ISSN 1598-4095 (Print)
ISSN 2287-7401 (Online)
http://dx.doi.org/10.9712/KASS.2018.18.2.43

Journal of Korean Association for Spatial Structures
Vol. 18, No. 2 (통권 72호), pp.43~50, June, 2018

개폐식 대공간 구조물의 효율적인 지진응답제어를 위한 TMD의 최적 설치 위치 분석

Investigation Into Optimal Installation Position of TMD for Efficient Seismic Response Reduction of Retractable-Roof Spatial Structure

이 영 락* 김 현 수** 강 주 원***
Lee, Young-Rak Kim, Hyun-Su Kang, Joo-Won

Abstract

In this study, TMD(Tuned Mass Damper) is installed in a retractable-roof spatial structure in order to investigate dynamic response characteristics according to mass ratio and installed position of TMD on large spatial structures. The example analytical model is generated based on the Singapore sports hub stadium. Twenty eight analytical models are used to investigate optimal installation position of TMD for the example retractable-roof spatial structure using 4 to 16 TMDs. The mass of one TMD is set up 1% of total mass at the example analytical model. Displacement response ratio of model with TMD is compared with that of base model without TMD. It has been found from numerical simulation that it is more effective to install TMD at the edge of the spatial structure rather than to concentrate the TMD at the center of the spatial structure.

Keywords : Large spatial structure, TMD(Tuned Mass Damper), Installed position, Dynamic response, Displacement ratio, Retractable roof

1. 서론

올해는 국내외적으로 평창 동계 올림픽, 러시아 월드컵, 자카르타 아시안게임 등의 각종 국제적인 행사가 개최될 예정이다. 이처럼 전 세계적으로 대규모 행사를 유치하기 위해 스포츠 경기장 및 다목적 체육 시설에 대한 수요가 증가하고 있는 실정이다. 이러한 대공간 구조물은 특성상 많은 인원을 수용하게 되므로 지진으로 인한 피해 발생시 큰 인명피해를 유발할 것으로 예상된다[1]. 따라서 보다 체계적인 내진 설계에 대한 지침과 구조 안전과 관련된 기술이 마련되어야 한다. 또한 지진 하중에 의해서 대공간 구조물이 붕괴하지 않더라도 과도한 진동이 발생하게 되면 대공간 구조물 지붕에 설치된 각종 장비 및 시설물 등이 낙하하여 인명 피해가 발생할 가능성이 높아진다. 따라서 지진 하중에 대한 대공간 구조물의 동적 응답을 줄이는 것은 구조 설계 과정에서 매우 중요한 일이다[2].

지진 하중에 대해서 대공간 구조물의 피해를 줄이기 위한 다양한 방법들이 연구되어 왔고, 그 중 원리의 단순성 및 제어 성능의 우수성으로 인해 가장 널리 사용되고 있는 진동 제어 장치 중의 하나로 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper; TMD)가 있다. TMD는 제어하고자 하는 구조물의 고유진동주기에 맞추어 적절하게 조율이 되었을 때에는 매우 뛰어난 동적 응답 제어 성능을 나타내는 것으로 알려져 있다. 대공간 구조물의 지진 응답 제어에 있어서도 TMD를 적용한 연구가 수행되었으며 우수한 제어성능을 나타내는 것으로 보고되고 있다[3),4)].

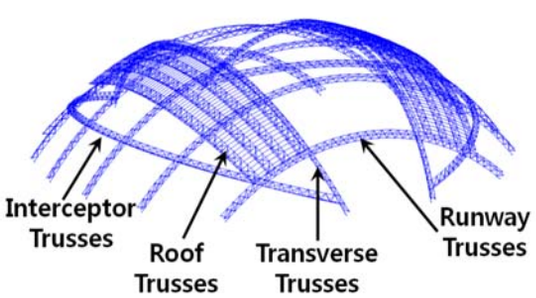
구조물의 동적 응답을 제어하기 위해서 TMD를 설치할 때 설치 위치를 선정하는 것은 동적 응답 제

