

공간구조물의 지진동제어를 위한 TMD의 최적설계

Optimal Design of Passive TMD for Seismic Behavior Control of Spacial Structures

김기철*
Kim, Gee-Cheol

강주원**
Kang, Joo-Won

요약

구조물에 대한 진동제어 기술은 지금까지 일반 라멘구조물을 대상으로 하여 많은 연구가 이루어져 왔다. 공간구조물은 일반 라멘구조물과는 다른 동적응답특성을 가지고 있기 때문에 일반 라멘구조물을 대상을 개발된 진동제어 기술을 공간구조물에 적용시키기에는 불확실한 요소가 존재하게 된다. 본 논문은 대공간구조물 중에서 자중이 비교적 커서 지진응답이 크게 나타나는 트러스 형태의 아치 구조물을 대상으로 하여 수동형 TMD 설치 위치 및 질량비에 따른 제어성능을 분석하였다. 예제 아치구조물의 TMD설치 위치에 따른 진동응답 분석결과, 모드벡터가 가장 큰 위치에 TMD를 설치하는 것이 가장 제어성능이 우수한 것으로 나타났다. 또한 TMD의 질량비 변화에 따른 진동응답 분석결과, 질량비가 약 2%인 경우에 가장 효율적인 것을 확인 할 수 있었다

Abstract

The studies of seismic response control are mainly conducted on rahmen structure until now. Spatial structures have the different dynamic characteristics from general rahmen structures. So, the results of these studies are very limited for vibration control and seismic design of spatial structures. TMD(Tuned Mass Damper) is one of the vibration control device that is mainly used to reduce the vibration level of high-rised building, bridge or stadium structure. In this study, an arch structure was used as an example structure because it has primary characteristics of spatial structures and the seismic behaviour of spatial structures may fundamentally differ from the conventional building structures. So, the vibration control performance is evaluated according to the change of TMD mass and TMD location. It is reasonable to install TMD at the quarter point that is dominant mode vector of 1st mode. And it is appropriate that TMD mass ratio is 2% in the seismic response control of arch structure.

키워드 : 지진동제어, 공간구조물, 제어성능, 동조질량감쇠기, TMD 질량비

Keywords : Seismic Response Control, Spatial Structure, Control Performance, Tuned Mass Damper, Mass ratio

1. 서론

대공간 구조물은 2002년 월드컵 경기장 건설 이후, 그 수요가 많아지고 있으며 대규모는 아니지만 대공간 구조물의 형식을 갖는 건축물도 많이 늘어나고 있는 추세이다. 체육관, 강당, 홀 등과 같은 대공

간 구조물은 그 본연의 목적에 맞게 건설 이용되고 있으며 대규모의 인원을 수용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 따라서 이러한 대공간 구조물은 재난시 피난 거점으로서도 이용될 수 있으므로 안전성 확보가 무엇보다 중요하다. 특히 최근에 고층화, 대형화되고 있는 건축시장의 동향을 분석해 볼 때, 대공간 구조물의 안전성 확보 및 적합한 설계와 시공을 위한 대공간 구조물의 동적특성에 대한 연구가 필요할 것이다.

* 서일대학 건축과 부교수, 공학박사

** 교신저자, 영남대학교 건축학부 부교수, 공학박사

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

E-mail : kangj@ynu.ac.kr

대공간 구조물의 지진 및 바람에 의한 거동은 그 구조적인 특수성으로 인하여 일반 건축물과는 상이한 거동특성을 보이고 있다. 특히, 공간구조물은 일반 라멘구조와는 달리 수평지진동에 의해서 수평진동은 물론 상하진동도 발생하게 된다. 또한 경간이 길어지면 진동의 고유주기가 길어지고, 공간구조물의 상하진동주기가 지진동의 탁월 고유주기대에 일치하게 되어 큰 상하진동이 발생할 가능성이 높게 된다.^{1),2)}

이렇게 공간구조물은 일반 라멘구조물과는 다른 동적응답특성을 가지고 있기 때문에 일반 라멘구조물에 많이 편중되어 있는 현재의 진동제어기술의 연구결과로서는 공간구조물에 적용시키기에는 불확실한 요소가 존재하게 된다. 따라서 공간구조물의 진동제어에 관한 연구는 기존의 제진 및 내진구조시스템의 적용의 한계를 극복하여 공간구조물의 안전성 향상과 보다 효율적인 구조시스템의 개발을 가져올 수 있게 된다.

