

TMD 설치에 따른 돔 형상 대공간 구조물의 지진응답분석

Seismic Response Analysis of Dome-Shaped Large Spatial Structures According to TMD Installation

구 승 연*
Ku, Seung-Yeon

유 상 호*
Yoo, Sang-Ho

김 현 수**
Kim, Hyun-Su

강 주 원***
Kang, Joo-Won

Abstract

In this study, the seismic response characteristics of the three analysis model with or without TMD were investigated to find out the effective dome shape. The three analysis models are rib type, lattice type and geodesic type dome structure composed of space frame. The maximum vertical and horizontal displacements were evaluated at 1/4 point of the span by applying the resonance harmonic load and historical earthquake loads (El Centro, Kobe, Northridge earthquakes). The study of the effective TMD installation position for the dome structure shows that seismic response control was effective when eight TMDs were installed in all types of analysis model. The investigation of the efficiency of TMD according to dome shape presents that lattice dome and geodesic dome show excellent control performance, while rib dome shows different control performance depending on the historical seismic loads. Therefore, lattice and geodesic types are desirable for seismic response reduction using TMD compared to rib type.

Keywords : Large Spatial Structure, Dome Shape, Tuned Mass Damper, Displacement Ratio, Seismic Response

1. 서론

대공간 구조물은 면내력을 이용해 외부하중에 저항하는 형태저항적 구조물로 일반 라멘구조물과 달리 내부에 기둥을 배치하지 않고도 넓은 공간형성이 가능하며, 형상에 따라 보, 평판, 아치, 배럴볼트, 돔의 다섯 가지 구조형식으로 분류된다.¹⁾ 그 중 돔 형상 구조물은 최소한의 면적으로 최대한의 공간 확보가 가능하고, 구조체 자체만으로도 공간 형성이 가능하여 국내외에서 체육시설, 공연장, 식물원 등 다양한 목적의 건축물에 적용되어 건설되고 있다.

돔 구조물은 <Fig. 1>의 사례와 같이 천정마감으로 인해 내부골조에 적용된 구조방식의 판별이 불가능하므로 구조물 설계 시 부재연결에 따른 형

상의 제약을 받지 않고 특성에 맞는 형상의 선택이 가능하다. 구의 평면 분할개수와 부재의 연결 방식에 따라 리브돔, 슈베들러돔, 라멜라돔, 그리고 지오데식돔 등의 다양한 형상을 가지며, 이러한 분할 패턴은 건축물의 규모, 라이즈-스팬비와 같은 구조조건이 동일하다 할지라도 구조물의 거동에 주요한 변수로 작용한다.²⁾³⁾

아치트러스와 수평링으로 구성된 리브돔과 달리 가새골조를 가지는 슈베들러돔, 라멜라돔, 지오데식돔 등의 돔 형상 구조물은 리브돔에 비하여 비교적 높은 휨 저항능력을 가진다. 그러나 가새골조로 이루어진 돔 구조물은 지진하중 작용 시, 가새의 좌굴로 인해 저항내력 및 압축강성의 급격한 저하로 붕괴될 위험이 있다.⁴⁾ 또한 구조물 자체의 붕괴가 발

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



(a) Marchwood ERF, England



(b) Gold dome, Japan

<Fig. 1> Dome structure

생하지 않더라도 지진에 의해 발생하는 진동으로 천장에 설치된 여러 설비시설들의 낙하로 인한 2차 피해의 우려가 있다. 이러한 피해에 대비해 구조물의 동적응답을 추가적으로 제어하기 위한 면진장치 및 제진장치와 같은 부가적인 진동제어장치를 설치하는 방안이 주로 채택되며, 구조물의 진동제어장치로 동조질량감쇠기 (Tuned Mass Damper, TMD)를 적용한 다양한 연구가 진행되고 있다.

따라서 본 연구에서는 돔 구조물의 TMD 설치개수 및 위치에 따른 지진응답특성 분석을 통해 부재 연결방식에 따른 안정성 확보 및 경제성이 고려된 효과적인 형상을 파악하고자 하였다. 다양한 형상의 돔 형상 구조물 중 리브돔, 래티스돔, 그리고 지오데식돔 구조물을 해석모델로 선정하여 지진응답 특성을 분석하였으며, 이를 효과적으로 제어하기 위한 TMD의 설치방안 및 응답제어성능을 분석하였다.