* 학생회원, 영남대학교 일반대학원 건축학과, 박사과정
Department of Architecture, Yeungnam University
** 정회원, 선문대학교 건축사회환경공학부 부교수, 공학박사
Div. of Architecture, Architectural & Civil Engrg., 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

어시 고려해야 할 가장 중요한 요소이다. TMD의 설치 위치는 동적 하중에 의한 진폭이 가장 큰 위치를 선택하는 것이 일반적이다[5]. 또한 대공간 구조물에 설치한 TMD의 질량이 동적 하중에 대해서 지진 응답을 효과적으로 저감시키는지에 대한 연구의 필요성도 제기되고 있다. 그러므로 본 연구에서는 해석 모델로 설정한 개폐식 대공간 구조물에 TMD를 설치하여 지진 하중에 대한 진동 응답을 분석하였고, 해석 모델에 설치된 TMD의 질량을 전체 구조물의 1%로 설정하여 개수에 대한 변화와 트러스 부재에 설치될 위치에 따른 변위 응답을 검토하였다.

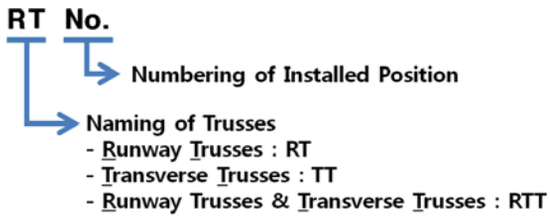
2. 해석 모델의 개요

본 연구에서 사용한 개폐식 대공간 구조물 해석 모델은 Singapore Sports Hub 경기장을 단순화한 모델이며, 실제 설계 구조물과는 달리 지붕 구조물에 설치되는 TMD의 개수 및 설치 위치 변화에 따른 변위 응답 특성을 검토하기 위한 목적으로 <Fig. 1>과 같이 모델링하였다. 각 트러스 부재는 <Fig. 1>에 나타낸 바와 같이 Runway trusses, Transverse trusses, Interceptor trusses, Roof trusses의 네 종류의 트러스로 구성되어 있다.



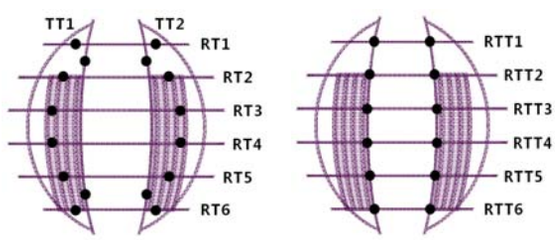
〈Fig. 1〉 Analysis model & Types of trusses

해석 모델의 TMD는 횡 방향의 Runway trusses (RT)와 종 방향의 Transverse trusses (TT)에 설치하며, TMD가 설치된 트러스의 명칭 표기는 <Fig. 2>와 같다.

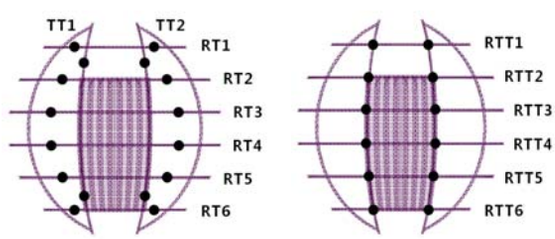


〈Fig. 2〉 Naming of trusses

2차원 트러스 아치 구조물을 이용한 선행 연구에서 경간의 1/4지점에 TMD를 설치하는 것이 가장 효과적인 것으로 나타났으므로 <Fig. 3>과 같이 3차원 해석 모델에서 Runway trusses와 Transverse trusses의 1/4지점에 TMD를 설치할 계획을 하였다. 추가적으로 Runway trusses와 Transverse trusses의 교차점에도 TMD를 설치하여 응답을 분석하고자 한다.



