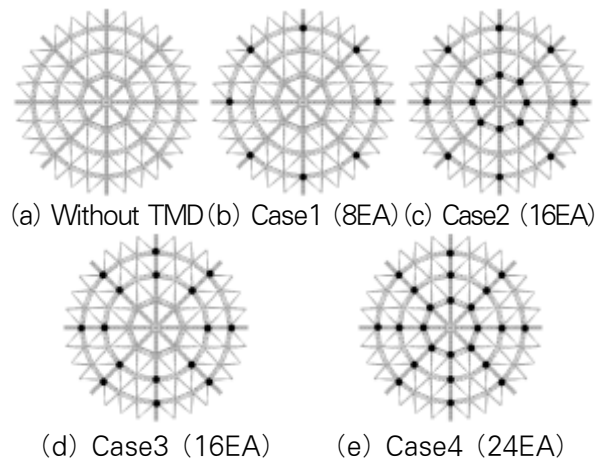
〈Fig. 6〉 TMD number and position (Ribbed type)



〈Fig. 7〉 Maximum vertical displacement ratio at 1/4 point by mass change (Ribbed type)

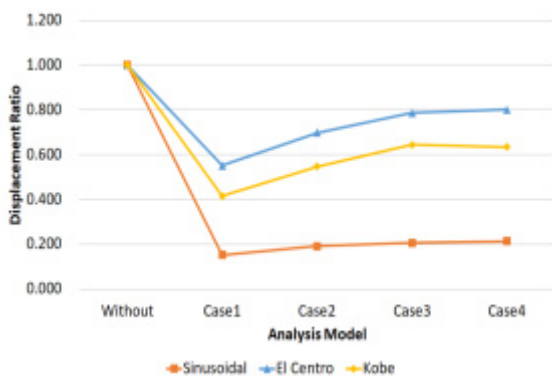
〈Fig. 8〉은 래티스형 해석 모델의 TMD 개당 질량비 감소에 따른 설치 개수와 위치를 나타낸 것으로 리브형 해석 모델과 동일하게 설치하였다.

〈Fig. 9〉는 래티스형 해석 모델의 3가지 지진하중에 의해 나타난 1/4지점 최대 수직 변위응답과 TMD를 설치하지 않은 모델에 대한 각 Case의 변위응답을 비율로

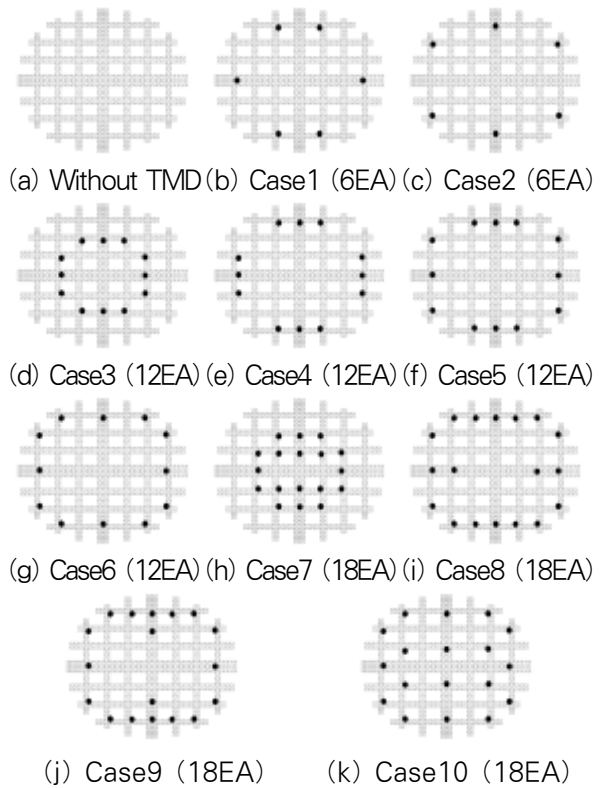


〈Fig. 8〉 TMD number and position (Latticed type)