2. 해석모델 일반사항

2.1 해석모델 개요

본 연구에서는 부재연결방식에 따른 돔 형상 구조물의 지진응답 특성을 분석하기 위해 상용 구조 해석 프로그램인 Midas Gen Ver.915 를 사용하여 실제 돔 구조물의 특징과 형상을 바탕으로 세 가지 해석모델을 모델링하였다. <Fig. 2>와 같이 해석 모델은 3차원 아치트러스 구조의 리브돔, 래티스돔, 지오데식돔으로 세 가지 해석모델 모두 경간 200m, 높이 40m로 라이즈-스팬비를 동일하게 설정하였다. 또한, 경제성 통일을 위하여 해석모델의 총 질량을 206ton을 기준으로 약 99% 유사하게 설계하였다.

리브돔 해석모델은 아치트러스와 수평링으로 구성된 가장 단순한 형상으로 모델링하였다. 경제성 통일을 위해 수평링을 4개로 설계하였으며, 리브와

링의 부재를 별도로 고려하여 설계하였다. 래티스돔 해석모델은 리브돔 구조물에 가새를 추가한 형상으로 모델링하였으며, 래티스돔의 슈베들러돔, 라멜라돔, 다이아메틱돔 중 다이아메틱돔 형상을 바탕으로 설계하였다. 지오데식돔은 육각형 평면의 정이십면체를 구의 형태에 가깝게 분할하여 구성된 형상으로 모델링하였으며, 리브와 링의 부재를 같은 규격으로 설정하였다. 각 해석모델의 제원을 나타낸 표는 <Table 1>과 같다.

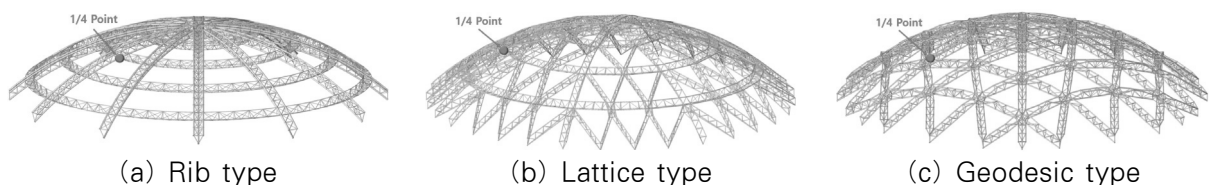
형상별 1차모드 고유진동수는 리브돔, 지오데식돔, 래티스돔 순으로 크게 나타났으며, 이는 경제성 통일을 위해 질량을 유사하게 설정하는 과정에서 추가된 수평링의 개수, 해석모델별 아치트러스의 지점개수와 가새골조의 존재유무에 따라 강성이 커져 고유진동수의 차이가 발생한 것으로 판단된다.

2.2 해석방법

돔 구조물의 부재연결방식에 따른 지진응답특성을 파악하기 위해 고유치해석을 실시하였으며, 시간 이력해석을 통해 지진하중에 따른 구조물의 변위응답을 비교 분석하였다. 각 해석모델의 변위응답 측

<Table 3> Specification of analysis model

Analysis model	Rib	Lattice	Geodesic	
Span	200m			
Height	40m			
Rise-span ratio	0.2			
Material	Steel / KS18(S)-SM275			
Total mass of structure	202.3ton	208.4ton	206.5ton	
1st mode period	1.0579sec	0.4513sec	0.4872sec	
1st mode frequency	0.9453Hz	2.2158Hz	2.0527Hz	
Section (Pipe)	Chord	Rib - $\phi 900 \times 13$ Ring - $\phi 300 \times 5$	$\phi 400 \times 10$	$\phi 500 \times 10$
	Vertical	Rib - $\phi 300 \times 10$ Ring - $\phi 300 \times 5$	$\phi 250 \times 10$	$\phi 300 \times 10$
	Brace	Rib - $\phi 200 \times 12$ Ring - $\phi 200 \times 5$	$\phi 100 \times 5$	$\phi 100 \times 5$



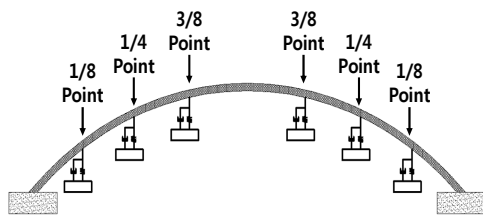
<Fig. 2> Analysis model

정위치는 <Fig. 2>와 같으며, 세 가지 해석모델 모두 저차모드의 모드벡터가 크게 나타난 아치트러스 경간 1/4지점에서 변위응답을 측정하였다.

해석에 사용된 지진하중은 해석모델의 1차 모드 고유진동수를 바탕으로 생성된 공진조화하중과 <Fig. 4>와 같이 역사지진하중인 El Centro 지진하중(1940), Kobe 지진하중(1995), Northridge 지진하중(1994)이며, 모두 X, Y축 양방향으로 가진하였다.