동조질량감쇠기(TMD, Tuned Mass Damper)는 대표적인 제진장치로 주로 고층건물, 교량 및 스타디움 등의 진동제어에 이용되고 있다. TMD는 질량스프링-댐퍼로 구성된 제진장치로 구조물에 설치된 부가질량의 관성력이 외부하중에 의한 진동에너지를 흡수함으로써 진동을 제어하는 시스템이다. 외부 에너지를 흡수할 수 있도록 강성과 질량이 조절된 부가질량(Tuned Mass)이 마치 구조물에 감쇠기를 설치한 것과 동일한 효과를 나타낸다는 의미에서 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper)란 명칭이 사용된다.

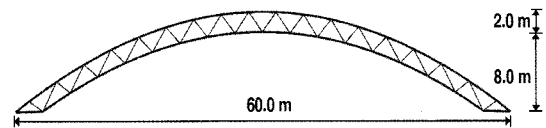
따라서 본 논문은 대공간구조물 중에서 자중이 비교적 커서 지진응답이 크게 나타나는 트러스 형태의 아치 구조물을 대상으로 하여 수동형 TMD의 설치 위치 및 질량비에 따른 제어성능을 분석하고자 한다.

2. 예제 구조물의 동적특성

2.1 예제 구조물의 제원 및 입력 지진데이터

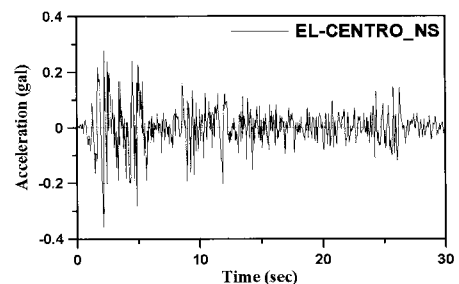
아치 구조물의 경우에 대공간구조물의 기본적인 동적거동을 내재하고 있으므로 본 연구에서는 아치

구조물을 예제 구조물로 선정하였다. 예제 트러스 아치의 경간은 60.0m, 높이는 10.0m로서 리즈-스팬비(Rise-span ratio)가 0.16에 해당된다. 트러스 아치의 모든 부재는 SWS 490의 원형 강관을 사용 하였으며 상현재와 하현재는 $\varnothing 216.3 \times 4.5$ 이며 사재는 $\varnothing 101.6 \times 3.2$ 으로 되어 있다. 예제구조물 및 TMD의 모델링 및 해석은 상용구조해석 프로그램인 MIDAS Gen/w 7.8.5를 사용하였다.

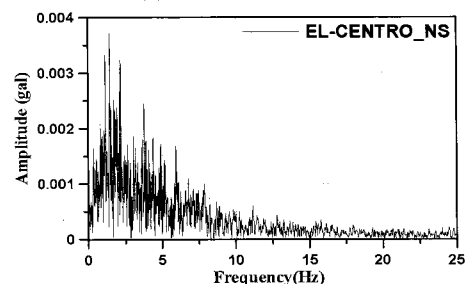


〈그림 1〉 트러스 아치 예제구조물

본 논문에서의 해석모델에 입력된 지진동은 공간 구조물의 지진거동 분석에 많이 사용되는 El-Centro-NS를 적용하였다. 〈그림 2〉은 PGA 0.3569gal인 El-Centro-NS파의 가속도 시간이력과 가속도 스펙트럼 그래프이다. 또한 El-Centro-NS파의 지속시간은 53.72초 이지만 30초 이후의 지진에너지는 미비함으로 본 논문에서는 30초까지의 지진데이터만을 사용하였다.



