

## 돔 구조물의 지진응답 제어를 위한 TMD의 적용

### Application of TMD for Seismic Response Control of Dome Structure

김기철\*

Kim, Gee-Cheol

강주원\*\*

Kang, Joo-Won

#### 요약

본 연구에서는 지진하중을 받는 대공간 구조물의 지진응답을 저감시키기 위하여 돔 구조물에 대한 동조질량제어장치(TMD)의 적용성을 검토하였다. 이를 위하여 돔 구조물의 기본적인 동적특성을 가지고 있으며 가장 간단한 구조이기도 한 스타 돔 구조물에 수동형 TMD를 설치하여 지진응답 제어성능을 평가하였다. 본 연구에서는 KBC2009에 따른 인공 지진하중을 수평방향과 연직방향으로 가하여 스타 돔 구조물에 대한 지진응답을 분석하였으며 이를 바탕으로 TMD의 설치에 따른 스타 돔 구조물의 지진응답 제어 성능을 분석하였다. 해석결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 지진하중의 방향에 반응하는 스타 돔 구조물의 진동모드 분석을 통하여 수동 TMD를 설치하는 것이 지진응답 제어에 있어서 효과적인 것을 확인할 수 있었다.

#### Abstract

Vibration control devices are classified into passive, semi-active and active device. TMD(Tuned Mass Damper) is one of the passive control device that is mainly used to reduce vibration level of building structure and bridge structure. In this study, the application of passive tuned mass damper(TMD) to seismic response control of dome structures has been investigated. Because star dome structure has primary characteristics of dome structures, star dome structure was used as an example dome structure that is subjected to horizontal or vertical seismic loads. From this numerical analysis, it is shown that seismic response are influenced by vibration modes 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.

**키워드 :** 진동제어장치, 동조질량 감쇠기, 지진응답 제어, 스타돔

**Keywords:** Vibration control device, Tuned mass damper, Seismic Response Control, Star dome

## 1. 서론

대공간 구조물은 넓은 공간을 이루는 구조물로서 평상시에는 본래의 목적에 맞게 체육시설, 집회시설 등으로 사용되지만 태풍 또는 지진과 같은 자연재해로 인하여 주거시설이 파괴된 경우에는 공간의 효율성으로 인하여 피난시설로 많이 활용되고 있다. 이러한 대공간 구조물의 지붕구조물은 비교적 경량 구조물로서 정적하중이나 풍하중에 대하여 지배적이므로 정적하중이나 풍하중에 의하여 구조부재가 설계되는 것이 일반적이다. 그러나 지진과 같은 자연재해시 피난시설로 사용되는 대공간 구조물의 경우에 높은 공공성으로 인하여 지진하중

에 대한 대공간 구조물의 지진응답 분석 및 지진응답 제어, 내진설계 등이 요구된다.

지진에 의한 대공간 구조물의 진동은 대공간 구조물의 안전성 및 상용성에 많은 영향을 미치게 되며 이러한 대공간 구조물 진동을 저감하기 위하여 면진장치 및 제진장치와 같은 다양한 진동 제어장치가 활용되고 있다. 특히 지진하중에 의한 대공간 구조물의 동적거동은 일반적인 구조물과는 다른 거동을 보이고 있다. 따라서 대공간 구조물에 대한 지진동 제어에 있어서 일반구조물과는 다른 방법으로 적용해야 할 것이다.

본 연구에서는 대공간 구조물 중에서 자중이 비교적 커서 지진응답이 크게 나타나는 스페이스 프레임 형태의 돔 구조물을 대상으로 하여 지진응답을 분석하였다. 그리고 돔 구조물의 지진동 제어를 위한 수동 동조질량감쇠기(TMD, Tuned Mass Damper)의 적용성을

\* 서일대학 건축과, 조교수

\*\* 교신저자, 영남대학교 건축학부, 교수

Tel: 053-810-2429 Fax: 053-810-4625

E-mail: kangj@ynu.ac.kr

알아보고자 TMD의 설치에 따른 제어성능을 분석하였다.

## 2. 대공간 구조물의 내진성능 확보방안

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

### 2.1 대공간 간구조물의 지진동 제어

대공간 구조물 지진동 제어에 있어서 가장 많이 사용되는 장치가 면진장치와 제진장치이다. 면진장치는 지진에너지가 지반에서 기초를 통하여 상부 구조물로 전달되는 것을 최소화 하는 장치로 기초와 기둥 사이에 유연한 재료를 삽입하여 대공간 구조물의 고유진동수가 지진의 탁월 진동수를 벗어나도록 하는 장치이다. 제진장치는 지진하중에 의한 대공간 구조물의 움직임에 대하여 반대로 거동하도록 장치를 설치하여 구조물의 흔들림을 저감하고 건물의 손상을 방지하는 구조다.

### 2.2 대공간 구조물의 제진장치

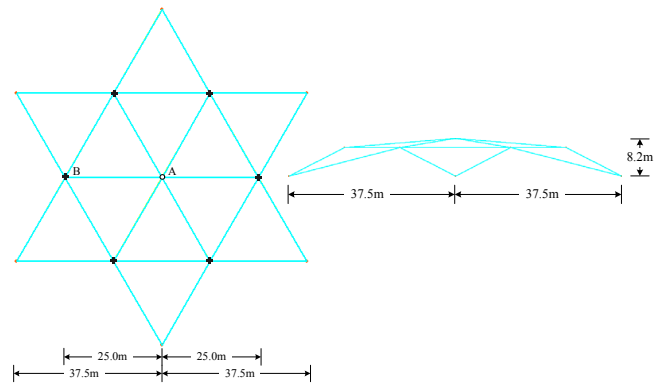
대공간 구조물의 진동제어에 적용되는 제진 장치는 수동형, 능동형 및 준능동형으로 구분할 수 있다. 수동형 제어방법은 동적하중에 의하여 공진이 발생하지 않도록 하거나 가해지는 동적하중의 방향과 반대 방향으로 제어력이 작용하도록 감쇠장치를 설치하는 방법이다. 능동형 제어방법은 동적하중에 의하여 야기되는 대공간 구조물의 진동을 감지하여 구조물의 진동에 대응하는 제어력을 액추에이터와 같은 장치를 사용하여 인위적으로 가하여 구조물의 진동을 저감시키는 방법이다. 준능동형 제어장치는 수동형과 준능동형의 중간적인 장치로 구조물에 인위적으로 제어력을 가하지는 않으나 구조물의 강성이

