

# 대공간 구조물의 형상에 따른 TMD 최적 설계에 관한 연구 Part 2

## A Study on the Optimal Design of TMD According to the Shape of Large Spatial Structures Part 2

배 석 홍\*  
Bae, Seok-Hong

이 영 략\*\*  
Lee, Young-Rak

김 현 수\*\*\*  
Kim, Hyun-Su

강 주 원\*\*\*\*  
Kang, Joo-Won

### Abstract

In this study, a tuned mass damper(TMD) was installed to control the displacement response to earthquakes by generalizing to six analysis models according to the shape of the upper structure based on the case of various large spatial structures around the world. The six analysis models are ribbed type, latticed type, elliptical type, gable type, barrel type, and stadium type composed of 3D arch trusses. In this paper, ribbed type, latticed type and elliptical type were analyzed. The mass of each TMD was set to 1% of the total structural mass. Result of analyzing the optimal number and position of the analysis model, the displacement response control was the most excellent in the model with 6 and 8 TMDs, and the displacement response decreased in most cases. The displacement response control was better with installing the TMD at the edge point than focusing the TMD at the center of the analysis model. However, when 10 or more TMDs are installed or concentrated in the center, large loads intensively act on the structure, resulting in increased displacement. Therefore, although it is slightly different depending on the shape, it is judged that the displacement response control is the best to install 6 and 8 TMDs at the close to the edge point.

**Keywords :** Large spatial structure, Ribbed dome, Latticed dome, Elliptical dome, Tuned mass damper, Displacement response

## 1. 서론

대공간 구조물은 강성이 크고 중저층에 가까운 형상을 하여 풍하중보다 지진하중의 영향을 많이 받는다. 이에 지진하중에 대한 응답을 효과적으로 제어할 필요가 있다<sup>1)</sup>. 그 동안 다양한 연구를 통해 대공간 구조물의 지진응답을 줄이기 위해 노력해왔으며, 지진응답을 저감시키기 위해 지진에너지를 흡수하여 소산시키는 역할을 하는 대표적인 제진 장치인 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper, TMD)를 적용해왔다<sup>2)</sup>.

대공간 구조물에 TMD를 설치할 때 설치 개수, 설치

위치, 그리고 개당 질량은 변위응답을 저감시키기 위해 고려해야 할 중요한 요소이다. 따라서 본 연구에서는 실제 대공간 구조물의 특징 및 형상에 따라 대표적인 6가지 해석모델을 설정하였다<sup>3-6)</sup>. TMD의 개당 질량을 전체 구조물 질량의 1%로 설정하고, 4개부터 16개까지 개수를 늘려가며 고려할 수 있는 위치에 다양하게 설치한 후 지진응답 저감효과가 뛰어난 최적 설치 개수와 위치를 찾고자 한다.

## 2. 해석모델의 개요

본 연구에서는 상부 구조물에 설치되는 TMD의 설치 개수 및 위치에 따른 변위응답 특성을 분석하기 위해 상용 구조해석 프로그램인 Midas Gen을 사용하여 실제 대공간 구조물의 특징 및 형상을 바탕으로 6가지 일반화 해석모델을 3차원 대공간 구조물로 모델링하였다. 본 논문에서는 Gable type, Barrel type, Stadium type 3가지의 해석모델에 대해 분석하였다.

Gable type 해석모델은 Lucas Oil Stadium, 비행기

\* 학생회원, 영남대학교 일반대학원 건축학과, 석사과정  
Dept. of Architecture, Yeungnam University

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

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

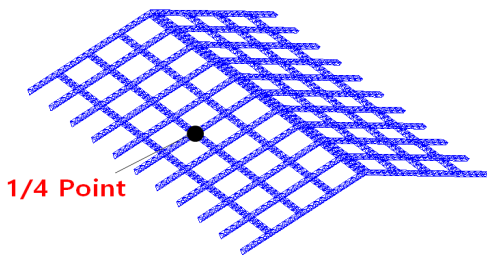
\*\*\*\* 교신저자, 정회원, 영남대학교 건축학부 교수, 공학박사  
School of Architecture, Yeungnam University  
Tel: 053-810-2429 Fax: 053-810-4625  
E-mail: kangj@ynu.ac.kr

격납고 등의 실제 구조물을 <Fig. 1>과 같이 단순 일반화한 모델이며, 제원은 <Table 1>과 같다. 그림과 같이 해석모델 중심부에 위치한 아치 트러스 1/4 지점에서의 수직 및 수평방향 변위응답을 분석하였다.