또한, TMD 설치에 따른 지진응답 제어성능 분석을 위해 설치개수 및 설치위치를 변수로 두어 돔 형상 해석모델별 TMD가 설치된 16 Case의 해석모델을 예제구조물로 선정하였다. TMD 설치위치는 <Fig. 3>과 같이 1차 고유진동모드의 최대응답 지점에 국한하지 않고 각 해석모델의 경간 1/8지점, 1/4지점, 3/8지점에 집중 혹은 분산하여 설치하였다. TMD 1개의 질량비를 전체구조물 질량의 1%로 설정하였으며, TMD 개수를 4개에서 10개까지 변화시키면서 설치하였다.

각 해석모델의 명칭은 TMD를 설치하지 않은 돔 구조물을 'Without'모델, TMD를 4개, 6개, 8개, 10개 설치한 해석모델을 'Case 4', 'Case 6', 'Case 8', 'Case 10'으로 명명하였다. 또한, TMD 설치개수가 N개인 해석모델을 설치위치에 따라 'Case N-1', 'Case N-2', 'Case N-3', 'Case N-4'와 같이 설정하였다.



<Fig. 3> TMD installation location

3. 지진 응답 분석

3.1 돔 구조물의 지진응답 분석

Without 모델에 네 가지 지진하중을 가력해 아치트러스 경간 1/4지점에서 측정한 변위를 <Table 2>에 나타냈다.

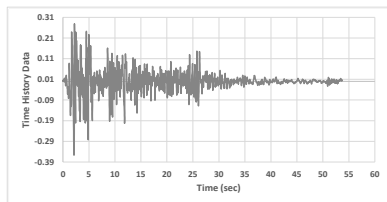
TMD를 설치하지 않았을 경우 형상에 따른 변위는 모든 형상에서 공진조화하중, Kobe 지진하중, El Centro 지진하중, Northridge 지진하중 순으로 변위응답이 크게 나타났다. 형상에 따라 래티스돔, 지오데식돔, 리브돔 순서로 지진하중에 대한 변위가 낮게 나타났으며, 래티스돔과 지오데식돔의 변위 차이는 미소하였다. 특히, 리브돔은 래티스돔, 지오데식돔에 비하여 매우 높은 변위가 나타났다. 가새가 없는 리브돔과 달리 가새를 가지는 래티스돔과 지오데식돔에서 횡하중에 대한 변위응답제어가 이루어진 것으로 판단된다.

또한 라이즈-스팬비에 따른 아치구조물의 지진응답특성에 대한 선행연구 결과와 같이, 돔 형상 구조물의 지진응답 분석 결과 횡방향(DX)에 대한 연직방향(DZ)의 변위비가 리브돔, 래티스돔, 지오데식돔 각각 약 1.2, 1.4, 1.2로 모든 형상에서 DX 변위에 비해 DZ 변위가 더 높게 나타나는 것을 확인

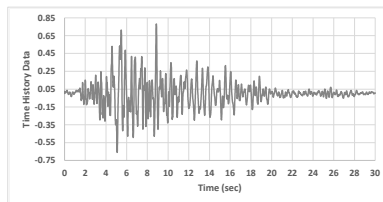
<Table 4> Maximum displacement at 1/4 point of the without model

Model		Rib	Lattice	Geodesic
Sinusoidal	DX	3.444	0.531	0.651
	DZ	4.082	0.725	0.777
El Centro	DX	0.113	0.036	0.036
	DZ	0.138	0.044	0.042
Kobe	DX	0.226	0.082	0.100
	DZ	0.285	0.121	0.122
Northridge	DX	0.091	0.021	0.026
	DZ	0.107	0.032	0.030

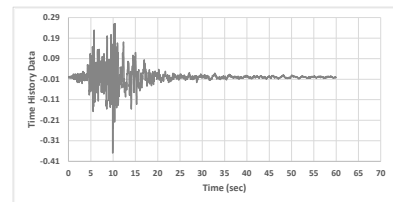
(unit : m)



(a) El Centro, 1940, 270 Deg



(b) Kobe, 1995, EW



(c) Northridge, 1994, 0 Deg

<Fig. 4> Historical seismic loads

할 수 있다. <Table 2 참고>

라이즈-스팬비가 낮은 돔 구조물은 수평방향 동적응답 발생 시 수평방향뿐만 아니라 연직방향의 동적응답 또한 나타나게 되며, 경간이 길어짐에 따라 연직방향의 응답이 지배적이므로 연직방향의 비중이 높게 나타난 것으로 판단된다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 변위가 가장 큰 연직방향의 응답제어를 주된 목적으로 TMD를 상하 방향으로 설치하였다.