나 감쇠 등을 동적하중의 특성에 부응하여 순간적으로 변화시켜 구조물을 제어하는 방법이다. 각각의 제어장치는 제어력, 반응속도, 경제적 비용 등 장·단점이 있을 수 있다.<sup>1),2)</sup> 본 논문에서는 돔 형태의 대공간 구조물의 지진동 제어를 위하여 수동형 TMD를 적용하고자 한다.

## 3. 돔 구조물의 진동제어를 위한 TMD의 적용

### 3.1 예제 구조물의 동적특성

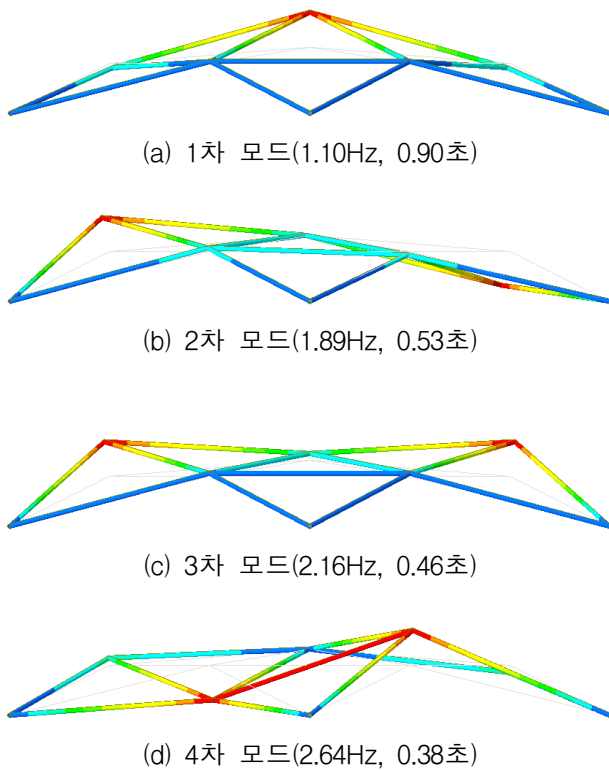
대공간 구조물의 경우에 저차 모드의 고유주기가 지진 가속도스펙트럼의 탁월 주기영역에 분포하고 있어 지진에 의한 응답이 크게 나타날 수 있다. 본 연구에서는 돔 구조물 중에서 <그림 1>와 같이 가장 간단한 스타 돔을 예제 구조물로 선정하였으며 스타 돔은 돔 구조물의 기본적인 동적특성을 내재하고 있다. 예제 구조물은 트러스 형태로 경간이 75m, 높이는 8.2m이다. 그리고 부재는 탄성계수가  $2.05 \times 10^5 \text{Mpa}$ , 단면이  $\varnothing 165.2 \times 6$ 의 강관으로 구성되어 있다. 예제 구조물의 정적하중에 의한 처짐은 경간의 약 1/400 정도의 처짐을 보이고 있다.



<그림 1> 스타 돔 예제 구조물

돔 구조물의 동적특성은 돔의 형상, 개각, 걸보기 세장비 등에 의하여 좌우된다. 예제 구조물의 진동모드 양상은 <그림 2> (a), (c)와 같이 대칭 모드 그리고 <그림 2> (b), (d)와 같이 역대칭 모드로 나타난다. 대칭 모드는

주로 연직방향 지진하중에 반응하여 구조물이 상하로 진동하는 지진응답에 기여하고, 역대칭 모드는 주로 수평방향 지진하중에 의하여 지진응답이 크게 발생한다. 돔과 같은 대공간 구조물은 일반 라멘구조와 다르게 수평지진에 의하여 수평응답을 물론 연직응답도 크게 나타낸다. 또한 <그림 2>에서 알 수 있듯이 저차모드의 진동주기가 지진하중의 가속도스펙트럼에서 탁월한 주기영역에 분포하기 때문에 지지하중에 의한 진동응답이 매우 크게 나타날 것이다.<sup>3,4)</sup>

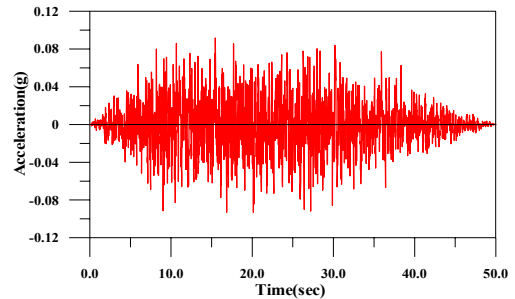


<그림 2> 예제 구조물의 모드형상 및 고유주기

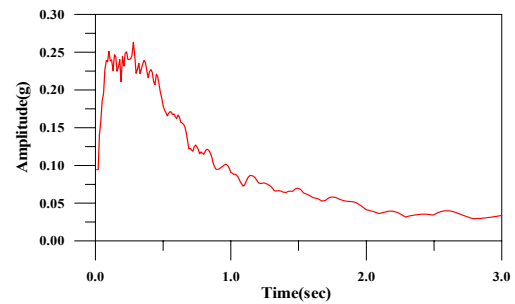
### 3.2 예제 구조물의 가진 지진하중

대공간 구조물은 장경간으로 구성되기 때문에 수평방향의 지진하중은 물론 경우에 따라서 연직방향의 지진하중에 의한 영향이 크게 받는다. 따라서 본 연구에서는 예제 구조물에 인공 지진하중을 수평방향과 연직방향으로 가하여 시간이력 해석을 수행하였다. 인공 지진하중의 생성을 위하여 KBC 2009의 내진설계에 따른 가속도 설계응답스펙트럼을 사용하고 지반은  $S_B$ 로 최대지반가속도는 0.07g를 적용하였다. 인공 지진하중의 시간이력 및 스펙트럼 그래프를 <그림 3>에

각각 나타내었다. 인공 지진하중은 주기가 1초 이내인 영역에서 큰 에너지를 가지고 있으므로 주요 저차 모드의 주기가 1초 이내인 예제 스타 돔 구조물에 큰 영향을 미칠 수 있을 것으로 사료된다.