Barrel type 해석모델은 Ocean Dome, Bank One Ballpark 등의 실제 구조물을 <Fig. 2>와 같이 단순 일반화한 모델이며, 제원은 <Table 2>와 같다. 그림과 같이 해석모델 중심부에 위치한 아치 트러스 1/4 지점에서의 수직 및 수평방향 변위응답을 분석하였다.

Stadium type은 Amsterdam Arena, Veltins Arena 등의 실제 구조물을 <Fig. 3>과 같이 단순 일반화한 모델이며, 해석모델의 제원은 <Table 3>과 같다. Stadium type은 다른 해석 모델들과는 다르게 개방형 경기장의 모습으로 중심에 빈 공간이 있으며, 1/4 지점까지의 아치 트러스가 상부 구조물에 접합된 형태이다. <Fig. 3>과 같이 해석모델 중심부에 위치한 아치 트러스 1/4 지점에서의 수직 및 수평방향 변위응답을 분석하였다.

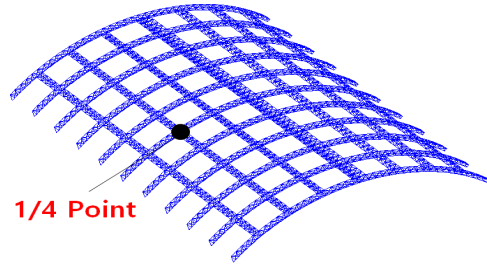
지진응답에 대한 제어 성능을 검토하고자 <Fig. 4>와 같이 구조물의 고유진동주기를 이용한 공진조화하중과 역사지진하중인 El Centro(1940) 및 Kobe(1995) 지진 하중을 모두 X, Y방향으로 가진하여 다양한 하중에 대해 분석하였다.



<Fig. 1> Gable type analytical model and analysis position of displacement response

<Table 1> Specification of gable type

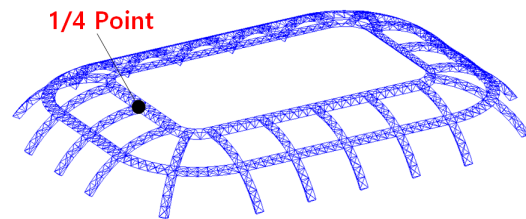
Height	30m	
Span	150m X 200m	
Total mass of structure	1.7ton	
Section (Pipe)	Brace	D=100mm, $t_w$ =5mm
	Vertical	D=300mm, $t_w$ =10mm
	Chord	D=500mm, $t_w$ =10mm
Material of structure	Steel / KS18-SNT275	
1st mode period	1.2790sec	
1st mode frequency	0.7819Hz	



<Fig. 2> Barrel type analytical model and analysis position of displacement response

<Table 2> Specification of barrel type

Height	30m	
Span	150m X 200m	
Total mass of structure	1.5ton	
Section (Pipe)	Brace	D=100mm, $t_w$ =5mm
	Vertical	D=300mm, $t_w$ =10mm
	Chord	D=500mm, $t_w$ =10mm
Material of structure	Steel / KS18-SNT275	
1st mode period	1.3503sec	
1st mode frequency	0.7406Hz	



<Fig. 3> Stadium type analytical model and analysis position of displacement response

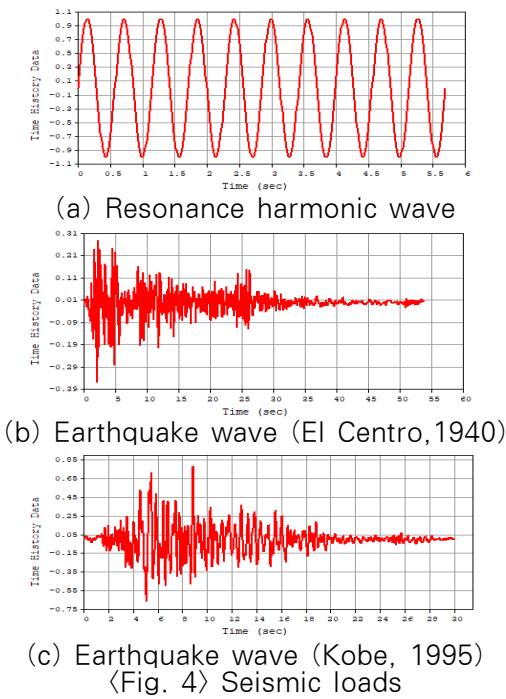
<Table 3> Specification of stadium type

Height	20m	
Span	200m X 150m	
Total mass of structure	1.0ton	
Section (Pipe)	Brace	D=100mm, $t_w$ =5mm
	Vertical	D=300mm, $t_w$ =10mm
	Chord	D=500mm, $t_w$ =10mm
Material of structure	Steel / KS18-SNT275	
1st mode period	1.6360sec	
1st mode frequency	0.6113Hz	