(a) 가속도 시간이력

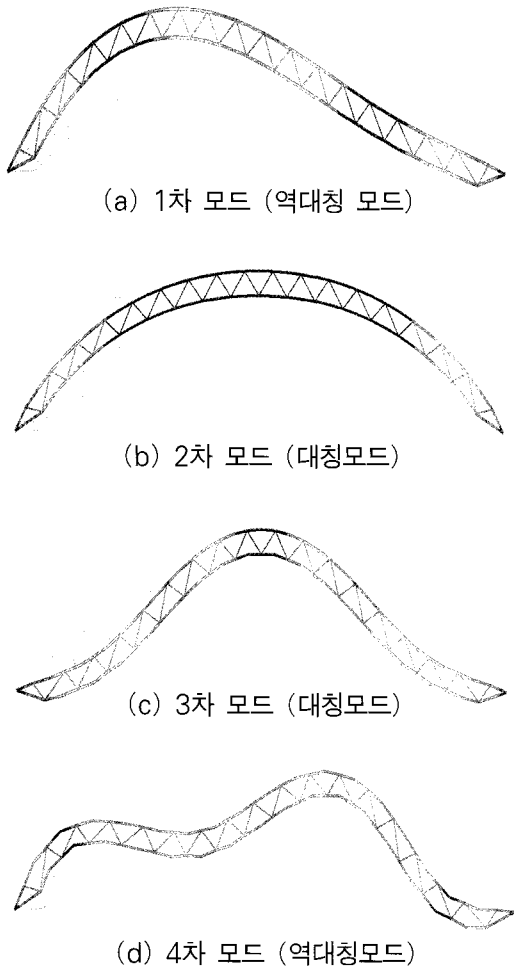


(b) 가속도 응답 스펙트럼

〈그림 2〉 El-Centro-NS

2.2 예제 구조물의 동적특성

예제 구조물의 동적특성은 일반적인 아치구조물의 동적특성을 보이고 있다. 아치구조물의 동적특성은 구조물의 형상을 결정하는 개각(open angle)과 걸보기 세장비 등에 의하여 좌우된다. <그림 3>에는 예제구조물의 고유모드 형상을 나타내고 있다. 예제 구조물의 진동모드 양상은 <그림 3(a), (d)>와 같이 역대칭 모드 그리고 <그림 3(c), (d)>와 같이 대칭 모드로 나타난다. 대칭 모드는 주로 수직방향 지진 하중에 반응하여 구조물이 상하로 진동하는 지진 응답에 기여하고, 역대칭 모드는 주로 수평방향 지진 하중에 대하여 응답이 크게 발생할 것으로 예상할 수 있다.



<그림 3> 예제구조물의 고유모드

아래 <표 1>은 예제 구조물의 모드별 진동수를 나타낸 것이다. 저차모드 진동수가 지진하중의 에너지가 집중되어 있는 진동수 영역인 5Hz까지의 영역에 존재하는 것을 볼 수 있다. 따라서 예제 구조물의 저차모드에서의 큰 지진응답을 예상할 수 있다.

<표 1> 모드별 진동수 및 주기

Mode NO.	진동수 (Hz)
1	1.7609
2	3.2613
3	3.8263
4	6.0911

예제 구조물의 지진응답의 분석은 지진응답이 가장 크게 나타날 것으로 예상하는 1/4지점과 1/2지점의 지진응답에 대하여 분석하고자 한다. 또한, 아래 <표 2>에서 예제 구조물의 2/8지점에서의 모드벡터에서처럼 DX방향보다 DZ방향으로의 모드벡터가 더 우세한 것을 살펴 볼 수 있으며, 예제구조물에서 전반적으로 이와 같은 양상이 모두 나타난다. 따라서 예제구조물에 수직응답이 지배적이라는 것을 예상할 수 있으며 DZ방향의 지진동제어가 보다 합리적인 알 수 있다.^{4),5)}

<표 2> 2/8지점에서의 모드벡터 (절대값)

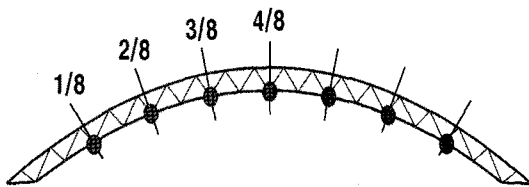
Mode NO.	DX	DZ
1	0.0911	0.1882
2	0.0257	0.1758
3	0.0701	0.0467
4	0.008	0.0824

3. TMD를 적용한 예제 구조물

3.1 예제 구조물의 TMD 적용

예제구조물의 지진동제어를 위한 TMD의 질량과 진동수비는 기존의 연구를 바탕으로 설계하였다.