나타낸 것이다. 래티스형 해석 모델은 변위응답의 편차가 매우 근소하게 나타난 리브형 해석 모델보다 개수를 늘려 개당 질량을 변화시켰을 때 변위응답의 편차가 눈에 띄게 나타났다. 특히 역사지진하중에 대해서 설치 개수를 증가시켰을 때 변위응답이 조금 크게 나타났다. 기존의 8개를 설치한 개당 질량비 1%의 Case1은 TMD를 설치하지 않은 모델 대비 변위응답이 공진조화하중에 대하여 약 15%, El Centro 지진하중에 대하여 약 55%, Kobe 지진하중에 대하여 약 42%로 나타났다. 반면 24개를 설치한 개당 질량비 0.33%의 Case4는 공진조화하중에 대하여 약 21%, El Centro 지진하중에 대하여 약 80%, Kobe 지진하중에 대하여 약 63%로 나타났다. 두 Case 간 약 6~25%의 변위응답 차이를 보였으며, 매우 근소하게 나타난 리브형 해석 모델과는 다르게 개수를 증가시켰을 때 유의미한 차이를 보였다. 래티스형 해석 모델은 기존의 8개를 설치한 개당 질량비가 1%인 Case1의 변위응답이 가장 작게 나타났다.



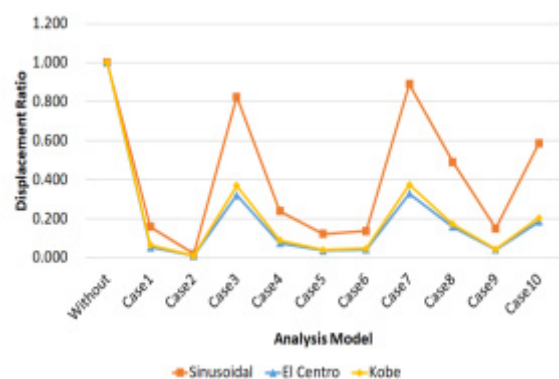
〈Fig. 9〉 Maximum vertical displacement ratio at 1/4 point by mass change (Latticed type)



〈Fig. 10〉 TMD number and position (Elliptical type)

〈Fig. 10〉은 타원형 해석 모델의 TMD 개당 질량비 감소에 따른 설치 개수와 위치를 나타낸 것이다. 타원형 해석 모델은 6개를 설치하였을 때 변위응답이 가장 작게 나타났으므로 6개씩 개수를 증가시켰으며, 설치 위치 또한 중심부터 가장자리까지 다양하게 Case를 나누었다.

〈Fig. 11〉은 타원형 해석 모델의 3가지 지진하중에 의해 나타난 1/4지점 최대 수직 변위응답과 TMD를 설치하지 않은 모델에 대한 각 Case의 변위응답을 비율로 나타낸 것이다. 타원형 해석 모델은 이전의 두 모델에



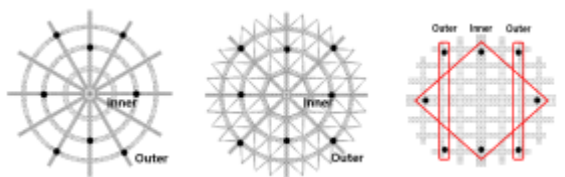
〈Fig. 11〉 Maximum vertical displacement ratio at 1/4 point by mass change (Elliptical type)

비해 변위응답의 편차가 크게 나타났다. 이를 통해 설치 개수와 질량뿐만 아니라 설치 위치에 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 기존의 6개를 설치한 개당 질량비 1%의 Case2는 TMD를 설치하지 않은 모델 대비 공진조화하중에 대하여 약 2%, El Centro 지진하중에 대하여 약 1%, Kobe 지진하중에 대하여 약 1%로 변위응답이 매우 작게 나타났다. 반면 Case2의 위치를 포함하면서 개수가 증가된 Case6 및 Case10의 변위응답을 살펴보면 12개를 설치한 개당 질량비 0.5%의 Case6은 변위응답이 공진조화하중에 대하여 약 14%, El Centro 지진하중에 대하여 약 4%, Kobe 지진하중에 대하여 약 5%로 나타났다. 18개를 설치한 개당 질량비 0.33%의 Case10은 공진조화하중에 대하여 약 59%, El Centro 지진하중에 대하여 약 19%, Kobe 지진하중에 대하여 약 20%로 나타났다. 6개를 설치하였을 때보다 12개, 18개로 개수가 증가할수록 변위응답이 크게 나타났으며, 편차는 약 19~57%로 유의미하였다. 타원형 해석 모델은 기존의 6개를 설치한 개당 질량비가 1%인 Case2의 변위응답이 가장 작게 나타났다.