### 3. 변위 응답 분석

#### 3.1 TMD 설치 개수 변화에 따른 응답 분석

<Fig. 5>는 공진조화하중, El Centro 지진, Kobe 지



진 3가지의 지진하중을 가력한 Gable type 해석모델에 4개부터 16개까지 TMD 설치 개수를 변화시키면서 분석한 아치 트러스의 1/4 지점 수직 방향 변위응답비를 나타내는 그래프이다. 설치 개수에 따라 설치 가능한 위치 변수를 고려하여 Case로 나타냈다. 수평 방향도 수직 방향과 동일한 순서로 분석하였다.

4개와 6개의 TMD를 설치한 경우 8개 이상을 설치하였을 때보다 3가지 지진하중에 대한 변위응답 저감효과가 떨어지는 모습을 보인다. Case4-1, Case4-6, Case4-11과 같이 4개를 설치하였을 때는 구조물의 변위응답이 오히려 증가하는 경우가 발생하였다. 6개를 설치한 경우 변위응답이 증가하지 않았지만 8개 이상을 설치하였을 때보다 변위응답 저감효과가 전반적으로 좋지 않은 모습을 보인다. 8개 이상을 설치하였을 때부터는 역사지진하중에 대한 변위응답 저감효과가 4개와 6개를 설치하였을 때보다 명확하게 뛰어난 모습을 보인다.



(Fig. 5) Maximum vertical displacement ratio of earthquake wave (Gable type 1/4 point)

공진조화하중 역시 Case8-10, Case10-5를 제외하고 전체적으로 뛰어난 저감효과를 보인다. 가장 뛰어난 변위 응답 저감효과를 보이는 경우는 8개의 TMD를 설치한 Case8-11로 공진조화하중, El Centro 지진, Kobe 지진 하중에 대하여 약 94~99%의 감소율을 보이며 매우 뛰어난 변위 응답 저감효과를 보였다. 마지막으로 10개 이상을 설치한 경우 8개를 설치했을 때와 비교해 더 뛰어난 변위 응답 저감효과를 보여주는 Case는 없다. 수평 방향에 대한 분석 결과 역시 수직 방향에 대한 결과와 유사하게 나타났다.

따라서 Gable type 해석모델은 8개의 TMD를 설치하였을 때 가장 큰 변위 응답 저감효과를 나타냈다. 4개와 6개를 설치한 경우 8개를 설치하였을 때보다 변위 응답 저감효과가 떨어졌고, 10개 이상을 설치하였을 경우 저감효과에 큰 차이를 보이지는 않았으나 8개를 설치했을

때와 비교해 더 뛰어난 변위 응답 저감효과를 보여주는 경우는 나타나지 않았다.

〈Fig. 6〉은 Barrel type 해석모델의 3가지 지진하중에 대한 변위 응답비를 그래프로 나타냈다. Barrel type 해석모델은 Gable type 해석모델과 전체적으로 비슷한 양상을 나타낸다.

4개와 6개의 TMD를 설치하였을 때 8개 이상을 설치하였을 때보다 3가지 지진하중 모두에 대한 변위 응답 저감효과가 떨어지는 모습을 보인다. 4개를 설치하였을 때는 Kobe 지진하중에 대하여 Case4-6과 같이 변위 응답이 오히려 증가하는 경우가 발생하였다. 6개를 설치하였을 때 변위 응답이 증가하는 경우는 발생하지 않았으나 6개 설치하였을 때 공진조화하중에 대하여 변위 응답 저감효과가 가장 뛰어난 Case6-10이 8개 이상을 설치하였을 때의 저감효과가 가장 떨어지는 Case8-5보다 저



〈Fig. 6〉 Maximum vertical displacement ratio of earthquake wave (Barrel type 1/4 point)

