

다중지점 지진하중을 받는 돔 구조물의 지진응답 제어

Seismic Response Control of Dome Structure Subjected to Multi-Support Earthquake Excitation

김기철*
Kim, Gee-Cheol

강주원**
Kang, Joo-Won

Abstract

Spatial structures as like dome structure have the different dynamic characteristics from general rahmen structures. Therefore, it is necessary to accurately analyze dynamic characteristics and effectively control of seismic response of spatial structure subjected to multi-supported excitation. In this study, star dome structure that is subjected to multi-supported excitation was used as an example spatial structure. The response of the star dome structure under multiple support excitation are analyzed by means of the pseudo excitation method. Pseudo excitation method shows that the structural response is divided into two parts, ground displacement and structural dynamic response due to ground motion excitation. And the application of passive tuned mass damper(TMD) to seismic response control of star dome structures has been investigated. From this numerical analysis, it is shown that the seismic response of spatial structure under multiple support seismic excitation are different from those of spatial structure under unique excitation. And it is reasonable to install TMD to the dominant points of each mode. And it is found that the passive TMD could effectively reduce the seismic responses of dome structure subjected to multi-supported excitation.

Keywords : Star dome, Spatial structure, Multi-support excitation, Seismic response, Vibration control

1. 서론

돔과 같은 대공간 구조물은 넓은 공간을 이루는 구조물의 특성으로 인하여 평상시에는 본래의 목적에 따라서 체육시설, 집회시설 등으로 사용되지만 지진과 태풍과 같은 자연재해로 주거시설이 파괴된 경우에는 피난시설로 활용되고 있다. 따라서 대공간 구조물은 이러한 공공성을 만족시키기 위하여 안전성과 사용성이 요구되므로 정확한 지진 응답 분석과 효율적인 지진응답 제어가 필요하다.^[1]

대공간 구조물은 장경간의 특성으로 인하여 하나의 대공간 구조물에서 각각의 지점 부에 도달하는 지진파의 도달시각이나 지반 특성이 다를 수가 있다. 따라서 장경간 대공간 구조물의 정확한 지진응답 분석을 위해서는 각각의 지점 조건이 반영된 다중지점 지진하중을 적용한 대공간 구조물의 동적해석이 필요하다. 또한, 지진에 의한 대공간 구조물의 진동은 대공간 구조물의 안전성 및 사용성에 많은 영향을 미치게 되므로 진동 제어장치의 적용을 통한 대공간 구조물 진동 저감이 요구된다.

다중지점 하중과 관련된 기존의 연구는 단순히 장경간 구조물에 다중지점 지진하중을 적용하는 것이 대다수이다.^{[3],[4]} 본 연구에서는 다중지점 지진하중을 받는 돔 구조물의 지진동 제어를 위한 수동 동조질량감쇠기(TMD)의 적용성을 알아보고자 TMD의 설치에 따른 돔 구조물의 진동 제어성능을

* 정회원, 서일대학교 건축과 부교수
Seoil University, Dept. of Architecture Eng.
Associate Professor

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

분석하였다.

2. 대공간 구조물의 다중지점 지진하중 적용 및 진동제어 방법

2.1 다중지점 지진하중 적용에 의한 동적 평형 방정식

대공간 구조물과 같이 각각의 지점이 상당한 거리를 두고 있는 경우에 각각의 지점에 도달하는 지진파의 도달 시각이 다를 수 있으며 또한 지진파가 도달하는 기초의 지반조건이 다를 수 있다. 이러한 경우에는 각각의 지점에 가해지는 지진하중이 다르므로 대공간 구조물의 정확한 지진응답 분석을 위해서는 각각의 지점 조건을 반영한 다중지점 지진하중을 적용해야 할 것이다.^[5]

다중지점 지진하중을 받는 대공간 구조물에 대한 자유도를 지점부분과 구조물부분으로 구분하여 이에 대한 동적운동방정식을 식 (1)과 같이 나타낸다.^[1]

$$\begin{bmatrix} M_{ss} & M_{sm} \\ M_{ms} & M_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X}_s \\ \ddot{U}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sm} \\ C_{ms} & C_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_s \\ \dot{U}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sm} \\ K_{ms} & K_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_s \\ U_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ f_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 s 와 m 은 구조물부분과 지점부분의 자유도를 의미한다. U_m 는 지점부분에 대한 변위, X_s 는 지점 이외의 부분에 대한 변위를 의미한다. 그리고 M, C, K 는 질량, 감쇠, 강성행렬을 의미한다. f_m 은 지점 변위를 구조물에 가하기 위해 필요한 유사정적 지점하중을 의미한다.