4.2 TMD 총 질량비 재분배를 통한 질량비 감소

TMD 총 질량비를 설치된 위치에 따라 일정 비율로 재분배하기 위해 선행 연구의 결과를 바탕으로 3가지 해석 모델에서 TMD를 8개 설치하였을 때 변위응답이 작게 나타난 Case 중 재분배에 적합한 Case를 선정하여 <Fig. 12>와 같이 Inner와 Outer로 구획을 설정하였다. 구획한 위치에 따라 총 질량비 8%를 각 TMD에 1:3부터 3:1의 비율로 재분배하고, 개당 질량비를 1%로 설정한 기존의 1:1모델과 비교·분석하였다. Case에 따른 TMD 총 질량비 재분배율은 <Table 5>와 같다.

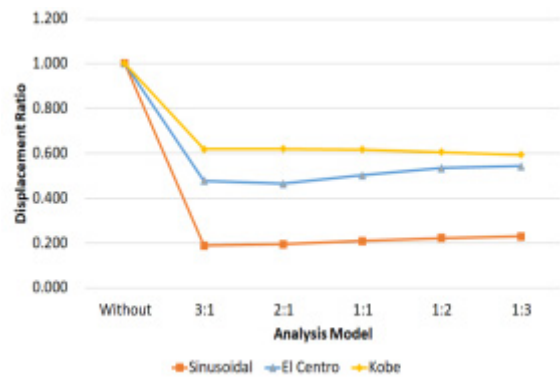
<Fig. 13>은 리브형 해석 모델에서 질량비를 재분배하였을 때 3가지 지진하중에 의해 나타난 1/4지점 최대



(a) Ribbed type (b) Latticed type (c) Elliptical type
<Fig. 12> TMD position and compartment for redistribution

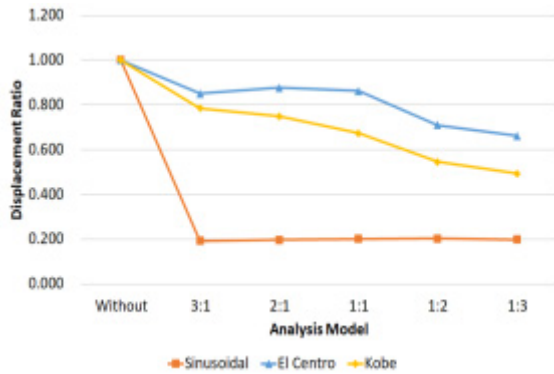
<Table 5> TMD redistribution rate

Total mass ratio (%)	Case	Redistribution ratio	Mass ratio per inner (%)	Mass ratio per outer (%)
8	1	3:1	1.500	0.500
	2	2:1	1.333	0.667
	3	1:1	1.000	1.000
	4	1:2	0.667	1.333
	5	1:3	0.500	1.500



<Fig. 13> Maximum vertical displacement ratio at 1/4 point by redistribution (Ribbed type)

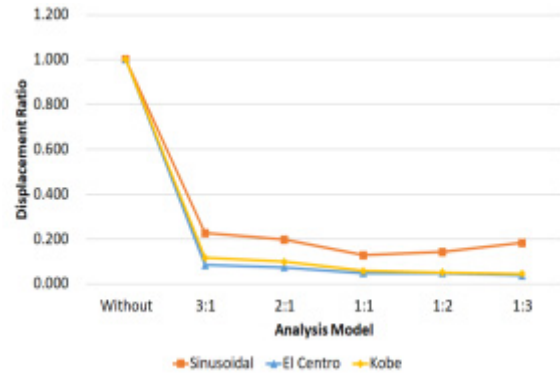
수직 변위응답과 TMD를 설치하지 않은 모델에 대한 각 Case의 변위응답을 비율로 나타낸 것이다. 리브형 해석 모델에서 Inner는 1/4지점에 설치한 경우이며, Outer는 1/8지점에 설치한 경우이다. 공진조화하중과 El Centro 지진하중에 대한 변위응답은 Inner에 질량을 더 많이 분배한 3:1모델 및 2:1모델이 Outer에 질량을 더 많이 분배한 1:3모델 및 1:2모델보다 작게 나타났다. 반대로 Kobe 지진하중에 대한 변위응답은 Outer에 질량을 더 많이 분배한 1:3모델 및 1:2모델에서 조금 더 작게 나타났다. 이처럼 지진하중의 진동 양상에 따라 응답에 미세하게 차이가 나타났으나 리브형 해석 모델에서 재분배를 실시하였을 때 3가지 지진하중 모두에 대한 변위응답은 재분배를 실시하지 않은 1:1모델과 비교하여 약 2%의 근소한 변위응답 차이를 보였다. 종합적으로 리브형 해석 모델은 재분배를 실시하였을 때 변위응답의 편차는 매우 근소하지만 Outer인 1/8지점보다 Inner인 1/4지점에 질량을 더 많이 분배하였을 때 변위응답이 작게 나타났다.