(a) Open roof



(b) Closed roof

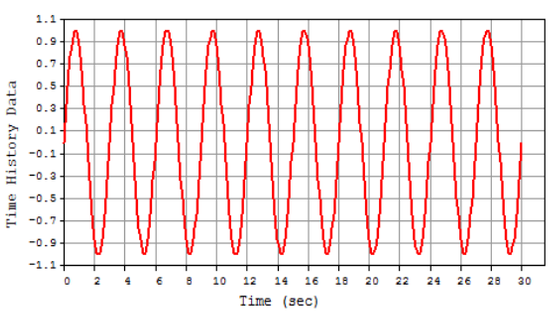
〈Fig. 3〉 Plot planning of TMD

※ ● : Installed position of TMD

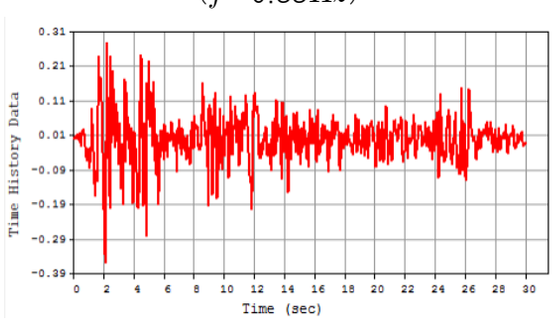
해석 모델의 1차 모드 진동수는 0.3335Hz, X 방향의 1차 모드 주기는 2.9987sec, 전체 구조물의 질량은 3883.5kN/g이며, 해석 모델에 설치될 TMD 1개의 질량은 전체 구조물 질량의 1%로 하여 38.8kN/g로 설정하였다. 일반적인 수동 TMD의 최적 감쇠비 및 진동수비에 대한 연구는 기존에 많이 수행되어 왔다[6]. 본 연구에서는 질량비가 1%일

때 TMD의 최적 감쇠비는 4.98%, 해석 모델과 TMD의 최적 진동수비는 98.76%로 계산되었다. 계산된 진동수비를 이용하면 TMD의 최적 진동수는 0.3294Hz로 계산되며, 이 값을 나타내도록 TMD의 강성을 결정하였다. 선행 연구를 토대로 개폐식 대공간 구조물에 TMD가 설치될 경우에는 감소된 강성으로 인하여 더 큰 지진 응답이 발생할 것으로 예측되는 지붕이 열린 상태의 해석 모델을 대상으로 TMD를 조율하였다[7].

<Fig. 4>는 지진 응답 제어 성능을 검토하기 위해서 해석 모델의 진동대역에 있는 0.33Hz의 공진조화 하중과 역사지진파인 El centro(1940) 지진 하중을 사용하였다.



(a) Resonance harmonic loads ($f=0.33Hz$)



(b) Earthquake wave(El Centro)

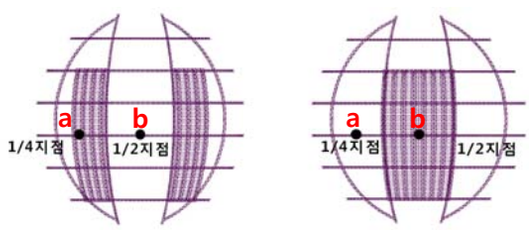
〈Fig. 4〉 Earthquake wave

그리고 해석 모델의 변위 응답 비교 위치를 선정하기 위하여 각 트러스 위치에 따른 1/4지점의 수직 방향 변위 응답을 <Table 1>에 나타내었다. 그 결과 열린 상태와 닫힌 상태 모두 RT 4에서 가장 큰 변위 응답을 나타냈다. 그러므로 <Fig. 5>와 같이 RT 4에서 1/4지점은 'a' 로, 1/2지점을 'b' 로 표기하였다. 'a' 지점에서는 수직 방향 및 수평 방향 응답을 비교하였고, 'b' 지점에서의 수직 방향 응답은 거의 발생하지 않으므로 수평 방향 응답만을 비교하였다.