질량행렬은 집중질량행렬이므로 식 (1)의 첫 번째 행은 다음 식 (2)와 같다.

$$M_{ss}\ddot{X}_s + C_{ss}\dot{X}_s + K_{ss}X_s = -C_{sm}\dot{U}_m - K_{sm}U_m \quad (2)$$

여기서 X_s 는 유사정적 변위(Y_s)와 동적변위(Y_D)로 구분하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X_s \\ U_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_s \\ U_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_D \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

다중지점 지진하중을 받는 구조물에 대한 운동방정식, 식 (1)에서 동적항을 무시할 경우에 유사정적 변위(Y_s)는 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_s = -K_{ss}^{-1}K_{sm}U_m \quad (4)$$

식 (4)를 식 (2)에 넣어 정리하면 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} M_{ss}\ddot{Y}_D + C_{ss}\dot{Y}_D + K_{ss}Y_D \\ = -M_{ss}\ddot{Y}_s - C_{sm}\dot{U}_m - C_{ss}\dot{Y}_s \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)의 오른쪽에서 감쇠항이 질량항에 비하여 매우 작으므로 이를 제거하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_{ss}\ddot{Y}_D + C_{ss}\dot{Y}_D + K_{ss}Y_D = -M_{ss}\ddot{Y}_s \quad (6)$$

2.2 대공간 구조물의 진동제어 방법

지진에 대하여 대공간 구조물의 성능을 확보하는 방법으로는 지진하중에 적절히 대항할 수 있도록 구조부재의 강성을 증대시키는 방법과 지진격리장치(면진장치) 및 감쇠장치(제진장치)를 이용하여 지진하중을 감소시키거나 소산시킴으로써 구조물의 내진성능을 높이는 방법이 있을 수 있다.

대공간 구조물 지진동 제어에 있어서 구조부재의 강성을 증가시키는 방법보다는 면진장치와 제진장치가 주로 사용된다. 제진장치는 지진하중에 의한 대공간 구조물의 움직임에 대하여 반대로 거동하도록 장치를 설치하여 구조물의 흔들림을 저감하고 건물의 손상을 방지하는 장치이다.

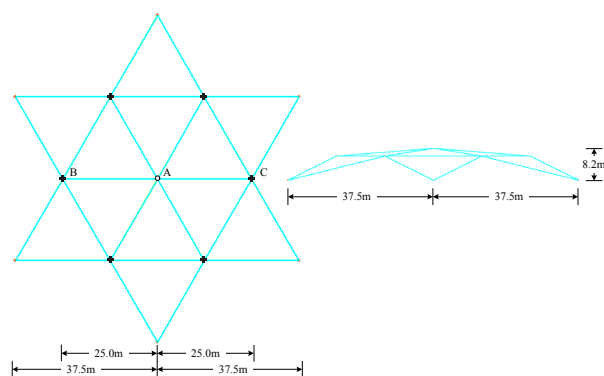
대공간 구조물의 진동제어에 적용되는 제진 장치는 수동형, 능동형 및 준능동형으로 구분할 수 있다. 수동형 제어방법은 동적하중에 의하여 공진이 발생하지 않도록 하거나

가해지는 동적하중의 방향과 반대 방향으로 제어력이 작용하도록 감쇠장치를 설치하는 방법이다. 능동형 제어방법은 동적하중에 의하여 야기되는 대공간 구조물의 진동을 감지하여 구조물의 진동에 대응하는 제어력을 액추에이터와 같은 장치를 사용하여 인위적으로 가하여 구조물의 진동을 저감시키는 방법이다. 준능동형 제어장치는 수동형과 준능동형의 중간적인 장치로 구조물에 인위적으로 제어력을 가하지는 않으나 구조물의 강성이나 감쇠 등을 동적하중의 특성에 부응하여 순간적으로 변화시켜 구조물을 제어하는 방법이다. 각각의 제어장치는 제어력, 반응속도, 경제적 비용 등 장·단점을 비교 분석하여 구조물에 적합한 장치를 적용한다. 본 논문에서는 다중지점 지진하중을 받는 돔 형태 대공간 구조물의 지진동 제어를 위하여 수동형 TMD를 적용하고자 한다.^[2]

3. 다중지점 지진하중을 받는 돔 구조물

3.1 예제 구조물의 동적특성

스타 돔은 돔 구조물의 기본적인 동적특성을 내재하고 있어 돔 구조물의 구조적 특성 분석에 있어서 많이 사용되는 수치해석 예제 구조물이다. 본 연구에서 <Fig. 1>과 같이 스타 돔을 예제 구조물로 선정하였다.^[2]