TMD의 질량이 예제 구조물 총질량의 1%인 경우는 예제 구조물 총질량인 41.42 kgf/g의 1%인 0.4142 kgf/g으로 결정하였다. 또한, 예제구조물의 진동수에 대한 TMD의 진동수의 진동수 비는 0.9871로 하여 TMD의 진동수를 1.7383 Hz로 설계하였다.³⁾ TMD의 질량비 변화 역시 상기와 같은 방법을 고려하였다. 또한, <표 2>를 통해 살펴본 것처럼 본 예제 구조물에서 수직방향의 응답이 지배적이라는 것에 의해서 TMD의 거동을 수직방향으로만 고려하였다.^{1),2),3)} 또한, 수동 TMD의 효과적인 설치위치를 결정하기 위해서 아래 <그림 4>와 같이 예제 구조물을 8등분으로 분할하였으며, 각 위치에 대해서 <그림 4>와 같이 TMD를 설치하였다. 그리고 TMD 설치 위치별 예제 구조물을 <표 3>과 같이 명명하였다.



<그림 4> TMD 설치를 위한 예제구조물의 분할

<표 3> TMD설치 위치별 예제 구조물

	TMD 설치위치
Model_0	TMD가 없는 예제 구조물
Model_1	1/8_TMD
Model_2	2/8_TMD
Model_3	3/8_TMD
Model_4	4/8_TMD

예제 구조물의 4/8 지점을 중심으로 하여 좌우로 1/8(Model_1), 2/8(Model_2), 3/8(Model_3)지점에 각각 TMD 1개씩을 설치하였다. TMD의 총질량을 동일하게 하도록하여 TMD 2개를 적용(Model_1~Model_3)한 경우의 TMD 질량은 TMD 1개를 적용(Model_4)한 경우의 TMD질량에 대하여 1/2로 하였다.

3.2 TMD적용에 따른 예제 구조물의 동적특성

TMD 설치에 의하여 예제 구조물의 동적특성에 변화가 생기게 된다. 2/8지점에 TMD를 설치한 Model_2의 경우, 1차모드(1.6464Hz), 2차모드(1.7326Hz), 3차모드 (1.8581Hz)는 TMD에 의하여 야기되는 모드이다. 4차모드(3.2696Hz)에서 Model_0의 2차모드(3.2613Hz)가 나타나게 된다. 이와 같은 현상은 Model_2의 진동모드 양상인 <그림 5>에서도 확인할 수 있다. 1차모드, 2차모드, 3차모드는 TMD 거동에 대한 모드형상이며 4차모드에서 상하 지진동에 반응하는 대칭모드가 나타난다. 이러한 동적특성은 다른 예제 Model들에서도 나타난다.



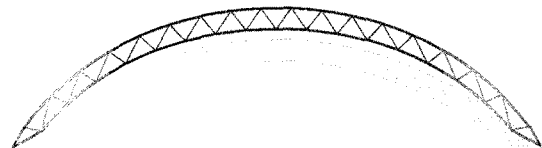
(a) 1차 모드 (1.6464Hz)



(b) 2차 모드 (1.7326Hz)



(c) 3차 모드 (1.8581Hz)



(d) 4차 모드 (3.2696Hz)

<그림 5> Model_2의 진동모드

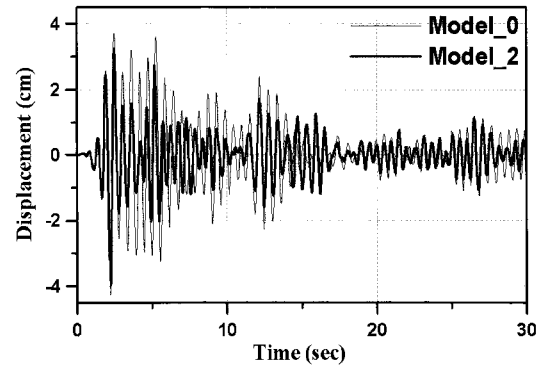
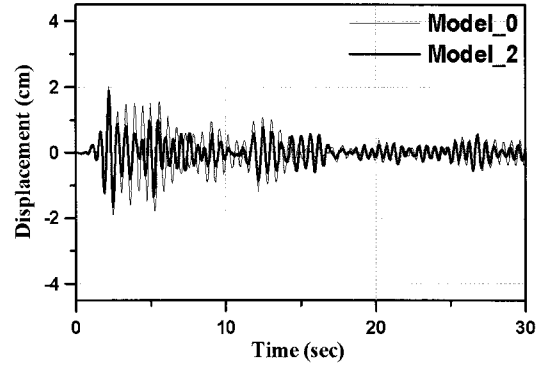
4. 예제 구조물의 지진응답