〈Table 1〉 Displacement of vertical direction on 1/4 point according to trusses

(Unit : m)

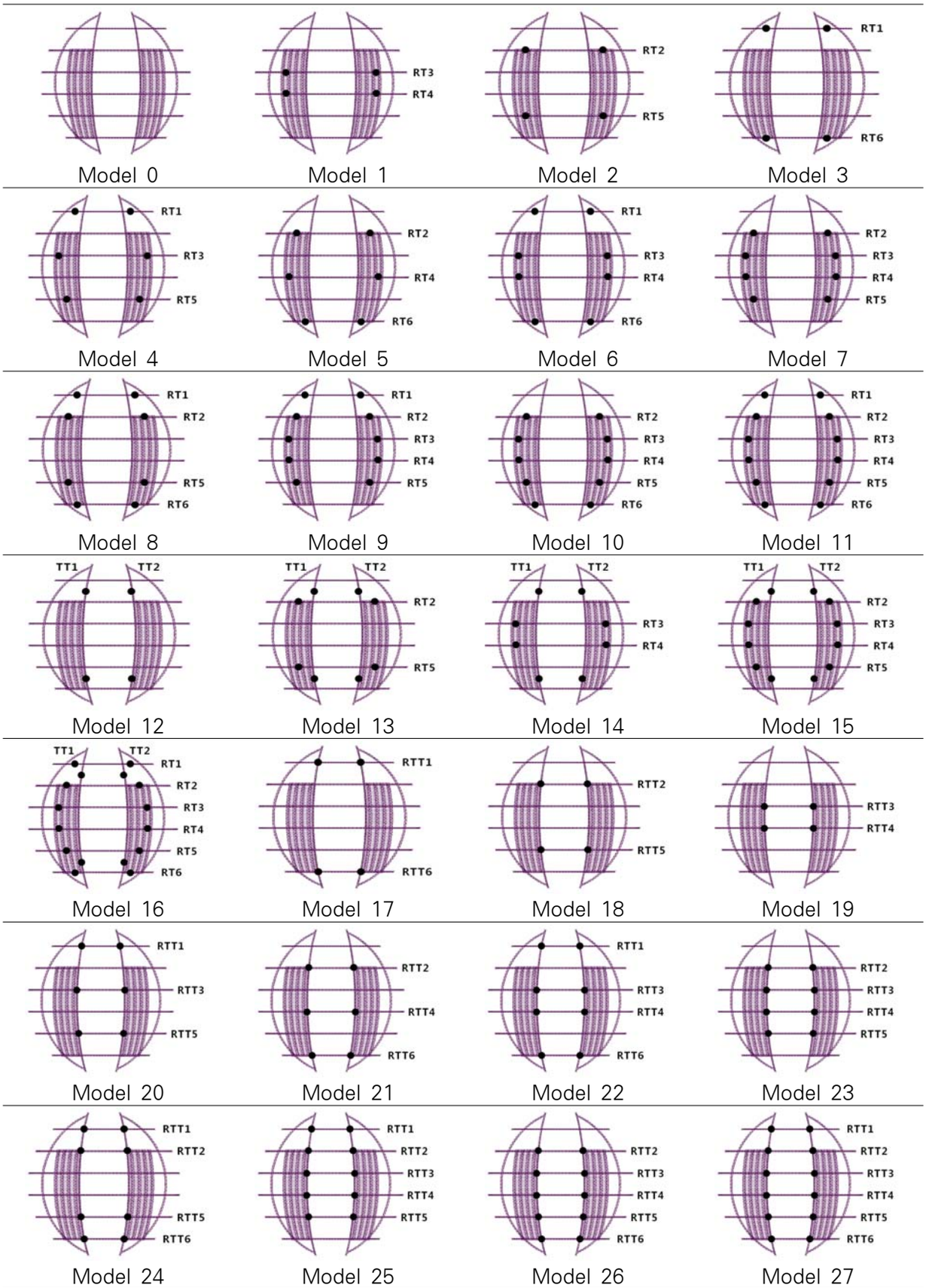
	Open roof	Closed roof
RT1	0.054	0.085
RT2	0.173	0.166
RT3	0.187	0.228
RT4	**0.191**	**0.239**
RT5	0.150	0.219
RT6	0.064	0.071
TT1	0.083	0.087
TT2	0.099	0.103