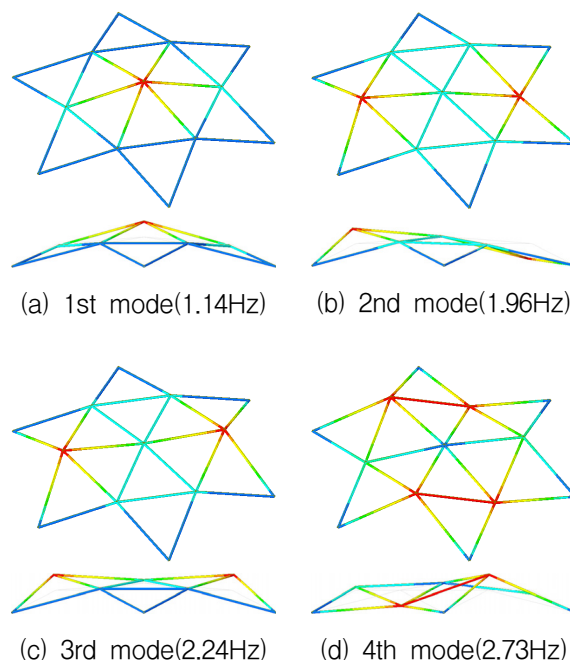


<Fig. 1> Example structure

예제 구조물의 경간은 75m, 높이는 8.2m이며 구조부재는 탄성계수가 $2.05 \times 10^5 \text{MPa}$, 단면이 $\varnothing 165.2 \times 6$ 의 강관으로 구성되어 있다. 예제 구조물의 정적하중에 의한 처짐은 경간

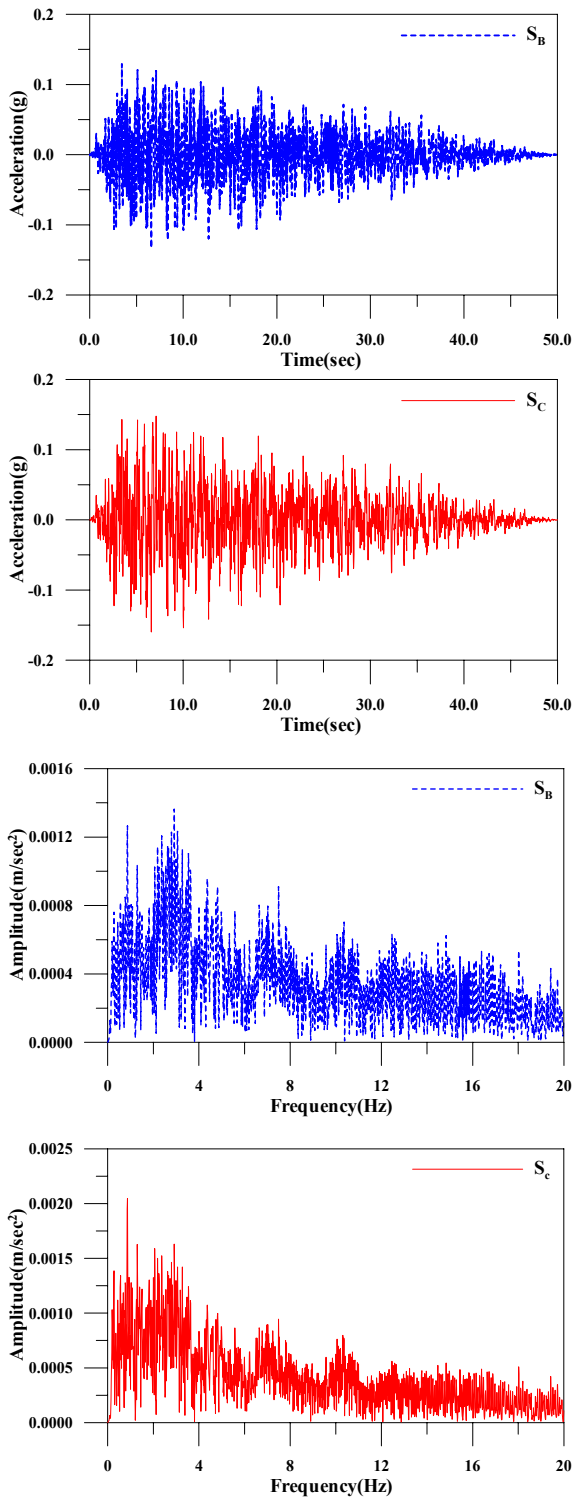
의 약 1/400 정도의 처짐을 보이고 있다.

돔 구조물의 고유진동모드 및 고유진동수와 같은 동적특성은 돔의 형상, 개각, 결보기 세장비 등에 의하여 좌우된다. 예제 구조물의 진동모드 양상은 <Fig. 2 (a), (c)>와 같이 대칭 모드 그리고 <Fig. 2 (b), (d)>와 같이 역대칭 모드로 나타나고 있다. 그리고 저차모드에서 고유진동수가 근접해 있는 것을 볼 수 있으며 또한 고유주기가 1.0초 이하로 지진하중의 가속도스펙트럼에서 탁월한 주기영역에 분포하기 때문에 지진하중에 의한 진동 응답이 매우 크게 나타날 것으로 예상된다.