(a) 인공지진하중의 시간이력



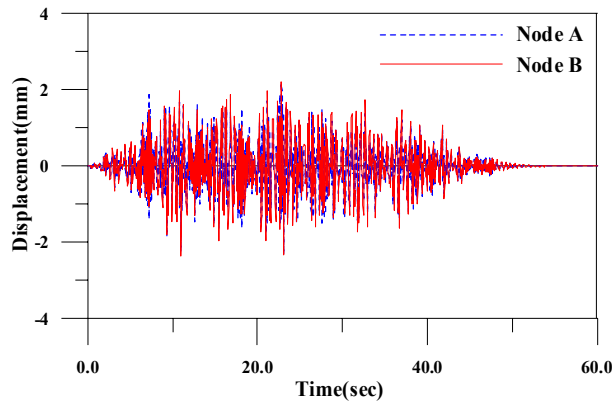
(b) 인공지진하중의 스펙트럼

<그림 3> 지진하중

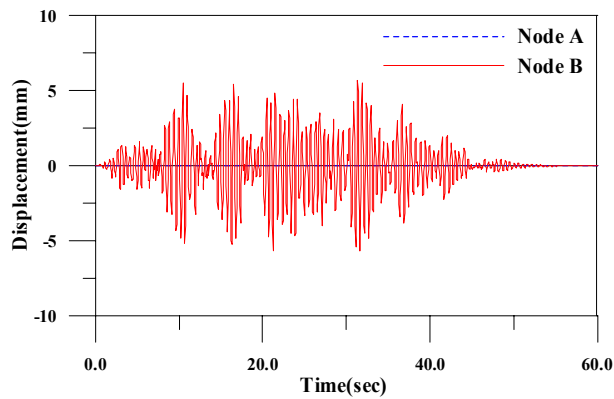
### 3.3 예제 구조물의 지진응답 분석

예제 구조물의 지진응답 제어에 앞서 지진하중에 의한 예제 구조물의 지진응답을 분석이 요구된다. 수평방향 및 연직방향 지진하중에 의한 예제 구조물의 수평 변위응답과 연직 변위응답을 <그림 4>, <그림 5>, <그림 6>에 각각 나타내었다. <그림 4>를 살펴보면, 수평방향의 지진하중에 의한 수평방향의 변위응답은 경간의 중앙(절점 A)과 경간의 1/4지점(절점 B)에서 모두 크게 나타나고 있다. 그러나 연직방향 응답의 경우에 경간의 중앙(절점 A)에서의 변위응답이 경간의 1/4지점(절점 B)에서의 변위응답보다 현저하게 작은 것을 볼 수 있다. 이는 절점 A에서 모드벡터가 크게 나타나는 1차 모드와 3차 모드에 반응하기 위해서는 지진하중이 연직방향으로 가해져야 하지만 지진하중이 수평방향으로 가해졌기 때문에 절점 A에서의 연직방향 변위응답이 매우 작게 나타나

고 있는 것이다. 그리고 경간의 1/4지점(절점 B)에서의 수직방향 및 수평방향의 지진응답이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 절점 B에서 모드벡터가 크게 나타나는 2차와 4차의 역대칭 모드는 수평방향의 지진하중에 의하여 응답이 크게 반응하기 때문이다.



(a) 수평 변위 응답-수평방향 지진

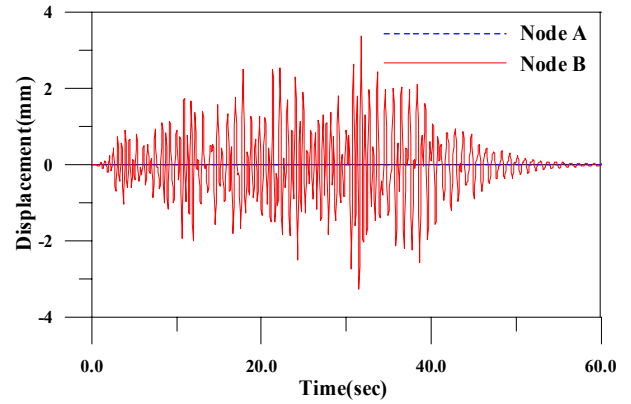


(b) 연직 변위 응답-수평방향 지진

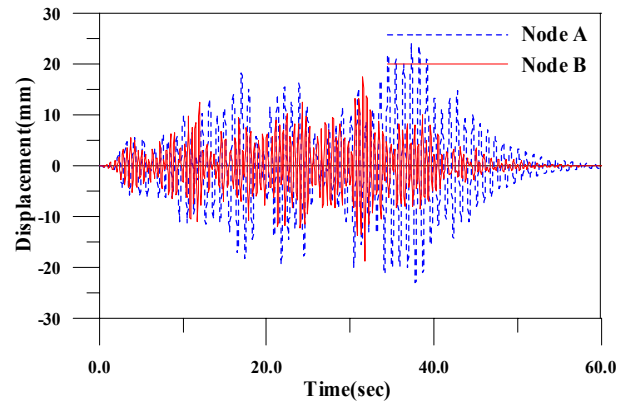
<그림 4> 예제 구조물의 변위 응답-수평방향 지진하중

<그림 5>를 살펴보면, 연직방향의 지진하중에 의한 수평방향의 변위 응답은 경간의 중앙(절점 A)에서의 변위 응답이 경간의 1/4지점(절점 B)에서의 변위 응답보다 매우 작은 것을 볼 수 있다. 주요 저차 모드에서 절점 A의 모드벡터가 수평방향으로 나타나지 않기 때문이다. 그러나 연직방향의 변위 응답은 경간의 중앙(절점 A)과 경간의 1/4 지점(절점 B)에서 모두 크게 나타나고 있다. 이는 수평방향의 지진하중을 가한 것과 다르게 절점 A

에서 연직방향 변위 응답이 크게 나타나는 것은 연직방향 지진하중에 반응하는 1차와 3차의 역대칭 모드에서 절점 A의 모드벡터가 연직방향으로 크게 나타나기 때문이다.