(a) Open roof (b) Closed roof

〈Fig. 5〉 Analysis position of displacement response

TMD의 설치 위치 및 개수를 변화시켜 TMD가 설치되지 않은 Model 0부터 Model 27까지 계획하였다. 해석 모델에서 TMD 설치 위치는 Model 1에서 Model 11은 Runway truss에 설치, Model 12는 Transverse truss에 설치, Model 13에서 Model 16은 Runway truss와 Transverse truss에 함께 설치되었다. Model 17에서 Model 27은 해석 모델에서 변위 응답 가장 크게 나타나는 1/4지점은 아니지만, Runway truss와 Transverse truss의 교차점에도 TMD를 설치하여 동적 응답 저감 효과를 나타내는지에 대한 분석을 실시하였다. <Fig. 6>은 열린 상태의 해석 모델에 TMD를 설치한 것이며, 닫힌 상태의 해석 모델에도 동일한 위치에 TMD를 설치하였다.



〈Fig. 6〉 Analysis model (Open roof)

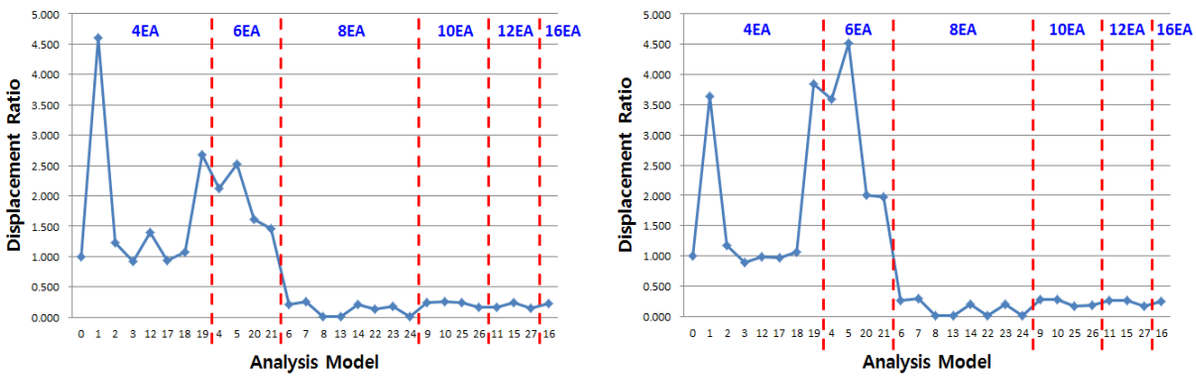
3. 변위 응답 분석

3.1 TMD 설치 개수 변화에 따른 응답 분석

본 논문에서는 해석 모델에 설치된 동일한 질량비를 가진 TMD의 개수 변화에 따른 응답과 TMD가 설치되는 위치 변화에 따른 응답을 분석하였다.

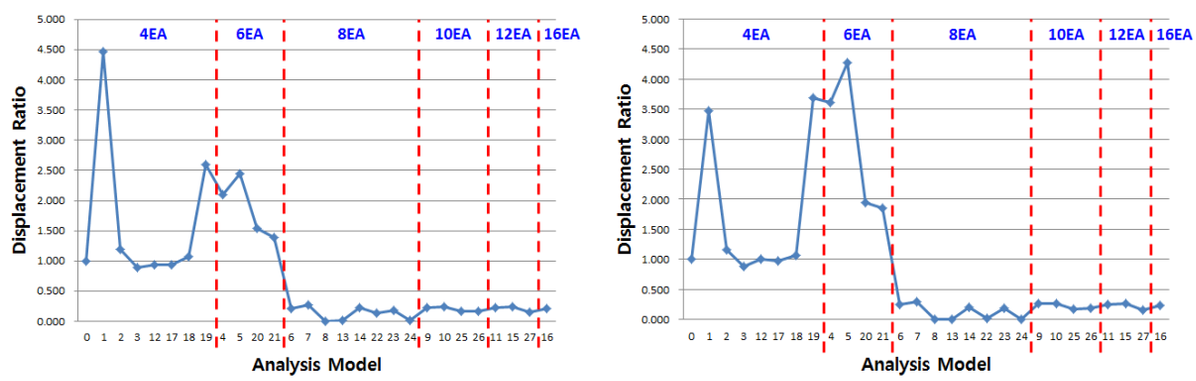
<Fig. 7~12>는 공진조화 하중과 El centro 지진 하중을 가한 해석 모델에서 a점과 b점의 수직, 수평 방향에 따른 최대 변위 응답을 분석하고, TMD가 설치되지 않은 Model 0을 기준으로 해석 모델별 최대 변위 응답비를 그래프로 나타내었으며, 이를 TMD의 설치 개수에 따른 해석 모델별로 정리한 것이다.