<Fig. 2> Natural Vibration mode and frequency

대칭 모드는 주로 연직방향으로 진동하는 지진응답에 기여하고 역대칭 모드는 연직방향과 수평방향 지진응답에 기여한다. 그리고 돔과 같은 대공간 구조물은 일반 라멘구조와 다르게 수평 지진에 의하여 수평응답은 물론 연직응답도 크게 나타난다.



<Fig. 3> Artificial Earthquake

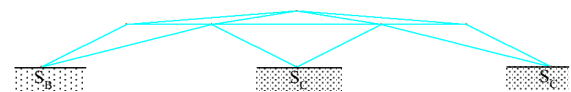
3.2 지반특성을 고려한 지진하중 적용

본 연구에서는 예제 구조물에 인공 지진하중을 가하여 시간이력해석을 수행하였다. 인공 지진하중의 생성을 위하여 KBC 2009의 내진설계기

준에 따른 가속도 설계응답스펙트럼을 사용하고 지반은 S_B 와 S_C 로 그리고 최대지반가속도는 0.12g을 적용하였다. 인공 지진하중의 시간이력 그래프를 <Fig. 3>에 각각 나타내었다.

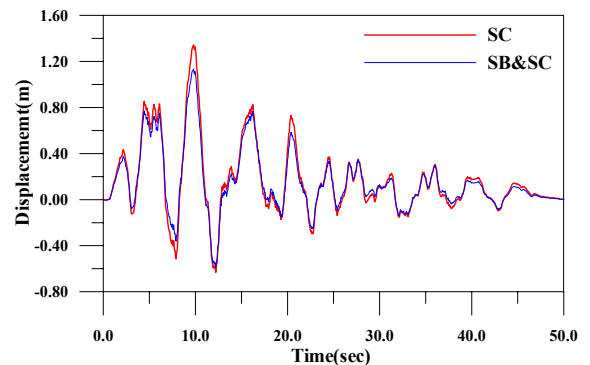
3.3 예제 구조물의 지진응답

예제 구조물의 기초가 위치한 지반의 특성을 <Fig. 4>와 같이 가정하고 S_B 및 S_C 지반특성을 반영한 인공지진하중을 각각의 지점에 가하였다.

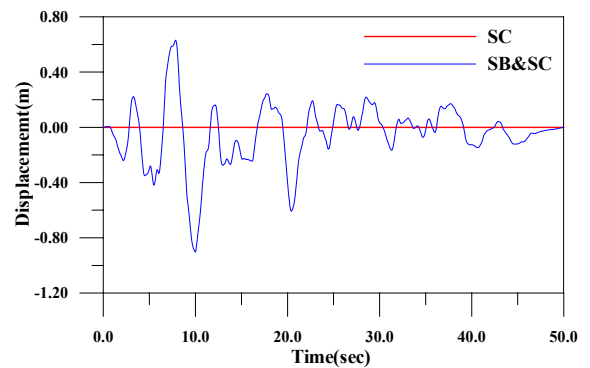


<Fig. 4> Ground condition

돔 예제 구조물의 진동모드 분석에 의하면 경간의 1/4지점(절점 B와 절점 C)과 1/2지점(절점 A)에서 진동응답이 크게 나타날 것으로 예상된다.



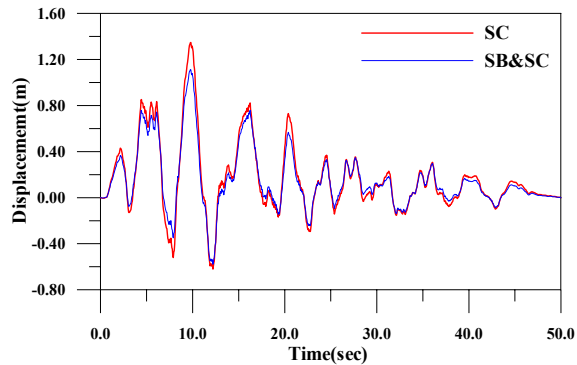
(a) Horizontal displacement responses



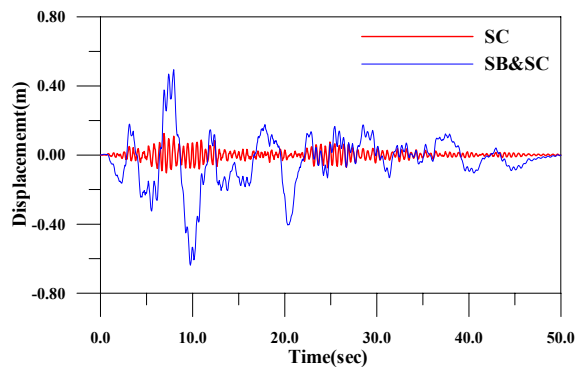
(b) Vertical displacement responses

<Fig. 5> Displacement responses at 1/2 span length

경간의 1/2 지점에서의 변위응답을 비교한 결과, <Fig. 5>에서 볼 수 있듯이 다중 지점 지진하중(SB&SC)에 의한 수평 변위응답과 단일 지진하중(SC)에 의한 수평 변위응답이 유사하게 나타나고 있다. 그러나 연직방향 변위응답에 있어서 단일 지진하중에 의한 연직 변위응답보다 다중 지점 지진하중에 의한 연직 변위응답이 매우 크게 나타나고 있다. 이는 다중지점에 의한 효과로 지점에 각각 다른 지진하중이 적용하기 때문에 나타나는 것이다.