〈Fig. 14〉 Maximum vertical displacement ratio at 1/4 point by redistribution (Latticed type)

〈Fig. 14〉는 래티스형 해석 모델에서 질량비를 재분배하였을 때 3가지 지진하중에 의해 나타난 1/4지점 최대 수직 변위응답과 TMD를 설치하지 않은 모델에 대한 각 Case의 변위응답을 비율로 나타낸 것이다. 래티스형 해석 모델도 리브형 해석 모델과 마찬가지로 Inner는 1/4지점에 설치한 경우이며, Outer는 1/8지점에 설치한 경우이다. 공진조화하중에 대한 변위응답은 Inner에 질량을 더 많이 분배한 3:1모델 및 2:1모델이 Outer에 질량을 더 많이 분배한 1:3모델 및 1:2모델보다 작게 나타났다. 하지만 리브형 해석 모델과 다르게 El Centro 지진하중에 대한 변위응답은 Kobe 지진하중과 같이 Outer에 질량을 더 많이 분배한 1:3모델 및 1:2모델에서 작게 나타났다. 래티스형 해석 모델은 역사지진하중에 대해 질량비 재분배를 실시하였을 때 변위응답이 눈에 띄게 감소하였다. 분배를 실시하지 않은 1:1모델과 비교하여 공진조화하중은 약 1%로 큰 차이를 보이지 않으나 역사지진하중에 대해서 약 18~20%의 유의미한 변위응답 차이를 보였다. 종합적으로 래티스형 해석 모델은 재분배를 실시하였을 때 공진조화하중에 대한 변위응답의 편차는 매우 근소하지만 역사지진하중에 대한 변위응답은 Inner인 1/4지점보다 Outer인 1/8지점에 질량을 더 많이 분배하였을 때 작게 나타났다.

〈Fig. 15〉는 타원형 해석 모델에서 질량비를 재분배하였을 때 3가지 지진하중에 의해 나타난 1/4지점 최대 수직 변위응답과 TMD를 설치하지 않은 모델에 대한 각 Case의 변위응답을 비율로 나타낸 것이다. 타원형 해석 모델은 중심 트러스에 설치한 경우를 Inner, 그 외의 트러스에 설치한 경우를 Outer로 설정하였다. 공진조화하중에 대한 변위응답은 기존의 1%로 설정한 1:1모델에



〈Fig. 15〉 Maximum vertical displacement ratio at 1/4 point by redistribution (Elliptical type)

서 가장 작게 나타났으며, 질량비 재분배를 실시할 경우 오히려 변위응답이 증가하는 양상이 나타났다. 역사지진하중의 경우 El Centro 지진하중과 Kobe 지진하중에 대한 변위응답은 거의 일치하는 양상이 나타났으며, Outer에 질량을 더 많이 분배한 1:3모델 및 1:2모델이 Inner에 질량을 더 많이 분배한 3:1모델 및 2:1모델보다 변위응답이 작게 나타났다. Outer에 질량을 더 많이 분배하였을 때 1:1모델과도 비교하여 변위응답이 작게 나타났으며, Inner에 질량을 더 많이 분배하였을 때는 1:1모델과 비교하여 변위응답이 오히려 조금 크게 나타났다. 타원형 해석 모델은 질량비 재분배를 실시하였을 때 변위응답의 편차가 약 1~10%로 나타났으며, 역사지진하중보다 공진조화하중에 대하여 편차가 크게 나타났다. 또한 전반적으로 중심 트러스가 아닌 그 외의 트러스에 설치한 경우인 Outer에 질량을 더 많이 분배하였을 때 변위응답이 작게 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 실제 돔 형상 대공간 구조물을 단순 일반화한 해석 모델의 TMD 설치 개수와 및 위치에 따른 변위응답을 분석한 선행 연구의 결과를 바탕으로 리브형, 래티스형, 타원형 돔 형상 해석 모델의 TMD 개당 질량 변화에 따른 변위응답을 분석하였다.

리브형 해석 모델은 TMD 개수를 증가시켜 개당 질량을 변화시켰을 때 개당 질량비 1%를 8개 설치한 경우의 변위응답이 가장 작게 나타났다. 개수가 증가할수록 변위응답은 증가하였으나 그 차이는 크지 않았다. 또한 질량비 재분배를 실시하였을 때 1/4지점에 질량을 더

많이 분배한 경우의 변위응답이 상대적으로 작게 나타났으며, 기존의 1:1 해석 모델과 비교하였을 때 변위응답은 다소 작게 나타났다.