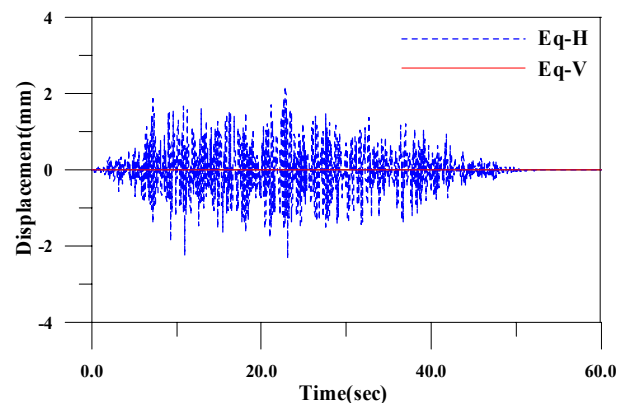


(a) 수평 변위 응답-연직방향 지진

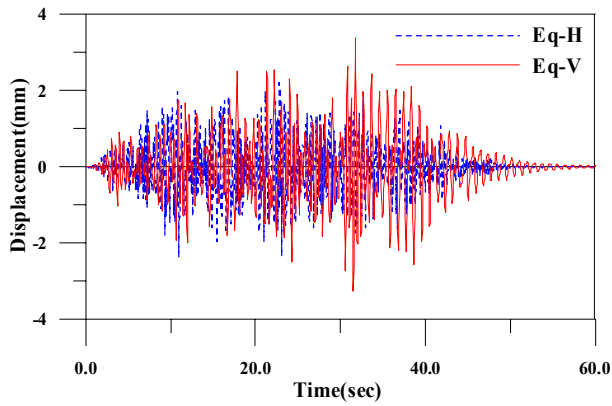


(b) 연직 변위 응답-연직방향 지진

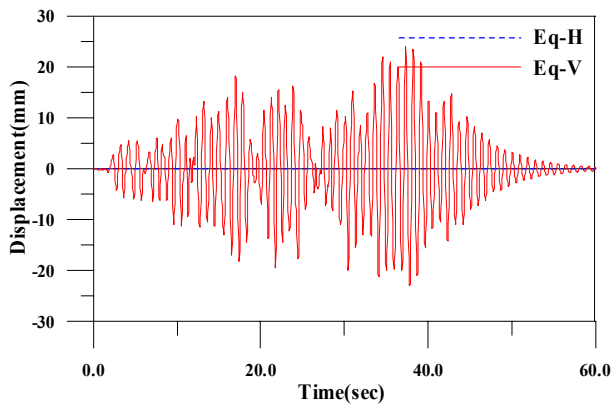
<그림 5> 예제 구조물의 변위 응답-연직방향 지진하중



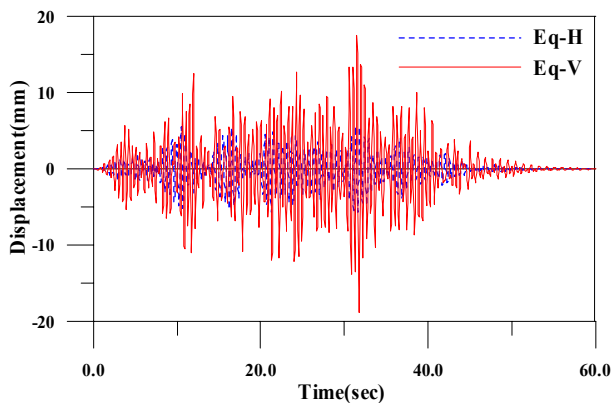
(a) 절점 A의 수평 변위 응답



(b) 절점 B의 수평 변위 응답



(c) 절점 A의 연직 변위 응답



(d) 절점 B의 연직 변위 응답

<그림 6> 예제 구조물의 변위 응답-인공 지진하중

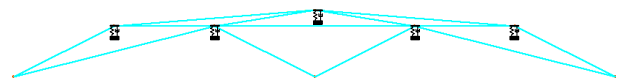
<그림 6>은 수평방향과 연직방향 지진하중에 의한 예제 구조물의 지진응답으로 연직방향의 지진응답이 절점 A와 절점 B에서 매우 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 예제 구조물과 같은 대공간 구조물이 수평방향의 지진하중보다는 연직방향의 지진하중에 보다 크게 반응하는 것으로 판단된다. 그리고 대공간 구조물의 경우에 경간의

중앙보다 경간의 1/4지점에서 응답이 가장 크게 나타난 것을 볼 수 있다.

#### 4. TMD 설치 위치 및 거동 방향에 따른 지진동제어 성능

##### 4.1 예제 구조물의 TMD 적용

예제 구조물의 지진동 제어를 위한 TMD의 질량과 진동수비는 기존 연구를 바탕으로 다음과 같이 설계하였다.<sup>5)</sup> 예제 구조물의 총질량이 14.645kgf/g이므로 TMD의 질량은 예제 구조물 총질량의 5%인 0.732kgf/g로 하였다. 그리고 질량비에 따른 진동수비를 0.987로 하여 TMD의 진동수를 조절하여 설계하였다. 예제 구조물의 지진응답 분석을 통하여 수평 및 연직변위가 비교적 크게 발생하는 위치에 TMD를 설치하였다. <그림 1>에 표시한 스타 돔 경간의 1/2지점(O), 경간의 좌우 1/4지점(+에 <그림 7>과 같이 TMD를 설치하였다.