(a) Horizontal displacement responses

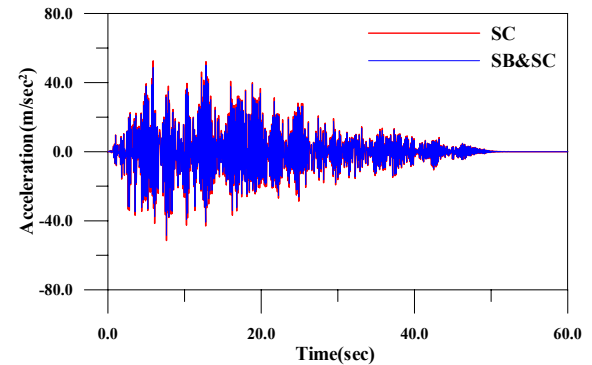


(b) Vertical displacement responses

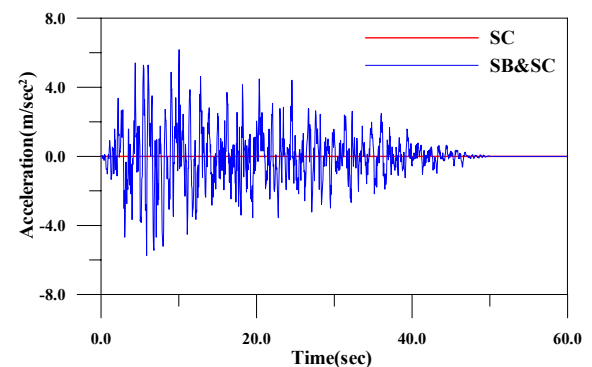
<Fig. 6> Displacement responses at 1/4 span length

<Fig. 6>은 경간의 1/4 지점에서의 변위응답을 비교한 것으로 경간 1/2 지점에서의 변위응답의 양상과 유사하게 나타나고 있다. 연직방향의 변위응답의 경우에 각각의 지점에 다른 지진하중이 작용하는 다중지점 지진하중의 연직방향 변위응답이 단일 지진하중에 의한 변위응답과 비교하여 큰 차이를 보이고 있다.

<Fig. 7>은 경간의 1/2 지점에서의 가속도 응답으로 변위응답과 유사한 양상을 보이고 있다. 단일 지진하중에 의한 수평 가속도응답이 다중 지점 지진하중에 의한 수평 가속도응답과 유사하게 나타나고 있으나 연직 가속도의 경우에 큰 차이를 보이고 있다.



(a) Horizontal acceleration responses

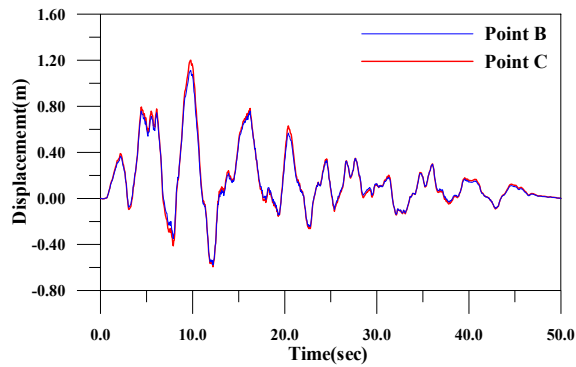


(b) Vertical acceleration responses

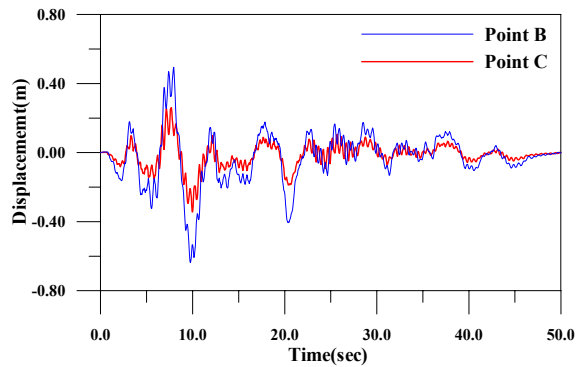
<Fig. 7> Acceleration responses at 1/2 span length

예제 구조물의 기하학적으로 대칭을 이루고 있으나 각각 지점의 지반특성이 다르므로 경간의 1/4지점 좌우, 절점 B와 절점 C에서 진동응답이 다르게 나타날 것으로 예상된다.