4.1 TMD 설치위치에 따른 지진응답

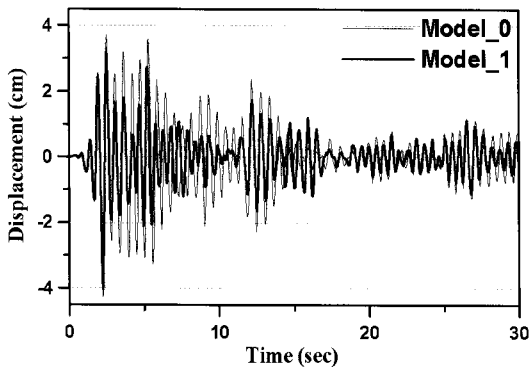
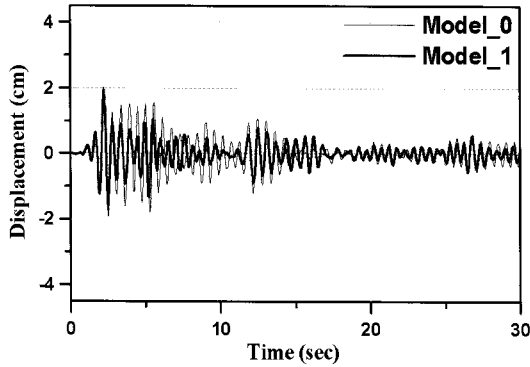
예제구조물의 지진응답은 앞서 모드형상에 대한 분석에서 정점부분인 4/8지점과 모드벡터의 변화가 가장 심한 2/8지점 변위응답을 비교 분석하였다.

〈그림 6〉과 〈그림 7〉은 기본 예제구조물인 Model_0에 대해 1/8지점에 TMD를 설치한 Model_1 과 2/8지점에 TMD를 설치한 Model_2의 2/8지점의 수평, 수직방향 변위응답을 각각 비교한 시간이력그래프이다.

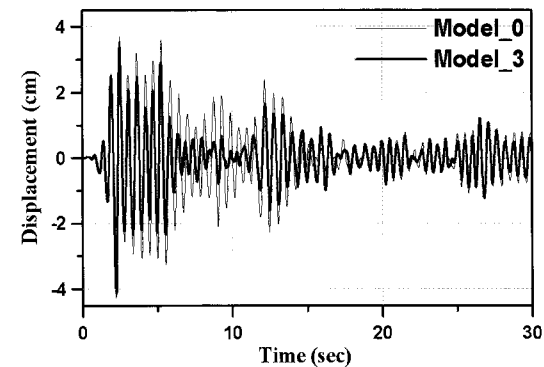
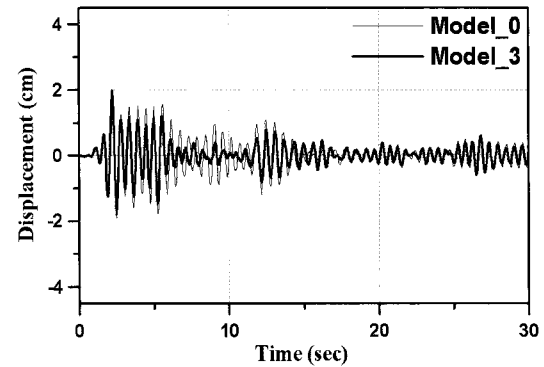
〈그림 8〉과 〈그림 9〉는 3/8지점에 TMD를 설치한 Model_3와 4/8지점에 TMD를 설치한 Model_4의 2/8지점의 수평, 수직방향 변위응답을 각각 비교한 시간이력그래프이다.