3.2 TMD 설치 개수 및 위치에 따른 지진응답 분석

3.2.1 리브돔 지진응답 분석

<Fig. 5>는 리브돔 해석모델의 TMD 설치개수와 위치별 해석모델을 나타낸 것이며, <Fig. 6>은 TMD를 설치하지 않은 Without모델을 기준으로 TMD 해석모델 Case별 연직방향(DZ)에 대한 변위 응답비를 나타낸 그래프이다.

TMD를 4개 설치한 경우 공진조화하중과 Kobe 지진하중에 대한 응답저감률이 Case 4-1에서 각각 약 78%, 21%, El Centro 지진하중과 Northridge 지진하중은 Case 4-2에서 각각 약 42%, 35%로 지진응답 제어성능이 가장 높게 나타났다. TMD를 모두 가장자리에 설치한 Case 4-3는 응답저감률이 공진조화하중에서 약 56%, El Centro 지진하중에서 약 15%, Kobe 지진하중에서 약 6%, Northridge 지진하중에서 약 9%로 모든 지진하중에서 가장 낮은 응답저감률이 나타났다.

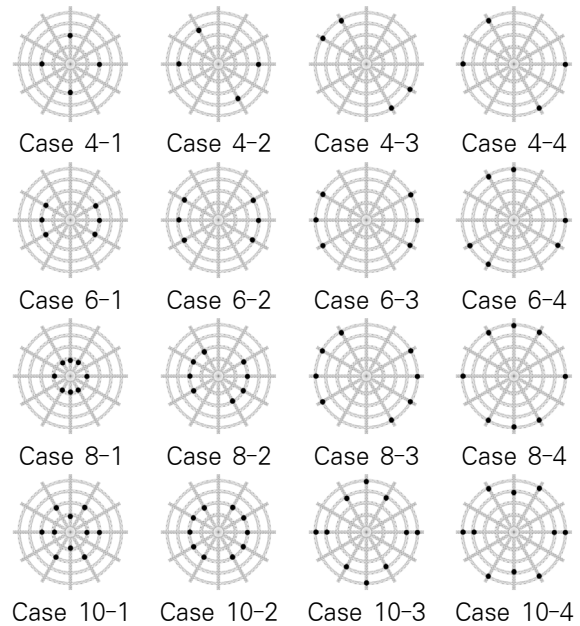
TMD를 6개 설치한 경우 공진조화하중과 Kobe 지진하중에 대한 응답저감률이 Case 6-1에서 각각 약 83%, 31%, El Centro 지진하중은 Case 6-3에서 약 29%, Northridge 지진하중은 Case 6-2에서 약 37%로 지진응답 제어성능이 가장 높게 나타났다. Case 6-4의 경우, El Centro 지진하중을 제외한 공진조화하중, Kobe 지진하중, Northridge 지진하중에 대한 응답저감률이 각각 약 65%, 15%, 19%로 지진응답 제어성능이 비교적 낮게 나타났다.

TMD를 8개 설치한 경우 공진조화하중과 El Centro 지진하중에 대한 응답저감률이 Case 8-2

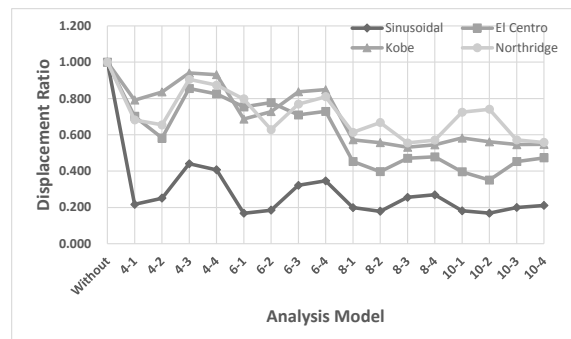
에서 각각 약 82%, 60%, Kobe 지진하중과 Northridge 지진하중은 Case 8-3에서 각각 약 47%, 44%로 지진응답 제어성능이 가장 높게 나타났다.

TMD를 10개 설치한 경우 공진조화하중과 El Centro 지진하중에 대한 응답저감률이 Case 10-2에서 각각 약 83%, 65%, Kobe 지진하중은 Case 10-3에서 약 45%, Northridge 지진하중은 Case 10-4에서 약 44%로 지진응답 제어성능이 가장 높게 나타났다.

리브돔 구조물의 TMD 설치방안에 따른 응답제어성능을 분석한 결과 공진조화하중, El Centro 지진하중, Kobe 지진하중, Northridge 지진하중 순으



<Fig. 5> TMD number and position of rib type



<Fig. 6> Maximum vertical displacement ratio of rib type (1/4 point)

로 응답제어가 크게 나타났으며, TMD를 8개 이상설치 시 역사지진하중에 대한 응답제어가 효과적으로 나타났다. TMD를 경간 1/4지점에 동일한 간격으로 분산하여 설치할 경우 응답제어성능이 뛰어났다. 다만, 리브돔의 경우 돔 형상 구조물의 모델링 시 경제성을 통일하기 위한 물량 조정 과정에서 래티스돔, 지오데식돔과 달리 수평링이 4개로 구성되어 경간의 기준이 다른 돔과 다르다는 점에 대한 감안이 필요하다.