래티스형 해석 모델의 TMD 개수를 증가시켜 분석한 결과, 리브형 해석 모델과 전반적으로 유사한 양상이 나타났다. 그러나 질량비 재분배 시 1/8지점의 질량을 크게 설정한 해석 모델보다 더 효과적임을 알 수 있다.

타원형 해석 모델은 리브형, 래티스형 해석 모델보다 개수를 증가시켜 개당 질량을 변화시켰을 때 변위응답의 편차가 상대적으로 크게 나타났다. 이는 설치 위치에 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 설치 개수가 증가하고 개당 질량이 감소되어도 타원형 해석 모델의 중심에 TMD가 설치될 경우 변위응답이 상대적으로 크게 나타났다. 질량비 재분배를 실시하였을 때 마찬가지로 트러스 중앙부가 아닌 가장자리 위치의 트러스에 질량을 더 많이 분배한 경우 변위응답이 작게 나타났다. 기존의 1:1 해석 모델과 비교하여도 변위응답은 작게 나타났다.

향후 국내의 건설된 대공간 구조물의 사례를 통해 실제 대공간 구조물을 해석 모델로 모델링한 후 TMD 설치 개수, 위치 그리고 질량 변화에 따른 변위응답을 분석하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비 지원(21AUDP-B100343-07)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Jin, S., Shon, S., & Lee, S., "Spatial Structures Constantly Evolving", Architectural Institute of Korea, Vol.60, No.5, pp.27~31, 2016
2. Kang, J. W., Kim, G. C., Kim, H. S., & Seok, K. Y., "The Present and Future of Retractable Roof Structures", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.14, No.3, pp.24~31, 2014, Retrieved from <http://journal.kasss.or.kr/AboutUs/04.php>
3. Kim, H. S., & Kang, J. W., "Seismic Response Control of Spatial Arch Structures using Multiple Smart TMD", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.16, No.1, pp.43~51, 2016, doi: 10.9712/KASS.2016.16.1.043
4. Yoshinaka, S., & Kawaguchi, K. (2008). Vibration Control of large-span architectures using spatially distributed MTMDs. Proceedings of the 7th European Conference on Structural Dynamics, UK, pp.1~11
5. Yoshinaka, S., & Kawaguchi, K., "Vibration Control of Spatial Structures using Spatially Distributed MTMDs", Memoirs of the Faculty of Engineering Osaka City University, Vol.49, pp.19~28, 2008, Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/35261904.pdf>
6. Bae, S. H., Lee, Y. R., Kim, H. S., & Kang, J. W., "A Study on the Optimal Design of TMD According to the Shape of Large Spatial Structures Part 1", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.20, No.4, pp.73~81, 2020, doi: 10.9712/KASS.2020.20.4.73
7. Kim, G. C., & Kang, J. W., "Application of TMD for Seismic Response Control of Dome Structure", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.12, No.1, pp.99~108, 2012, doi: 10.9712/KASS.2012.12.1.099
8. 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
9. Cho, Y. W., Lee, S. J., & Han, S. E., "Optimum Design of the Spatial Structures using the TABU Algorithm", Journal of the

- Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol.22, No.1, pp.53~60, 2006
10. Kang, J. W., & Jeong, C. W., "Seismic Behavior According to Type of Large Spatial Structures", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.8, No.1, pp.5~12, 2008, Retrieved from file:///C:/Users/user/Downloads/Seismic_Behavior_According_to_Type_of_Large_Spatial_Structures%20(1).pdf
 11. Kang, J. W., Kim, G. C., & Kim, H. S., "Seismic Response Control of Arch Structures using Semi-active TMD", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.10, No.1, pp.103~110, 2010, Retrieved from file:///C:/Users/user/Downloads/Seismic_Response_Control_of_Arch_Structures_using_Semi-active_TMD%20(1).pdf
 12. Kim, H. S., & Kang, J. W., "Design Method Development of Smart TMD for Retractable-Roof Spatial Structure", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.17, No.3, pp.107~115, 2017, doi: 10.9712/KASS.2017.17.3.107
 13. 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
 14. Ishii, K., "Structural Design of Retractable Roof Structures", WIT Press, 2000.
 15. Maruzen, H., "Special Structures Seismic Design and Realization in Japan", Japanese Institute of Architecture, 2001.

- Received : February 26, 2021
- Revised : March 09, 2021
- Accepted : March 09, 2021