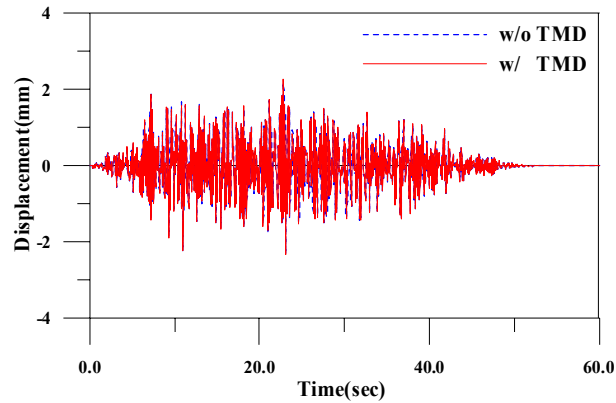
<그림 7> 예제 구조물에 대한 TMD 설치

경간의 1/2지점에 TMD를 설치하는 경우에는 TMD 1개를 예제 구조물의 1차 모드(1.0001Hz)에 동조하도록 설계하였으며 경간의 1/4 지점에 TMD를 설치하는 경우에는 TMD 6개를 예제 구조물의 2차 모드(1.8882Hz)에 동조하도록 설계하였다. TMD의 질량에 따라서 진동제어 성능이 다르게 나타나므로 TMD를 6개 설치한 경우와 TMD를 1개 설치하는 경우의 총질량은 같게 하였다.

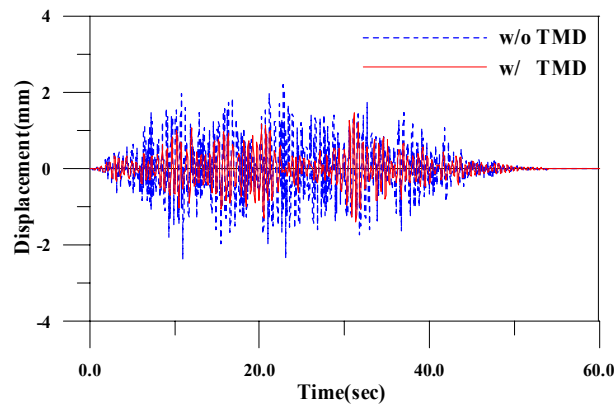
##### 4.2 TMD 설치에 따른 지진응답 제어

수동형 TMD 설치에 의한 예제 구조물의 지진응답 제어성능을 분석하고자 한다. <그림 8>과 <그림 9>에서 절점 A의 지진응답 분석은 경간 중앙에 TMD 한 개를 설치한 경우의 변위응답을 비교한 것이다. 그리고 절점 B의 지진응답 분석은 경간 1/4 지점에 TMD 여섯 개를 설치한 경우의 변위응답을 분석하

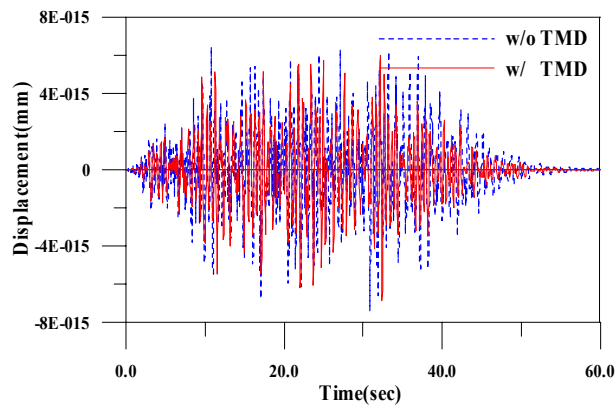
였다. 지진하중의 방향에 따라서 TMD의 제어 성능이 많은 차이를 보이고 있는 것을 볼 수 있다.