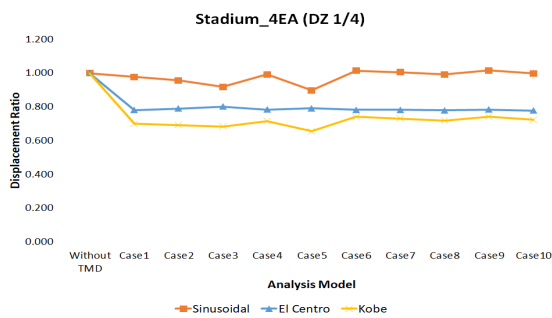
감쇠효과가 떨어지는 모습이 나타난다. 가장 뛰어난 변위 응답 저감효과를 보이는 8개의 TMD를 설치한 Case8-6은 공진조화하중, El Centro 지진, Kobe 지진하중에 대하여 약 83~87%의 감소율을 보이며 매우 뛰어난 변위 응답 저감효과를 보였다. 마지막으로 10개 이상을 설치한 경우 3가지 지진하중 모두에 대한 변위응답 저감효과는 전체적으로 비슷한 모습을 보이거나 8개를 설치했을 때와 비교해 더 뛰어난 변위응답 저감효과를 보여주는 Case는 없다.

따라서 Barrel type 해석모델은 8개의 TMD를 설치하였을 때 가장 큰 변위응답 저감효과를 나타냈다. 4개와 6개를 설치한 경우 3가지 지진하중 모두에 대해 8개를 설치하였을 때보다 변위응답 저감효과가 떨어졌다. 10개 이상을 설치한 경우 8개를 설치했을 때와 비교해 큰 차이를 보이지 않고 더 뛰어난 변위응답 저감효과를

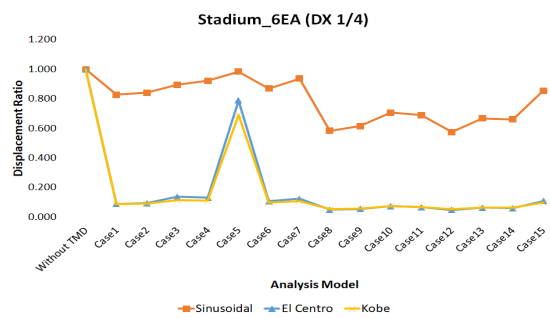
보여주는 경우도 나타나지 않았다. 8개를 설치한 경우의 변위응답 저감효과가 가장 뛰어나기 때문에 개수가 증가함에 따라 효과가 떨어지는 경우도 존재한다.

〈Fig. 7〉은 Stadium type 해석모델의 수직 방향 변위응답비를 나타내는 그래프이다. Stadium type 해석모델은 다른 해석모델들과 다르게 개방형 경기장의 모습으로 중심에 빈 공간이 있으며, 1/4 지점까지의 아치 트러스가 상부 구조물에 접합된 형태이다.

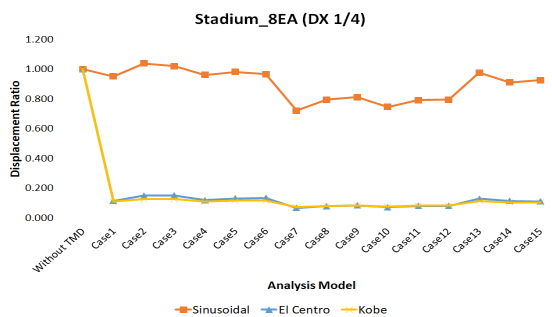
Stadium type 해석모델은 전체적으로 공진조화하중에 대한 변위응답 저감효과가 역사지진하중에 비해 현저히 떨어진다. 공진조화하중은 대부분의 Case가 변위응답이 증가하는 모습을 보이고, 해석모델에서 가장 큰 저감효과를 보여준 Case6-8도 42%의 감소율을 보이며 다른 해석모델에 비해 공진조화하중과 같은 큰 응답에 대해 저감효과가 떨어진다고 판단된다.