3.2.2 래티스돔 지진응답 분석

〈Fig. 7〉은 래티스돔 해석모델의 TMD 설치 개수와 위치별 해석모델을 나타낸 것이며, 〈Fig. 8〉은 TMD를 설치하지 않은 Without모델을 기준으로 TMD 해석모델 Case별 연직방향(DZ)에 대한 변위 응답비를 나타낸 그래프이다.

TMD를 4개 설치한 경우 공진조화하중에 대한 응답저감률이 Case 4-2에서 약 80%, El Centro 지진하중은 Case 4-3에서 약 30%, Kobe 지진하중은 Case 4-1에서 약 41%, Northridge 지진하중은 Case 4-4에서 약 36%로 지진응답 제어성능이 가장 높게 나타났다.

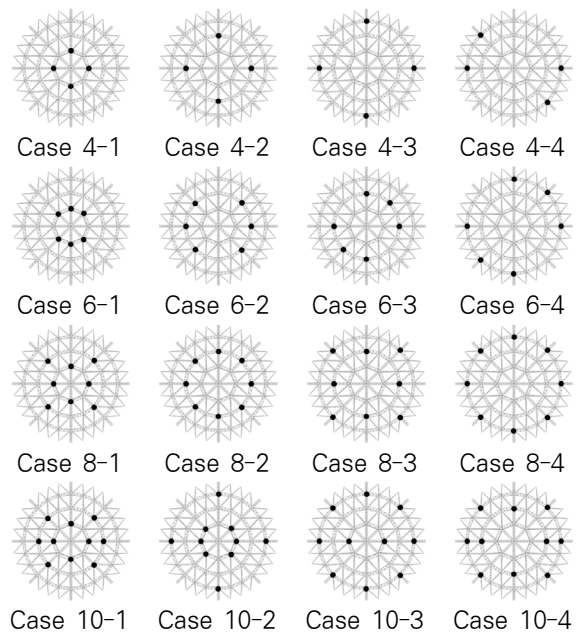
TMD를 6개 설치한 경우 공진조화하중에 대하여 Case6-2에서 약 84%, El Centro 지진하중과 Northridge 지진하중은 Case6-4에서 각각 약 34%, 47%, Kobe 지진하중은 Case6-1에서 43%로 지진응답 제어성능이 가장 높게 나타났다.

TMD를 8개 설치한 경우 모든 지진하중의 지진 응답 제어성능이 Case 8-4에서 높게 나타났으며, 응답저감률이 공진조화하중은 약 86%, El Centro 지진하중은 약 49%, Kobe 지진하중은 약 58%, Northridge 지진하중은 약 58%로 나타났다. Case 8-3은 응답저감률이 공진조화하중에서 약 80%, El Centro 지진하중에서 약 6%, Kobe 지진하중에서 약 21%, Northridge 지진하중에서 약 20%로 지진응답 제어성능이 가장 낮게 나타났다.

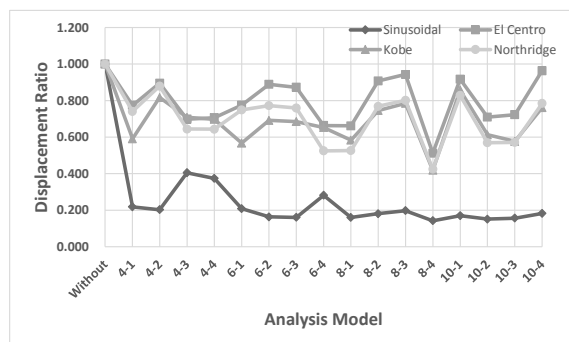
TMD를 10개 설치한 경우 공진조화하중, El Centro 지진하중, Northridge 지진하중에 대한 응답저감률이 Case 10-2에서 각각 약 85%, 29%, 43%, Kobe 지진하중은 Case 10-3에서 약 42%로 지진응답 제어성능이 가장 높게 나타났다. Case

10-4에서는 공진조화하중과 El Centro 지진하중의 응답저감률이 각각 약 82%, 4%, Case 10-1에서는 Kobe 지진하중과 Northridge 지진하중의 응답저감률이 각각 약 14%, 17%로 가장 낮게 나타났다.