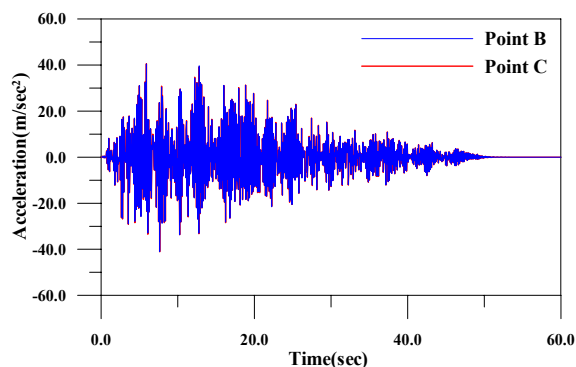
<Fig. 8 (a), (b)>는 1/4 지점 좌우에서의 변위 응답으로 수평방향 변위응답의 경우에 유사하게 나타나고 있으나 연직방향 변위응답의 경우에 응답의 크기도 다르게 나타나고 있다. 따라서 다중 지점 지반 조건은 수평방향 응답보다 연직방향 응답에 더 큰 영향을 끼치는 것을 볼 수 있다.



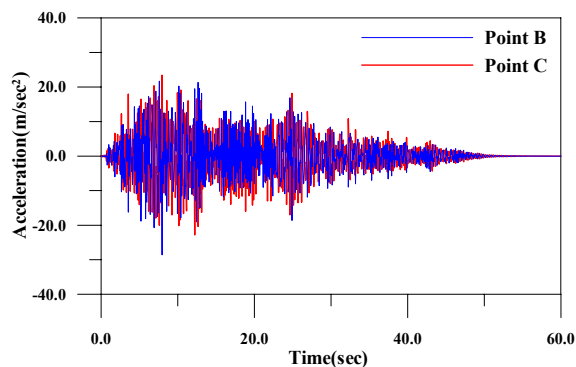
(a) Horizontal displacement responses



(b) Vertical displacement responses



(c) Horizontal acceleration responses



(d) Vertical acceleration responses

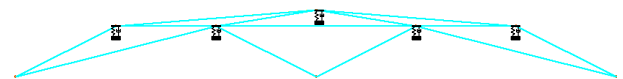
<Fig. 8> Responses at 1/4 span length (left & right)

<Fig. 8 (c), (d)>는 1/4 지점 좌우에서의 가속도응답으로 수평방향 가속도응답의 경우에 유사하게 나타나고 있으나 연직방향 가속도응답의 경우에 응답의 크기도 다르게 나타나고 있다. 연직방향 가속도응답의 경우에 진동모드의 특성으로 인하여 역대칭으로 나타나고 있다.

4. 다지점 돔 구조물의 지진응답 제어

4.1 예제 구조물의 TMD 설계

예제 구조물의 지진동 제어를 위한 TMD의 질량과 진동수비는 기존 연구를 바탕으로 다음과 같이 설계하였다.^[2] 고정하중과 활하중을 고려한 예제 구조물의 총질량이 69.84kgf/g이므로 TMD의 질량은 예제 구조물 총질량의 5%인 3.49kgf/g로 하였다. 그리고 질량비에 따른 진동수비를 0.987로 하여 TMD를 설계하였다.



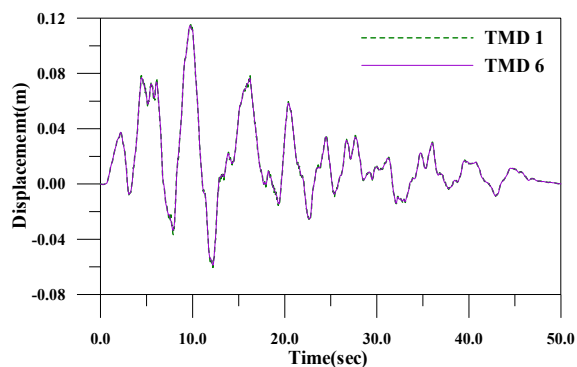
<Fig. 9> Example structure with TMD

<Fig. 9>와 같이 경간의 1/2지점에 TMD를 설치하는 경우에는 TMD 1개를 예제 구조물의 1차 모드에 동조하도록 설계하였으며 경간의 1/4 지점에 TMD를 설치하는 경우에는 TMD 6개를 예제 구조물의 2차 모드에 동조하도록 설계하였다. TMD의 질량에 따라서 진동제어 성능이 다르게 나타나므로 TMD를 6개 설치한 경우와 TMD를 1개 설치하는 경우의 총질량은 같게 하였다.^[2]