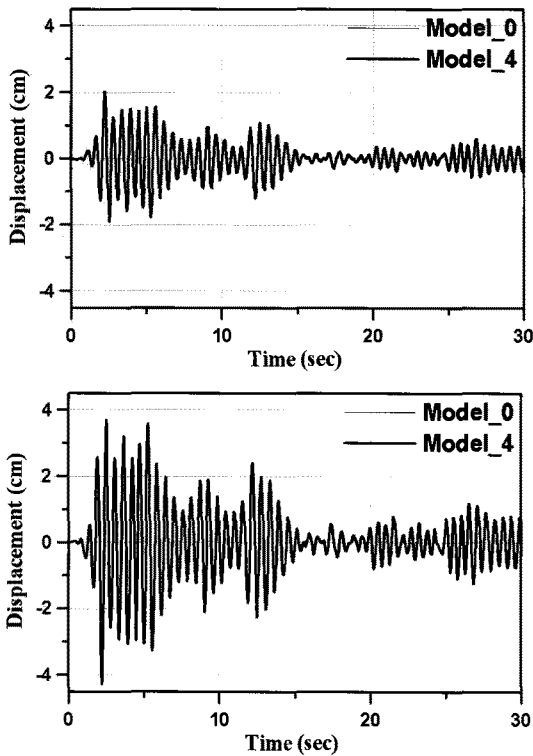
〈그림 7〉 2/8지점 수평 및 수직 변위응답 (Model_0 및 Model_2)



〈그림 6〉 2/8지점 수평 및 수직 변위응답 (Model_0 및 Model_1)



〈그림 8〉 2/8지점 수평 및 수직 변위응답 (Model_0 및 Model_3)



〈그림 9〉 2/8지점 수평 및 수직 변위응답 (Model_0 및 Model_4)

E1-Centro 지진파의 지진에너지가 집중된 시간영역에서 수평 및 수직방향 변위응답 저감이 두드러짐을 알 수 있다. 특히, TMD를 2/8지점에 설치한 Model_2의 지진응답 제어 효과가 가장 우수한 것을 볼 수 있다.

〈표 5〉 각 Model의 최대 변위응답

			Model_0	Model_1	Model_2	Model_3	Model_4
4/8 지점	수평	응답 (cm)	1.8102	1.7203	1.7005	1.7646	1.8000
		제어율	0.00%	4.97%	6.06%	2.52%	0.56%
2/8 지점	수평	응답 (cm)	2.0268	1.9232	1.9019	1.9760	2.0261
		제어율	0.00%	5.72%	6.90%	2.81%	0.04%
	수직	응답 (cm)	4.2642	4.0325	3.9841	4.1494	4.2615
		제어율	0.00%	12.80%	15.47%	6.34%	0.15%

* 제어율 (%) : WO-TMD를 기준으로 함

〈표 5〉은 각 Model의 4/8지점 및 2/8지점에서의 수평, 수직방향의 최대 변위응답을 나타낸 것이다.

각 Model의 최대 변위응답을 비교해 보면, 좌우 2/8 지점에 TMD(Model_2)를 설치하는 것이 가장 지진동 제어에 효과적인 것을 알 수 있다. 1차 모드 형상에서 모드벡터가 가장 큰 지점인 1/8지점에 직접적으로 TMD를 설치하는 것이 효과적이며, 예제 구조물의 4/8지점은 수직방향의 모드벡터가 영(zero)이므로 TMD의 설치유무에 관계없이 응답이 거의 나타나지 않는다. 또한 〈표 6〉의 변위응답의 RMS 값에서 있어서도 유사한 양상이 나타나는 것을 알 수 있다.

〈표 6〉 각 Model의 RMS 변위응답

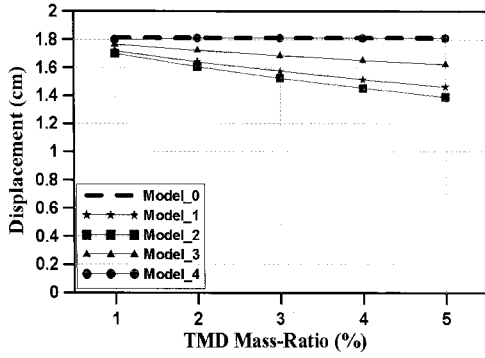
			Model_0	Model_1	Model_2	Model_3	Model_4
4/8 지점	수평	응답 (cm)	0.4605	0.3225	0.3163	0.3482	0.4604
		제어율	0.00%	29.97%	31.31%	24.39%	0.02%
2/8 지점	수평	응답 (cm)	0.5175	0.3614	0.3549	0.3919	0.5174
		제어율	0.00%	33.90%	35.31%	27.27%	0.02%
	수직	응답 (cm)	1.0674	0.7431	0.7279	0.8056	1.0674
		제어율	0.00%	70.42%	73.72%	56.85%	0.00%