래티스돔 구조물의 TMD 설치방안에 따른 응답제어성능을 분석한 결과 공진조화하중, Kobe 지진하중, Northridge 지진하중, El Centro 지진하중 순으로 응답제어가 크게 나타났으며, TMD를 8개 이상 설치 시 역사지진하중에 대한 응답 제어가 효과적으로 나타났다. TMD를 경간 1/8지점에 분산하여 설치할 경우 응답제어성능이 뛰어났다.



〈Fig. 7〉 TMD number and position of lattice type



〈Fig. 8〉 Maximum vertical displacement ratio of lattice type (1/4 point)

3.2.3 지오데식돔 지진응답 분석

〈Fig. 9〉는 지오데식돔 해석모델의 TMD 설치 개수와 위치별 해석모델을 나타낸 것이며, 〈Fig. 10〉은 TMD를 설치하지 않은 Without모델을 기준으로 TMD 해석모델 Case별 연직방향(DZ)에 대한 변위응답비를 나타낸 그래프이다.

TMD를 4개 설치한 경우 공진조화하중, El Centro 지진하중, Kobe 지진하중에 대한 응답저감률이 Case 4-3에서 각각 약 78%, 29%, 36%, Northridge 지진하중은 Case 4-1에서 약 27%로 지진응답 제어성능이 가장 높게 나타났다.

TMD를 6개 설치한 경우 공진조화하중과 Northridge 지진하중은 Case 6-2에서 각각 약 82%, 40%, El Centro 지진하중과 Kobe 지진하중은 Case 6-3에서 각각 약 31%, 29%로 지진응답 제어성능이 가장 높게 나타났다.

TMD를 8개 설치한 경우 공진조화하중에 대한 응답저감률이 Case 8-3에서 90%, El Centro 지진하중, Kobe 지진하중, Northridge 지진하중은 Case 8-4에서 각각 약 53%, 66%, 73%로 지진응답 제어성능이 가장 높게 나타났다. Case 8-1에서는 El Centro 지진하중과 Kobe 지진하중의 응답저감률이 각각 약 0%, 11%, Case 8-2에서는 공진조화하중과 Northridge 지진하중의 응답저감률이 각각 약 78%, 13%로 지진응답 제어성능이 가장 낮게 나타났다.

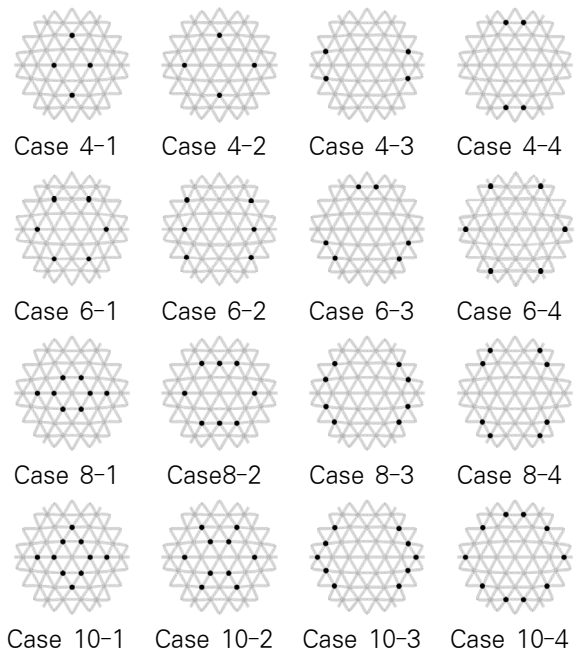
TMD를 10개 설치한 경우 공진조화하중과 El Centro 지진하중에 대한 응답저감률이 Case 10-3에서 각각 약 90%, 45%, Kobe 지진하중과 Northridge 지진하중은 Case 10-4에서 각각 약 59%, 68%로 지진응답 제어성능이 가장 높게 나타났다. Case 10-1는 모든 지진하중에서 매우 낮은 지진응답 제어성능이 나타났으며, 응답저감률이 공진조화하중에서 약 78%, El Centro 지진하중에서 약 2%, Kobe 지진하중에서 약 11%, Northridge 지진하중에서 약 16%로 나타났다.

지오데식돔 구조물의 TMD 설치방안에 따른 응답제어성능을 분석한 결과 공진조화하중, Northridge 지진하중, Kobe 지진하중, El Centro 지진하중 순으로 응답제어가 크게 나타났으며, TMD를 8개

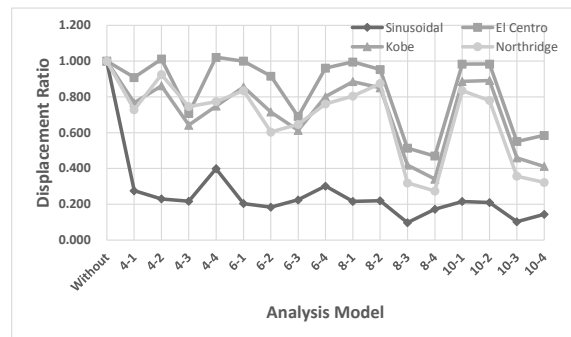
이상 설치 시 역사지진하중에 대한 응답제어가 효과적으로 나타났다. 경간 1/8지점에 TMD를 균등하게 분산시켜 설치할 경우 응답제어성능이 뛰어났다.