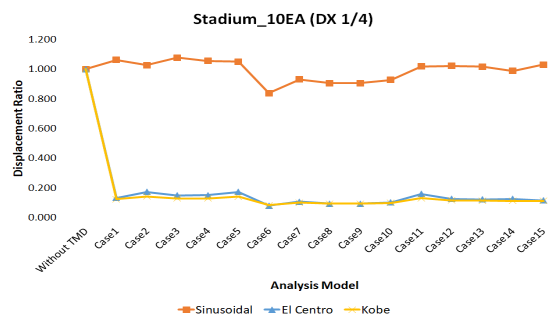
(a) 4EA



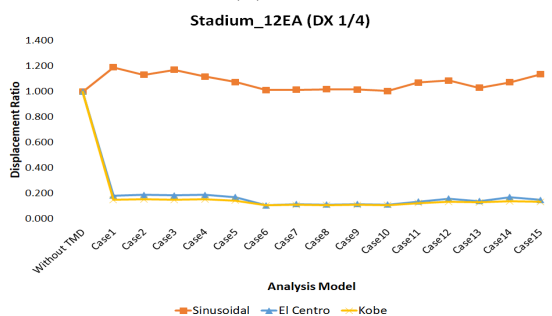
(b) 6EA



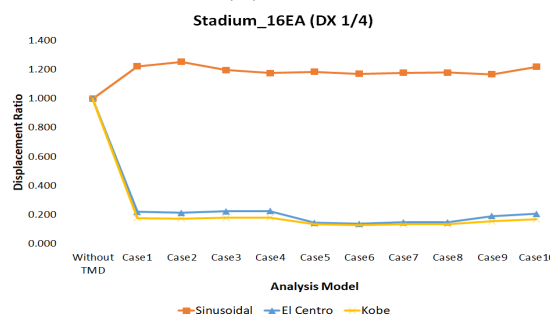
(c) 8EA



(d) 10EA



(e) 12EA



(f) 16EA

〈Fig. 7〉 Maximum vertical displacement ratio of earthquake wave (Stadium type 1/4 point)

4개의 TMD를 설치하였을 때 El Centro 지진에 대하여 약 20~22%, Kobe 지진에 대하여 약 26~34%의 감소율을 보인다. 6개 이상을 설치하였을 때는 Case6-5와 같이 한 곳에 집중적으로 설치되어 변위응답 저감효과가 떨어지는 것을 제외하고 El Centro 지진에 대하여 약 77~95%, Kobe 지진에 대하여 약 82~94%의 감소율을 보인다. 이처럼 4개의 TMD를 설치하였을 때 변위응답 저감효과가 6개 이상을 설치한 Case와 비교해 현저히 떨어지는 모습을 보인다. 가장 뛰어난 변위응답 저감효과를 보이는 6개를 설치한 Case6-12는 공진조화하중, El Centro, Kobe 지진하중에 대하여 약 42%, 94%, 95%의 감소율을 보이며 전반적으로 공진조화하중에 대한 변위응답 저감효과가 떨어지는 Stadium type 해석모델에서 가장 뛰어난 변위응답 저감효과를 보인다. 8개 이상을 설치하였을 때 3가지 지진하중 모두에 대해 6개를 설치하였을 때와 전체적으로 비슷한 모습을 보이거나 더 뛰어난 변위응답 저감효과를 보여주는 Case는 없다.

따라서 Stadium type 해석모델은 6개의 TMD를 설치하였을 때 가장 큰 변위응답 저감효과를 나타냈다. 또한 6개를 설치한 경우의 변위응답 저감효과가 전체적으로 뛰어났기 때문에 설치 개수의 증가는 오히려 응답 제어효과를 감소시키는 양상을 나타내었다. Stadium type은 다른 해석 모델들과는 다르게 중심에 빈 공간이 있어 설치 개수가 증가하거나 중심에 집중시켜 설치한다면 상부 구조물에 하중 부담이 늘어나 구조물의 진동 제어에 불리한 영향으로 작용하는 것으로 판단된다.

### 3.2 TMD 설치 위치 변화에 따른 응답 분석

해석모델에 TMD를 4개부터 16개까지 설치한 경우의 변위응답 분석 시 설치 가능 위치를 고려하여 Gable type과 Barrel type은 아치 트러스의 1/8, 1/4, 3/8 지점, Stadium type은 1/8, 1/4 지점에 개수에 따라 설치하였다. TMD 설치 개수에 따른 변위응답 분석을 바탕으로 Gable type과 Barrel type은 변위응답 저감효과가 가장 뛰어난 8개를 설치한 경우를 분석하였고, Stadium type은 변위응답 저감효과가 가장 뛰어난 6개 및 8개를 설치한 경우를 함께 분석하였다. 변위응답이 가장 큰 공진조화하중의 변위응답비를 기준으로 가장 뛰어난 변위응답 저감효과를 나타낸 설치 개수의 Case를 선정하여

설치 위치에 따른 응답을 비교 분석하였다.