* 제어율 (%) : WO-TMD를 기준으로 함

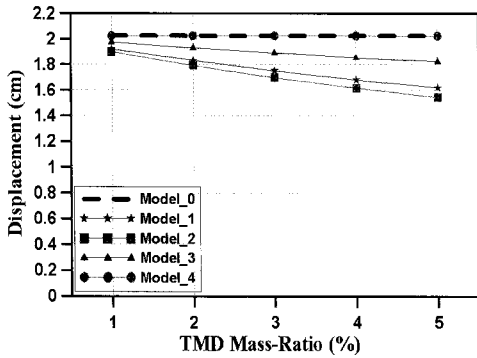
4.2 TMD의 질량변화에 따른 지진응답

각 Model별 TMD 질량 변화에 따른 지진응답 제어 효과를 비교분석하였다. 예제구조물에 대한 TMD의 질량을 고려하여, 1%에서 5%까지 변화시켜서 분석하였다.

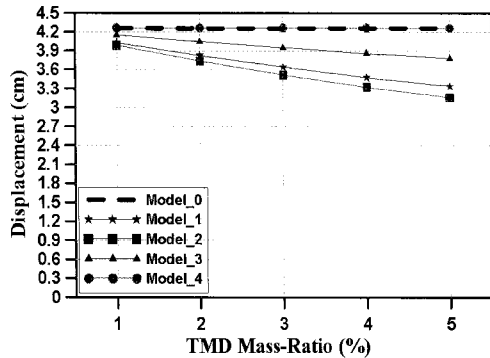
〈그림 10〉는 각 Model의 TMD 질량에 따른 4/8지점에서의 수평방향의 최대 변위응답을 비교한 그래프이다. 앞서 살펴본 것과 같이 4/8지점에서의 수직방향의 응답은 거의 나타나지 않으므로 고려하지 않았다. 전반적으로 볼 때, TMD의 질량이 증가함에 따라 최대 변위응답이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 각 Model의 2/8지점에서의 수평 및 수직방향 최대 변위응답을 나타낸 〈그림 11〉와 〈그림 12〉에서도 동일하게 나타난다.



〈그림 10〉 4/8지점 수평방향 최대 변위응답



〈그림 11〉 2/8지점 수평방향 최대 변위응답

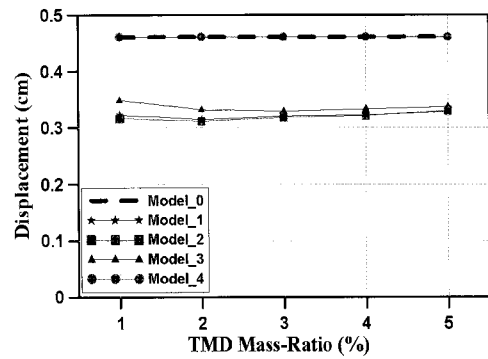


〈그림 12〉 2/8지점 수직방향 최대 변위응답

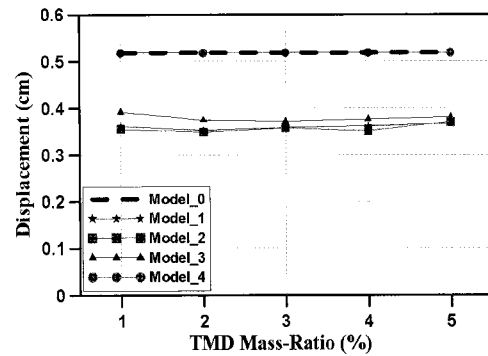
〈그림 13〉은 각 Model의 4/8지점에서의 수평방향 RMS 변위응답 그래프이다. 4/8지점에 TMD를 설치한 Model_4의 경우에는 TMD의 질량 변화에 대해서도 응답제어 효과의 변화가 없는 것을 알 수 있다. 즉, 아치구조물의 중앙부에 TMD를 설치하는 것은 질량비에 무관하게 응답제어 효과가 없다는 것을 알 수 있다. 또한, Model_1, Model_2와 Model_3의 경우 모두 1%, 2%까지는 질량 증가에 따라 변위응답의 RMS값이 감소하지만, 3%부터 질량이 증가함에

따라서 변위응답제어 효과는 오히려 줄어드는 것을 살펴볼 수 있다. 이는 〈그림 14〉와 〈그림 15〉의 각 Model의 2/8지점 변위응답의 RMS값에서도 동일하게 나타난다.