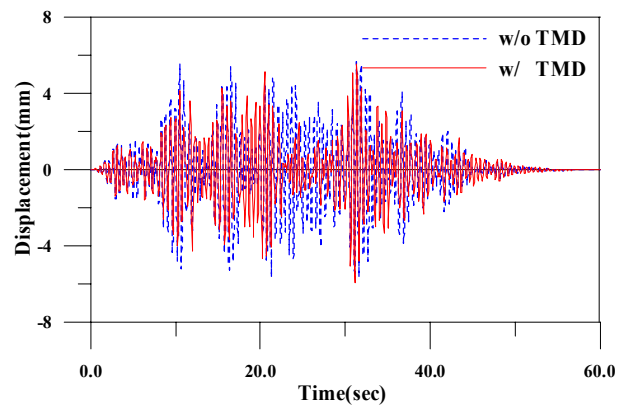
(a) 절점 A의 수평 변위 응답-수평방향 지진



(b) 절점 B의 수평 변위 응답-수평방향 지진

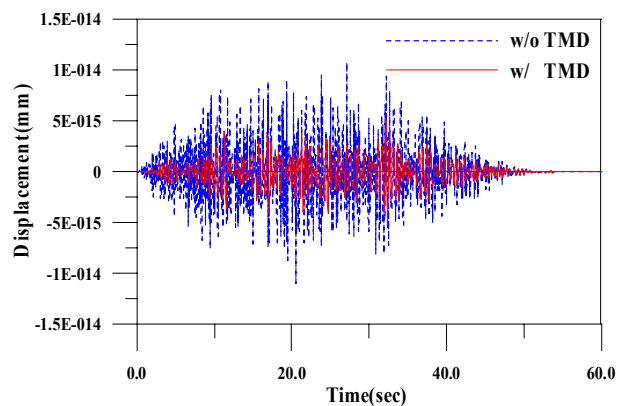


(c) 절점 A의 연직 변위 응답-수평방향 지진

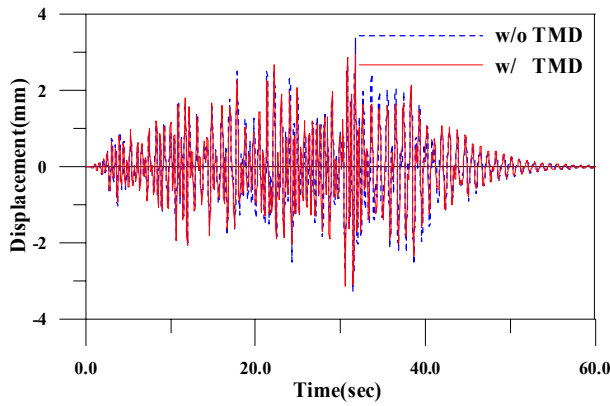


(d) 절점 B의 연직 변위 응답-수평방향 지진  
<그림 8> TMD 설치에 따른 지진 응답 제어 성능-수평방향 지진

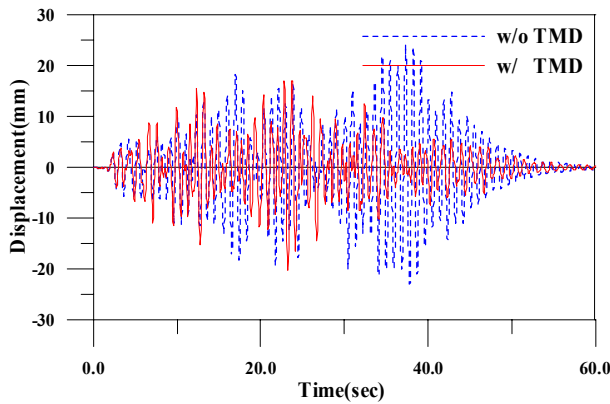
수평방향 지진하중에 의한 TMD 설치에 따른 예제 구조물의 지진 응답 제어 성능을 <그림 8>에 나타내었다. 수동형 TMD를 경간의 1/4지점에 설치하는 것이 절점 B의 지진 응답 제어에 있어서 우수한 제어 성능을 보여주고 있다. 이는 수평방향 지진하중에 대하여 반응을 하는 경간의 1/4 지점에 수동형 TMD를 설치하는 것이 보다 효과적이기 때문이다. 그러나 경간의 중앙에 수동형 TMD를 설치하는 것은 절점 A의 지진 응답 제어에 있어서 효과가 매우 미비한 것을 볼 수 있다. 따라서 수평방향 지진하중에 대한 예제 구조물의 지진 응답의 제어에 있어서 TMD를 경간의 1/4지점에 설치하면 예제 구조물의 수평 변위 및 연직 변위를 동시에 제어할 수 있을 것이다.



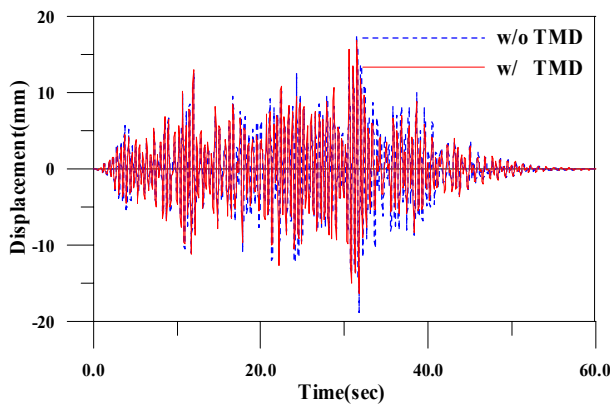
(a) 절점 A의 수평 변위 응답-연직방향 지진



(b) 절점 B의 수평 변위응답-연직방향 지진



(c) 절점 A의 연직 변위응답-연직방향 지진



(d) 절점 B의 연직 변위응답-연직방향 지진  
<그림 9> TMD 설치에 따른 지진응답 제어성능-연직방향 지진

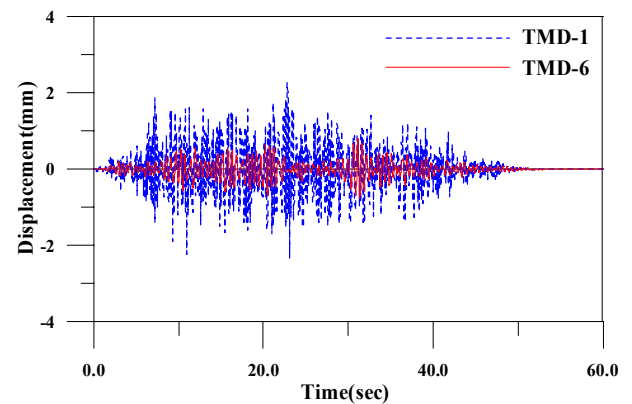
연직방향 지진하중에 의한 TMD 설치에 따른 예제 구조물의 지진응답 제어성능을 <그림 9>에 나타내었다. 예제 구조물에 연직방향 지진하중이

가해질 경우에 경간의 중앙에 수동형 TMD를 설치하는 것이 예제 구조물의 지진응답 제어에 있어서 효과적인 것을 볼 수 있다. 이는 지진하중이 연직방향으로 가해지고 TMD의 거동이 연직방향으로 거동하기 때문에 연직방향 지진하중에 대하여 반응을 하는 경간의 1/2 지점에서의 응답제어가 보다 효과적이기 때문이다. 그러나 TMD로 지진응답을 제어하기 이전의 절점 A 수평방향 변위응답 자체가 매우 작기 때문에 TMD에 대한 제어효과가 매우 미비할 것이다. 따라서 연직방향 지진하중에 대한 TMD의 지진응답 제어효과는 예제 구조물의 1/2지점에 TMD를 설치하여 연직방향의 지진응답 제어에 있어서 우수한 성능을 보이고 있다.