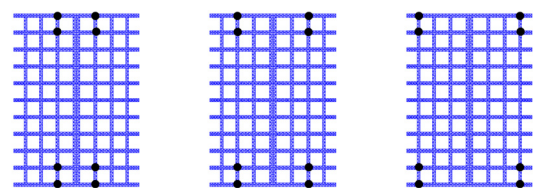
Gable type과 Barrel type은 8개의 TMD를 설치하였을 때 가장 뛰어난 응답저감을 보이고, 설치한 TMD의 위치 또한 모두 같다. 공진조화하중에 대한 변위응답을 기준으로 비교하였으며, 두 해석모델에서 가장 뛰어난 변위응답 저감효과를 보인 Case8-11과 Case8-6을 각각 기준으로 선정하였다. 첫 번째로 아치 트러스의 1/8, 1/4, 3/8 지점에 설치하였을 경우에 따른 변위응답과 두 번째로 중심과 가장자리 그리고 일정 간격에 따라 설치하는 것의 변위응답 저감효과를 비교 분석하였다.

첫 번째로 Gable type과 Barrel type에서 Case8-1, Case8-6, Case8-11을 비교하여 아치 트러스의 3/8, 1/4, 1/8 지점 중 변위응답 저감효과가 가장 뛰어난 위치를 찾고자 하였다. <Fig. 8>은 8개의 TMD를 설치한 두 해석모델에 아치 트러스 1/8, 1/4, 3/8 지점에 설치한 TMD의 위치를 나타낸 것이다.

Gable type 해석모델에서 3/8 지점에 TMD를 설치한 경우인 Case8-1은 약 93%, 1/4 지점에 설치한 Case8-6은 약 91%, 그리고 1/8 지점에 설치한 Case8-11은 약 94%의 감소율을 보이며 1/8 지점에 설치한 경우 변위응답 저감효과가 가장 뛰어났다.

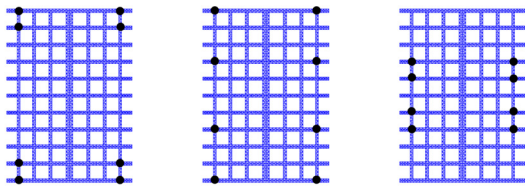
Barrel type 해석모델에서 공진조화하중에 대하여 3/8 지점에 TMD를 설치한 경우인 Case8-1은 약 80%, 1/4 지점에 설치한 Case8-6은 약 83%, 그리고 1/8 지점에 설치한 Case8-11은 약 79%의 감소율을 보이며 큰 차이를 보이지 않으나 1/4 지점에 설치한 경우 변위응답 저감효과가 가장 뛰어났다.

두 번째로 Gable type과 Barrel type에서 중심과 가장자리 그리고 일정 간격을 두고 균형을 맞추어 설치하는 것의 변위응답 저감효과를 비교 분석하였다. Gable type은 Case8-11, Barrel type은 Case8-6의 변위응답이 가장 뛰어난 Case를 기준으로 선정하였다.

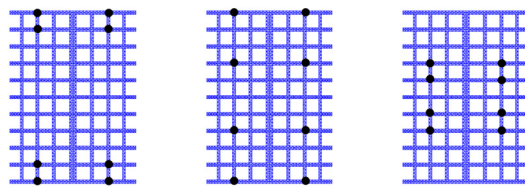


(a) Case8-1 (b) Case8-6 (c) Case8-11

<Fig. 8> TMD installation position of gable and barrel type



(a) Case8-11 (b) Case8-13 (c) Case8-15  
 <Fig. 9> TMD installation position of gable type



(a) Case8-6 (b) Case8-8 (c) Case8-10  
 <Fig. 10> TMD installation position of barrel type

<Fig. 9>는 Gable type 해석모델의 변위응답 저감효과가 가장 뛰어난 위치를 기준으로 중심에서 가장자리로 넓혀가면서 설치한 위치를 나타낸 것이다.

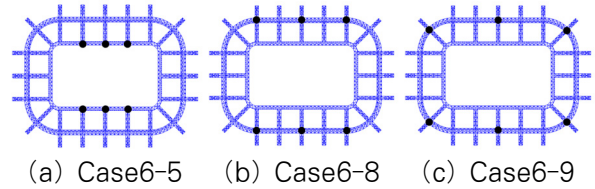
Gable type 해석모델의 가장자리에 집중적으로 설치한 경우인 Case8-11은 약 94%, 같은 간격을 두어 설치한 경우인 Case8-13은 약 56%, 그리고 중심에 집중적으로 설치한 경우인 Case8-15는 약 32%의 감소율을 보이며 위치에 따라 눈에 띄는 차이를 보인다.