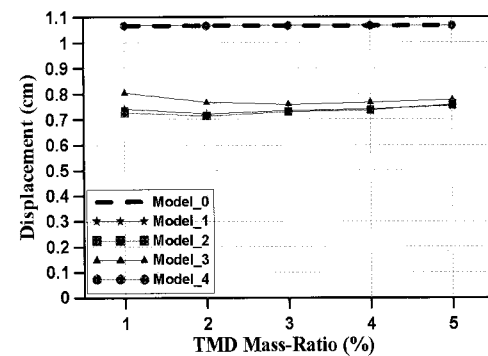
이러한 현상은 TMD질량의 증가로 인한 예제 구조물 전체에 발생하는 정적 변위증가에 따른 현상임을 알 수 있다. 즉 일정 이상의 TMD질량 증가에 따른 정적변위 증가는 구조물 전체의 동적 변위응답에도 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다.



〈그림 13〉 4/8지점 수평방향 변위응답의 RMS



〈그림 14〉 2/8지점 수평방향 변위응답의 RMS



〈그림 15〉 2/8지점 수직방향 변위응답의 RMS

5. 결 론

본 논문은 대공간구조물 중에서 자중이 비교적 커서 지진응답이 크게 나타나는 트러스 형태의 아치 구조물을 대상으로 하여 수동형 TMD 설치 위치 및 질량비에 따른 제어성능을 분석하였다.

예제 구조물의 위치별 TMD설치에 따른 최대 변위 응답과 변위응답의 RMS값을 비교한 결과 2/8지점에 TMD를 설치한 Model_2의 경우가 변위응답 제어에 가장 효과적인 것을 알 수 있었다. 따라서 모드벡터가 크게 나타는 2/8지점에 TMD를 직접적으로 설치하는 것이 가장 유리하며, 모드벡터가 거의 나타나지 않는 4/8지점에 TMD를 설치하는 것은 효과가 거의 없는 것으로 판단된다.

또한, 각 Model의 TMD 질량 변화에 따른 변위응답을 비교해본 결과 예제 구조물의 정점(4/8지점)에 TMD를 설치한 Model_4의 경우에는 TMD의 질량변화에 무관하게 그 응답효과가 없음을 알 수 있었다. 또한, 이 외의 Model에 대해서는 모두 예제구조물에 대해 TMD질량을 2%까지 증가할 경우에만 변위응답 제어 효과가 나타나는 것을 알 수 있었다. 즉, 일정 이상의 TMD질량 증가는 구조물의 변위응답 제어 효과가 없음을 알 수 있었다.

본 논문의 결과를 통하여 TMD의 설치위치에 대해 고려할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 결과를 바탕으로 하여 모드벡터가 가장 큰 값을 중심으로 하여 각 위치별 TMD의 조합을 통한 경우의 변위응답제어에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 서일대학 학술연구비에 의하여 수행되었습니다.

- 참고문헌 -

1. John C. "Space Grid Structure" , Architectural Press, 1999
2. Architectural Institute of Japan, "Dynamic Behavior and Seismic Design of Spatial Structure" , Maruzen, 2006
3. Fahim Sadek, A Method of Estimating the Parameters of Tuned Mass Dampers for Seismic Applications, National Institute of Standards and Technology, 1996
4. 김기철, 김광일, 강주원, 면진 트러스-아치 구조물의 지진거동분석, 한국공간구조학회지, 제8권, 2호, pp.73-84, 2008
5. 강주원, 김기철, 수동 TMD의 적용을 통한 아치 구조물의 지진응답 제어, 대한건축학회논문집, 제26권, 7호, pp.37-44, 2010
6. 강주원, 김기철, 김현수, 준능동 TMD를 이용한 아치구조물의 지진응답제어, 한국공간구조학회지, 제10권, 1호, pp.103-110, 2010

(접 수 일 자 : 2011년 1월 2일)

(심사 완료일자 : 2011년 3월 11일)

(게재 확정일자 : 2011년 5월 27일)