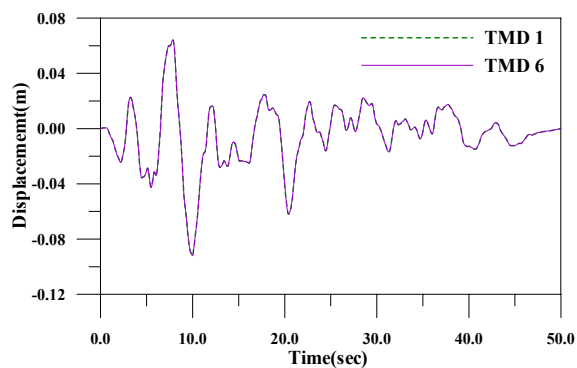
4.2 다지점 돔 구조물의 TMD 적용

다중지점 지진하중을 받는 예제 돔 구조물의 경간 중앙과 경간 1/4에서의 지진응답을 <Fig. 10>과 <Fig. 11>에 나타내었다.

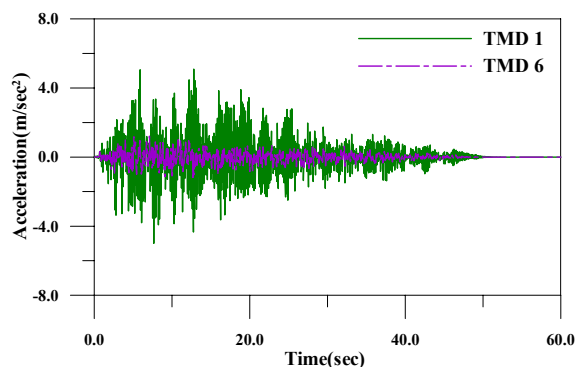
경간의 1/2 지점에서의 변위응답은 TMD 1개를 설치한 경우와 TMD 6개를 설치한 경우 모두 비슷한 변위응답을 보이고 있다. 그러나 경간의 1/2 지점에서의 수평방향 가속도응답에 있어서 TMD 1개를 설치한 경우보다 TMD 6개를 설치한 경우에 우수한 제어 성능을 보이고 있다.



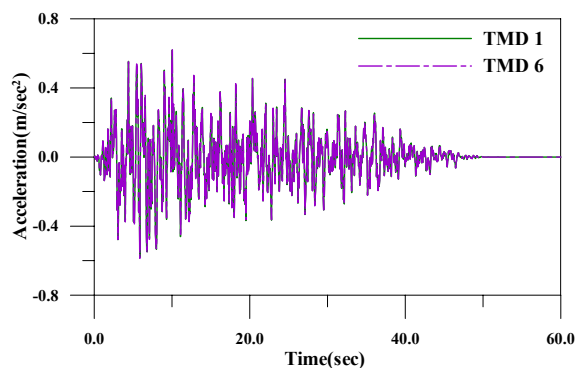
(a) Horizontal displacement responses



(b) Vertical displacement responses

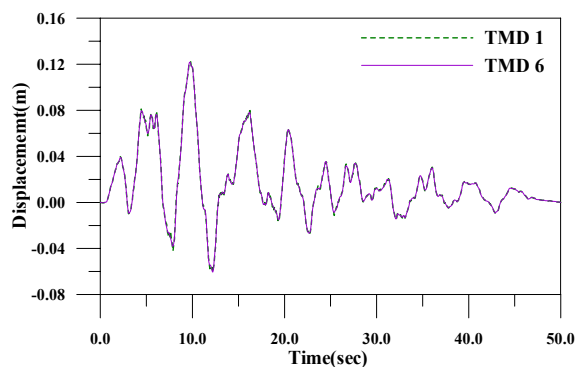


(c) Horizontal acceleration responses

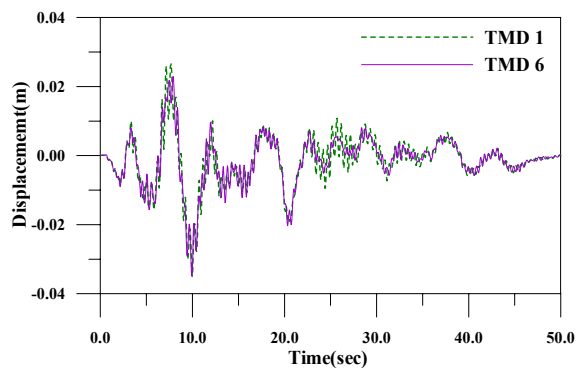


(d) Vertical acceleration responses

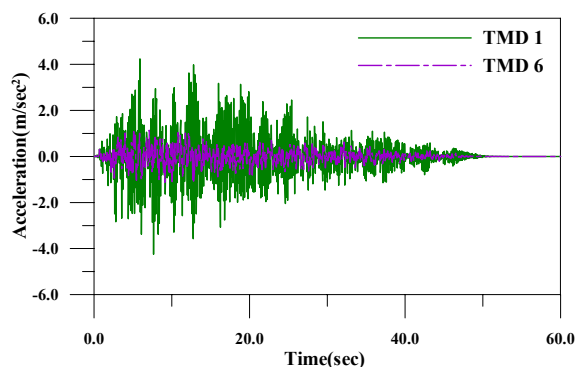
<Fig. 10> Responses at 1/2 span length w/ TMD