<Fig. 10>은 Barrel type 해석모델의 변위응답 저감효과가 가장 뛰어난 위치를 기준으로 중심에서 가장자리로 넓혀가면서 설치한 위치를 나타낸 것이다.

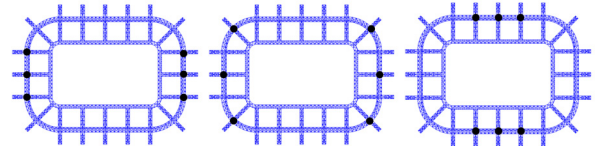
Barrel type 해석모델의 가장자리에 집중적으로 설치한 경우인 Case8-6은 약 83%, 같은 간격을 두어 설치한 경우인 Case8-8은 약 62%, 그리고 중심에 집중적으로 설치한 경우인 Case8-10은 약 50%의 감소율을 보이며 위치에 따라 눈에 띄는 차이를 보인다.

아치 트러스의 3/8, 1/4, 1/8 지점에 설치하는 경우 중 변위응답 저감효과가 가장 뛰어난 TMD 설치 위치 분석 결과, Gable type 해석모델은 1/8 지점, Barrel type 해석모델은 1/4 지점에 설치하였을 때 변위응답 저감효과가 가장 뛰어났다. 아치 트러스의 1/8, 1/4, 3/4 지점에 설치하는 것은 서로 3~4%의 근소한 감소율 차이를 보인다.

구조물의 중심에서 가장자리로 넓혀가면서 설치한 위



(a) Case6-5 (b) Case6-8 (c) Case6-9



(d) Case6-10 (e) Case6-11 (f) Case6-12  
 <Fig. 11> TMD installation position of stadium type

치 중 변위응답 저감효과가 가장 뛰어난 TMD 설치 위치 분석 결과, Gable type과 Barrel type 해석모델 모두 가장자리에 집중적으로 설치하는 것이 변위응답 저감효과가 가장 뛰어났다. 두 해석모델의 설치 위치에 따른 변위응답 저감효과에 크게 영향을 주는 것은 구조물 전체에서 중심과 가장자리 그리고 같은 간격으로 균형 있게 설치하는 부분이 더 중요하다고 판단된다.

<Fig. 11>은 6개의 TMD를 설치한 Stadium type 해석모델의 설치 위치를 나타낸 것이다. Stadium type은 TMD를 6개 설치한 경우 가장 뛰어난 변위응답 저감효과를 보였고, 6개를 설치하였을 때 공진조화하중에 대하여 가장 뛰어난 변위응답 저감효과를 보이는 Case6-12를 기준으로 선정하였다.

먼저 Case6-5와 Case6-12를 비교하여 아치 트러스의 1/8, 1/4 지점 즉 중앙과 가장자리 중 어느 위치에 설치하는 것이 응답저감 효과가 뛰어난지 분석하고, 그 다음 Case6-8, Case6-9, Case6-10, Case6-11, Case6-12를 비교하여 균형 있게 간격을 두어 설치하는 것, 한 곳에 집중하여 설치하는 것, 그리고 장변방향, 단변방향, 대각방향 중 어느 위치에 설치하는 것이 변위응답 저감효과가 뛰어난지 분석하고자 한다.

첫 번째로 1/4 지점에 TMD를 설치한 경우인 Case6-5는 공진조화하중에 대하여 약 1%, 1/8 지점에 설치한 Case6-12는 약 42%의 감소율을 보이며 1/8 지점에 설치할 때 변위응답 저감효과가 훨씬 뛰어났다.

두 번째로 해석모델의 단변방향에 균형 있게 간격을 두어 설치한 경우인 Case6-8은 약 42%, 대각방향에 균형 있게 같은 간격을 두어 설치한 경우인 Case6-9는 약 38%, Case6-11은 약 31%, 장변방향에 집중적으로 설

치한 경우인 Case6-10은 약 29%, 그리고 단변방향에 집중적으로 설치한 경우인 Case6-12는 약 42% 감소율을 보이며 위치에 따라 눈에 띄는 차이를 보인다.