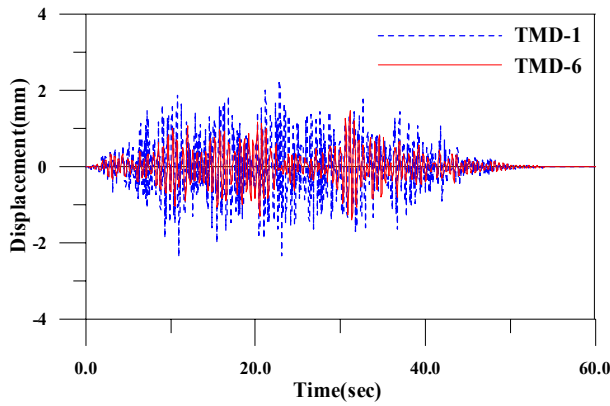
#### 4.3 TMD 설치 위치에 따른 지진응답 제어성능 분석

수동형 TMD를 예제 구조물의 1/2지점과 1/4지점에 각각 설치하여 지진응답에 대한 TMD의 제어성능을 비교분석하였다. 경간 중앙에 TMD 한 개를 설치한 경우(TMD-1)와 경간 1/4 지점에 TMD 여섯 개(TMD-6)를 설치한 경우의 변위응답을 비교하여 TMD 설치 위치에 따른 제어성능을 분석하였다.

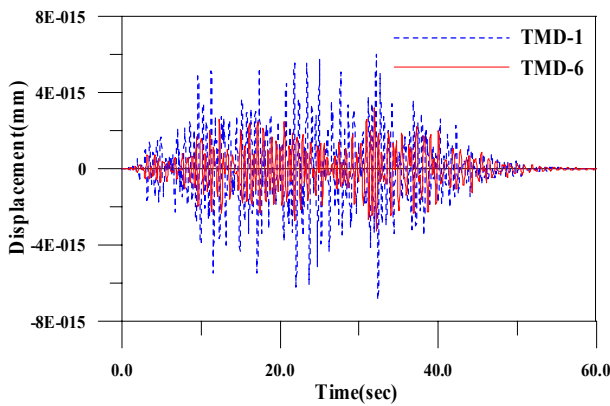
수평방향 지진하중을 받는 예제 구조물의 TMD 설치 위치에 따른 TMD의 지진응답 제어성능을 <그림 10>에 나타내었다.



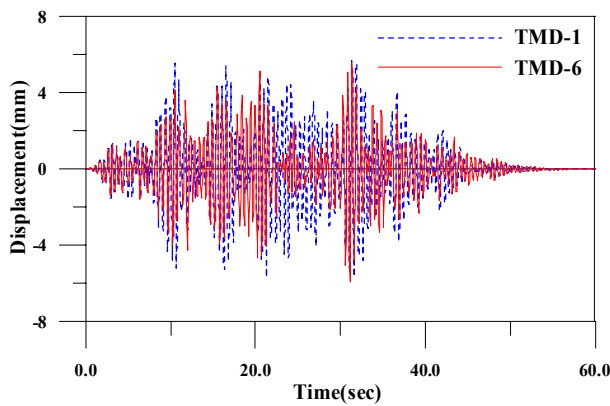
(a) 절점 A의 수평변위-수평방향 지진-TMD 위치



(b) 절점 B의 수평변위-수평방향 지진-TMD 위치



(c) 절점 A의 연직변위-수평방향 지진-TMD 위치

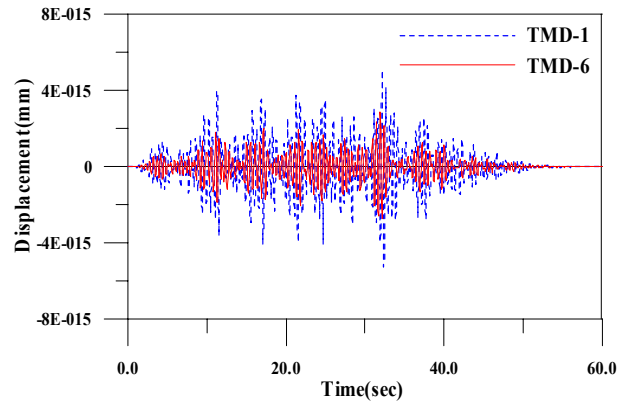


(d) 절점 B의 연직변위-수평방향 지진-TMD 위치

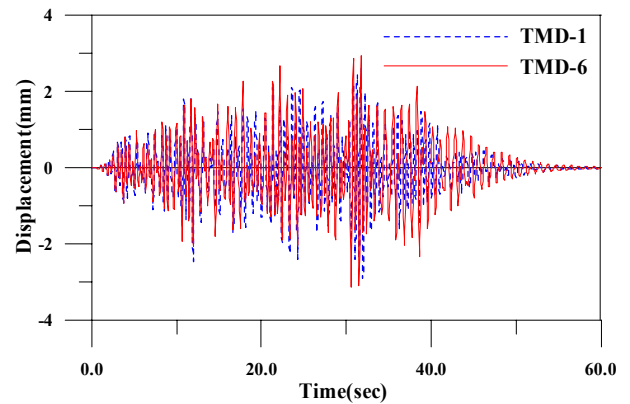
<그림 10> TMD 제어성능-수평방향 지진

예제 구조물에 수평방향 지진하중이 가해지는 경우, 수평 지진응답 제어에 있어서 TMD-6가 TMD-1보다 더 효과적인 제어성능을 보이고 있다. 그리고 연직 지진응답 제어에 있어서도 TMD-1보다 TMD-6이 보다