4. TMD 효율성 분석

본 절에서는 돔 형상별 TMD의 설치개수 및 위치에 따른 해석모델 중 각 지진하중에서 가장 뛰어난 응답저감률을 가진 Case를 선정하여 비교 분석하고자 한다. Case 선정 기준은 방향에 따라 제어성능이 상이하므로 아래의 식과 같이 방향별 저감률과 앞서 분석한 결과인 형상별 변위비를 고려하여 합산된 값을 적용하였다.



〈Fig. 9〉 TMD number and position of geodesic type



〈Fig. 10〉 Maximum vertical displacement ratio of geodesic type (1/4 point)

$$R_F = D_X \cdot R_X + D_Z \cdot R_Z \quad (1)$$

여기서, R_F 는 최종 저감률을 나타낸 것이며, D_X , R_X 는 각각 수평방향(DX)의 변위비와 응답저감률을 의미하며, D_Z , R_Z 는 각각 연직방향(DZ)의 변위비와 응답저감률을 의미한다.

다음 <Table 3>, <Table 4>, <Table 5>는 각각 리브돔, 래티스돔, 지오데식돔 구조물의 특정 지진하중에서 가장 뛰어난 성능이 나타난 Case를 나타낸 것이다.

리브돔 해석모델의 경우 Case 10-2이 공진조화하중과 El Centro 지진하중에 각각 약 83%, 65%로 가장 뛰어난 제어성능이 나타났다. Case 8-3의 제어성능은 Kobe 지진하중과 Northridge 지진하중에서 뛰어났으며, 각각 약 44%, 43%로 나타났다.

래티스돔 해석모델의 경우 Case 8-4 이 모든 지진하중에서 가장 뛰어났으며, 공진조화하중에서 약 85%, El Centro 지진하중에서 약 46%, Kobe 지진하중에서 약 52%, 그리고 Northridge 지진하중에서 약 51%의 제어성능이 나타났다.

마지막으로 지오데식돔 해석모델의 경우 Case 8-3이 공진조화하중에서 약 89%로 가장 뛰어난 지진응답 제어성능이 나타났다. Case 8-4는 세 가지 역사지진하중에 대해 가장 뛰어난 응답 제어성능이 나타났으며, El Centro 지진하중에서 약 51%, Kobe 지진하중에서 약

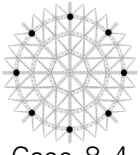
63%, 그리고 Northridge 지진하중에서 약 72%의 제어성능이 나타났다.

5. 결론

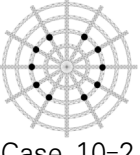
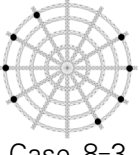
본 연구에서는 돔 구조물의 부재연결방식에 따른 동적특성 및 효율적인 TMD 설치방안을 파악하기 위해 선형동적해석을 통한 지진응답분석을 실시하였다. 이를 위해 리브돔, 래티스돔, 지오데식돔 구조물을 예제구조물로 선정하였으며, 돔 구조물의 TMD 설치개수 및 배치형식에 따른 변위응답 분석 결과는 다음과 같다.

1) 돔 구조물의 지진응답특성 분석 결과 래티스돔, 지오데식돔, 리브돔 순으로 낮은 변위응답이 나타났으며, 모든 해석모델에서 연직방향 변위응답이 수평방향 변위응답에 비해 높게 나타났다.

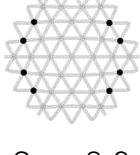
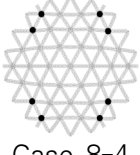
<Table 6> Effective Case for Seismic Loads of Lattice type

Model	Seismic loads	$D_X(R_X)$	$D_Z(R_Z)$	R_F	Result
 Case 8-4	Sinusoidal	0.092 (83%)	0.103 (86%)	84%	Best
	El Centro	0.020 (44%)	0.023 (49%)	46%	Best
	Kobe	0.047 (43%)	0.051 (58%)	52%	Best
	Northridge	0.012 (40%)	0.014 (58%)	51%	Best