따라서 Stadium type 해석모델은 1/8 지점, 즉 중심보다 가장자리에 가깝게 TMD를 설치하였을 때와 단변방향에 집중적으로 설치하는 것이 변위응답 저감효과가 가장 우수하게 나타났다. 아치 트러스의 1/8 지점에 설치하는 것과 1/4 지점에 설치하는 것의 감소율은 41%로 눈에 띄게 큰 차이를 보였으며, 단변방향과 장변방향에 설치하는 것은 약 13%의 감소율 차이를 보였다. 해석모델과 같이 중심에 빈 공간이 있는 경우 1/4 지점에 집중적으로 TMD를 설치한다면 TMD 자중에 의한 구조물의 부담도 무시할 수 없다고 판단된다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 실제 대공간 구조물의 특징 및 형상에 따라 일반화한 6가지의 해석모델 중 Gable type, Barrel type, Stadium type 3가지 해석모델에 4개부터 16개까지의 TMD를 설치하고 개당 질량을 전체 구조물 질량의 1%로 설정하여 설치 개수 및 위치 변화에 따른 지진응답 저감효과를 분석하였다.

Gable type과 Barrel type의 TMD 설치 개수에 따른 응답 분석 결과, 8개를 설치하였을 때 변위응답 저감효과가 가장 크게 나타났다. 4개와 6개를 설치하였을 때 변위응답 저감효과가 8개를 설치한 경우보다 상대적으로 떨어졌다. 10개 이상을 설치하였을 경우 8개를 설치한 하였을 때보다 변위응답 저감에 큰 차이를 보이지 않았으며, 효과가 더 뛰어난 Case도 나타나지 않았다. 오히려 개수가 증가함에 따라 효과가 조금씩 떨어지는 경우도 존재한다. 이를 바탕으로 8개를 설치하였을 때의 설치 위치 변화에 따른 응답 분석 결과, Gable type은 아치 트러스의 1/8 지점, Barrel type은 1/4 지점에 설치하고 중심보다 가장자리에 집중적으로 설치하였을 때 변위응답 저감효과가 가장 뛰어났다.

Stadium type의 TMD 설치 개수에 따른 응답 분석 결과, Gable type, Barrel type 해석모델과는 다르게 6개를 설치하였을 때 변위응답 저감효과가 가장 크게 나타났다. 4개를 설치하였을 때 변위응답 저감이 6개를 설치한 경우보다 상대적으로 크게 떨어졌고, 8개 이상을 설

치하였을 경우 6개를 설치하였을 때보다 변위응답 저감효과가 떨어진다. 10개 이상을 설치할 경우 공진조화하중을 가려하였을 때 변위응답이 오히려 증가하는 양상을 보인다. 이를 바탕으로 6개를 설치하였을 때의 설치 위치 변화에 따른 응답 분석 결과, 아치 트러스의 1/8 지점, 즉 중심보다 가장자리에 가깝게 TMD를 설치하였을 때와 단변방향에 집중적으로 설치하는 것이 변위응답 저감효과가 가장 우수하게 나타났다. 해석모델과 같이 중심에 빈 공간이 있는 경우 1/4 지점에 집중적으로 TMD를 설치한다면 자중에 의한 구조물의 부담도 무시할 수 없다고 판단된다.

향후 6가지 단순 일반화 해석모델에 변위응답 저감효과가 가장 큰 개수의 TMD를 최적 위치에 설치하여 각각의 TMD 질량을 동일한 비율로 변화시키면서 TMD의 질량에 따른 변위 응답 결과를 분석하는 연구를 추가적으로 진행할 예정이다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비 지원(20AUDP-B100343-06)에 의해 수행되었습니다.

#### References

1. Kawaguchi, K., Nakaso, Y., Ogi, Y., & Ohya, S. (2013). Non-structural components and life-safety in large rooms of spatial structures. *Proceedings of the IASS Annual Symposia, Poland*, pp.23~27
2. 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.pdf
3. Ishii, K., "Structural Design of Retractable Roof Structures", WIT Press, pp.1~187, 2000.
4. Nihon Kenchiku Gakkai, "Special Structures



Seismic Design and Realization in Japan”,  
Hatsubaijo Maruzen, 2001.

5. Miller, B. J. (2000). Structural Roof Systems for Athletic Stadia (Master's thesis). Massachusetts Institute of Technology, USA, Retrieved from file:///C:/Users/user/Downloads/49503052-MIT%20(1).pdf
6. Frazer, A. H. (2004). Design Considerations for Retractable-roof Stadia (Master's thesis). Massachusetts Institute of Technology, USA, Retrieved from file:///C:/Users/user/Downloads/61162274-MIT%20(2).pdf

- Received : August 19, 2020
- Revised : August 31, 2020
- Accepted : September 01, 2020