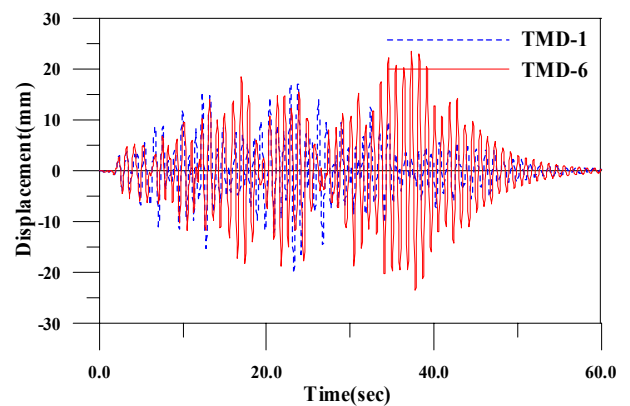
더 우수한 제어성능을 보이고 있다. 따라서 돌 구조물에 수평방향 지진하중이 가해질 경우에 경간의 1/4지점에 TMD를 설치하는 것이 지진응답 제어에 있어서 효과적이다.



(a) 절점 A의 수평변위-연직방향 지진-TMD 위치

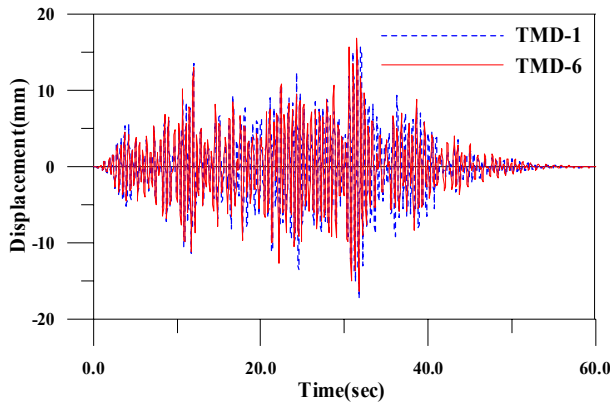


(b) 절점 B의 수평변위-연직방향 지진-TMD 위치



(c) 절점 A의 연직변위-연직방향 지진-TMD 위치





(d) 절점 B의 연직변위-연직방향 지진-TMD 위치  
<그림 11> TMD 제어성능-연직방향 지진

연직방향 지진하중이 가해지는 예제 구조물의 TMD 설치 위치에 따른 TMD의 지진응답 제어성능을 <그림 11>에 나타내었다. 절점 A의 수평 지진응답 제어에 있어서 TMD-6가 TMD-1보다 우수한 제어성능을 보이고 있으나 지진응답 자체가 매우 미비하다. 절점 B의 수평 지진응답 제어와 절점 A의 연직 지진응답 제어에 있어서는 TMD-1가 TMD-6보다 보다 효과적인 것을 볼 수 있다.

## 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 수평방향 지진하중에 가해지는 경우 수평 지진응답은 경간의 1/2지점과 경간의 1/4지점에서 크게 나타나고 있으며, 연직 응답은 경간의 1/4지점에서 크게 나타나고 있으나 경간의 1/2지점에서는 매우 미비하게 나타나고 있다.

- 돔 구조물에 연직방향 지진하중에 가해지는 경우 수평 지진응답은 경간의 1/2지점에서 매우 미비하게 나타나고 있으며, 연직응답은 경간의 1/2지점과 경간의 1/4지점에서 크게 나타나고 있으며 특히, 경간의 중앙에서 매우 크게 나타난다.

- 스타 돔 구조물은 수평방향 지진하중에 반응하는 역대칭 모드와 연직방향 지진하중에 반응하는 대칭모드에 의하여 지진응답이 지배적으로 나타나고 있다.

- 돔 구조물의 경우에 지진하중이 수평방향 또는 연직방향으로 가해질 수 있으므로 돔 구조물의 지진응답 제어를 위해서는 경간의 1/2지점과 경간의 1/4지점에 모두 설치하는 것이 효과적이나 선택적으로 설치를 해야 하는 경우에는 경간의 1/4지점에 설치하는 것이 지진응답 제어에 있어서 보다 효과적이다.

본 연구에서는 돔 구조물의 지진응답 분석을 위하여 돔 구조물의 기본적인 형상을 가지고 있는 스타 돔 구조물을 대상으로 수치해석을 수행하였다. 그러나 돔 구조물의 경우에 형태에 따라서 다양한 동적특성을 가지고 있으므로 돔 구조물의 형태별 지진응답 분석이 필요하다. 또한 본 연구에서는 지진하중에 대한 돔 구조물의 진동응답을 분석하였으나 돔 구조물의 사용성에 있어서는 풍하중이 지배적일 수 있으므로 풍하중에 의한 돔 구조물의 진동응답 분석이 요구된다. 또한 추후 연구에 있어서는 최근에 많은 연구가 수행되고 있는 스마트 제어장치에 대한 적용을 통한 돔 구조물의 진동응답 제어에 대한 연구를 수행하고자 한다.

## 감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2010-0012407)

## 참고문헌

1. 강주원, 김기철, 김현수 (2010), “준능동 TMD를 이용한 아치구조물의 지진응답제어”, 한국공간구조학회 논문집, 제10권, 1호, pp.103-110.
2. 김기철, 강주원 (2011), “공간구조물의 지진동제어를 위한 TMD의 최적설계”, 한국공간구조학회 논문집, 제11권, 2호, pp.81-88
3. Hassan A. Moghaddam (2000), Seismic Behavior of Space Structures, International Journal of Space Structure, Vol.15, No.2, pp.119-135.
4. Arjang Sadeghi (2004), Horizontal Earthquake Loading and Linear/ Nonlinear Seismic Behavior of Double Layer Barrel Vaults, International Journal of Space Structure, Vol.19, No.1, pp.21-37.
5. G.B. Warburton (1982), Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters, Earthquake Engrg. and Struct. Dyn., 10, pp.381-401.

(접 수 일 자 : 2011년 01월 18일)

(심사완료일자 : 2012년 03월 05일)

(게재확정일자 : 2012년 03월 09일)