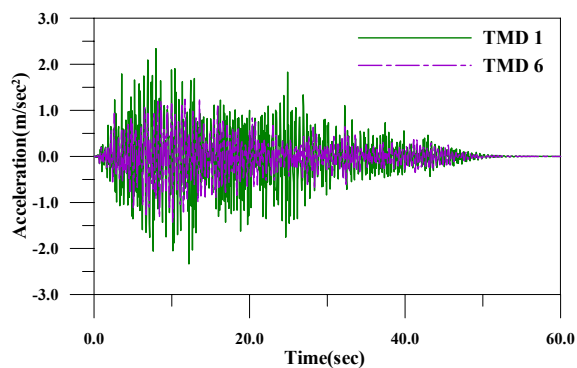
(a) Horizontal displacement responses



(b) Vertical displacement responses



(c) Horizontal acceleration responses



(d) Vertical acceleration responses

<Fig. 11> Responses at 1/4 span length w/ TMD

경간의 1/4 지점에서의 변위응답은 TMD 1개를 설치한 경우와 TMD 6개를 설치한 경우 비슷한 제어성능을 보이고 있다. 그러나 경간의 1/4 지점에서의 가속도응답에 있어서 TMD 1개를 설치한 경우보다 TMD 6개를 설치한 경우에 우수한 제어 성능을 보이고 있다.

다지점 돔 예제 구조물에 지진하중이 가해지는 경우에 변위응답 제어에 있어서는 TMD 설치 위치나 개수에 관계없이 유사한 제어성능을 보이고 있다. 그러나 가속도응답의 제어에 있어서는 TMD를 경간 1/4지점에 6개 설치하는 것이 경간 1/2지점에 TMD 1개를 설치하는 것보다 더 효과적인 제어성능을 보이고 있다. 따라서 다지점 돔 구조물에 지진하중이 가해질 경우에 경간의 1/4지점에 TMD를 설치하는 것이 지진응답 제어에 있어서 효과적이다.

5. 결론

공간구조물은 지진과 같은 자연재난시 피난시설로 사용되는 높은 공공성을 가지고 있는 건축물로 지진에 대한 진동응답 분석 및 진동응답 제어가 필요하다. 이러한 공간구조물은 수평방향 지진하중에 의하여 수평방향의 지진응답은 물론 연직방향의 지진응답이 매우 크게 나타나는 특성을 가지고 있다. 본 연구에서는 수동형 TMD의 설치에 따른 스타 돔 구조물의 지진응답 제어성능을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 돔 구조물에 다중지점 지진하중이 가해지는 경우와 단일 지진하중이 가해지는 경우의 지진응답을 비교한 결과, 수평방향 지진응답은 유사하나 연직방향 지진응답은 큰 차이를 보이고 있다.

- 다지점 돔 구조물의 지진동 제어를 위해서는 경간의 1/4지점에 TMD를 설치하는 것이 보다 효과적이다.

추후 연구에 있어서는 최근에 많은 연구가 수행되고 있는 MR감쇠기 등의 접목한 스마트 제어장치에 대한 적용을 통한 다지점 돔 구조물의 진동응답 제어에 대한 연구를 수행하고자 한다.

감사의 글

본 논문은 2014년도 서일대학교 학술연구비에 의해 연구되었음.

References

1. Gee-Cheol Kim and Joo-Won Kang (2013), Seismic Response of Spatial Structure Subjected to Multi-Support Earthquake Load, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 25, No. 4, pp.399-407
2. Gee-Cheol Kim and Joo-Won Kang (2012), Application of TMD for Seismic Response Control of Dome Structure, *Journal of the Association for Spatial Structure*, Vol. 12, No. 1, pp.99-108
3. Su, L., Dong, S. and Kato, S. (2007) Seismic Design for Steel Trussed Arch to Multi-support Excitations, *Journal of Constructional Steel Research* 63, pp, 725-734.
4. Jihong, Y., Zhiqiang, Z. and Ye, C. (2011) Strength Failure of Spatial Reticulated Structures under Multi-support Excitation, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol. 10, No. 1, pp. 21-36.
5. Sextos, A., Kappos, A. J. and Mergos, P. (2004), Effect of Soil-Structure Interaction and Spatial Variability of Ground Motion on Irregular Bridge, The Case of The Krystallopigi Bridge, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, 1-6, Paper No. 2298.

- Received : October 27, 2014
- Revised : November 12, 2014
- Accepted : November 24, 2014