<Table 5> Effective Case for Seismic Loads of Rib type

Model	Seismic loads	$D_X(R_X)$	$D_Z(R_Z)$	R_F	Result
 Case 10-2	Sinusoidal	0.570 (83%)	0.685 (83%)	83%	Best
	El Centro	0.039 (65%)	0.048 (65%)	65%	Best
	Kobe	0.133 (41%)	0.160 (44%)	43%	
	Northridge	0.065 (28%)	0.079 (26%)	27%	
 Case 8-3	Sinusoidal	0.920 (73%)	1.043 (74%)	74%	
	El Centro	0.057 (49%)	0.065 (53%)	51%	
	Kobe	0.134 (41%)	0.151 (47%)	44%	Best
	Northridge	0.052 (42%)	0.059 (44%)	43%	Best

<Table 7> Effective Case for Seismic Loads of Geodesic type

Model	Seismic loads	$D_X(R_X)$	$D_Z(R_Z)$	R_F	Result
 Case 8-3	Sinusoidal	0.078 (88%)	0.075 (90%)	89%	Best
	El Centro	0.022 (38%)	0.021 (49%)	44%	
	Kobe	0.055 (46%)	0.051 (58%)	52%	
	Northridge	0.010 (61%)	0.010 (68%)	65%	
 Case 8-4	Sinusoidal	0.115 (82%)	0.134 (83%)	83%	
	El Centro	0.019 (48%)	0.020 (53%)	51%	Best
	Kobe	0.040 (60%)	0.042 (66%)	63%	Best
	Northridge	0.007 (72%)	0.008 (73%)	72%	Best

2) 돔 구조물의 TMD 설치개수 분석결과, 세 가지 돔 구조물 모두 8개 설치하였을 때 가장 효과적인 지진응답 제어성능이 나타났다. TMD 설치위치 분석결과, 리브 돔은 지진하중의 종류에 따라 효과적인 위치가 상이하게 나타났으나, 래티스돔과 지오데식돔은 모든 지진하중에서 구조물의 경간 1/8지점에 TMD를 동일한 간격으로 분산하여 설치 시 응답제어가 가장 효과적이었다.

3) 돔 구조물의 형상에 따른 TMD 설치의 효율성 분석 결과, 리브돔의 경우 TMD 설치에 따른 역사지진하중에 효과적인 Case가 상이하게 나타났으나, 래티스돔과 지오데식돔은 역사지진하중의 종류와 관계없이 각각의 Case 8-4에서 뛰어난 제어성능이 나타났다. 특히 지오데식돔의 경우 래티스돔에 비해 지진하중별로 5~21% 높은 응답 저감률이 나타났다.

향후 연구에서는 돔 구조물의 고유모드를 고려하여 비선형 해석을 실시하여 부재별 좌굴 및 항복이 고려된 세부적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비 지원(21AUDP-B100343-07)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Kang B. J., "Structural Design Trend through Case Analysis of Large Spatial Structures" journal of the regional association of architectural institute of korea, Vol.23, No.4, pp.51~58, 2021
 2. Kim H. S., "Shape Generation and Optimization Method of Braced Rib Dome Structure" Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol.27, No.9, pp.69~76, 2011
 3. Han S. E. & Bae S. D., "A Study on the Characteristics of dynamic Behaviors for the Single-Layer Latticed Domes under Seismic Load" Journal of KSNVE, Vol.11, No.3, pp.389~394, 2001
 4. Kim J. H., Kim J. W. & Lee S. J., "Hysteresis Behavior of Recentering Diagonal Bracing Steel Frames" Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol.30, No.4, pp.185~192, 2018
DOI:<https://doi.org/10.1007/s13296-021-00552-4>
 5. 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 the Korean Association for Spatial Structures, Vol.20, No.4, pp.73~81, 2020
DOI:<https://doi.org/10.9712/KASS.2020.20.4.73>
 6. Kang J. W. & Jung C. W., "Seismic Behavior According to Type of Large Spatial Structures" Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol.8, No.1, pp.5~12, 2008
 7. Kang J. W. & Kim G. C., "Seismic Response Control of Arch Structure by Using Passive TMD" Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol.6, No.7, pp.37~44, 2010
 8. Kim G. C. & Kang J. W., "Application of TMD for Seismic Response Control of Dome Structure" Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol.12, No.1, pp.99~108, 2012
DOI:<https://doi.org/10.9712/KASS.2012.12.1.099>
 9. Kim S. G., Kim Y. S., Kim G. C. & Kang J. W., "The Seismic Response According to Rise-Span Ratio of the Arch Structure With Seismic Isolation" Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol.18, No.1, pp.55~65, 2018
DOI:<https://doi.org/10.9712/KASS.2018.18.1.55>
- Received : July 14, 2023
 - Revised : July 31, 2023
 - Accepted : August 1, 2023