TMD를 4개 설치하였을 경우, Model 0보다 Model 3에서 최대 변위 응답 저감 효과가 나타났고, 공진조화 하중에 대해서는 12.5%, El centro 지진 하중에 대해서는 49%의 감소율을 보였다. 하지



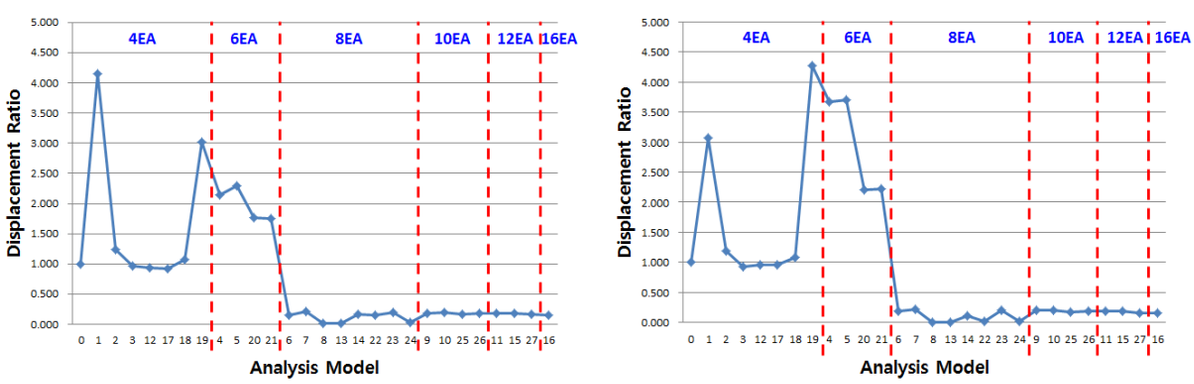
(a) Open roof (b) Closed roof

〈Fig. 7〉 Maximum vertical displacement of resonance harmonic loads ('a' point)



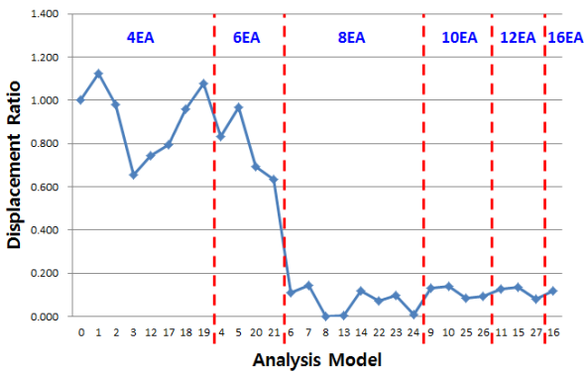
(a) Open roof (b) Closed roof

〈Fig. 8〉 Maximum horizontal displacement of resonance harmonic loads ('a' point)

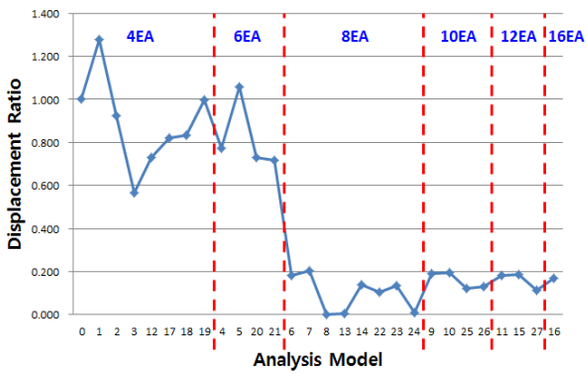


(a) Open roof (b) Closed roof

〈Fig. 9〉 Maximum horizontal displacement of resonance harmonic loads ('b' point)

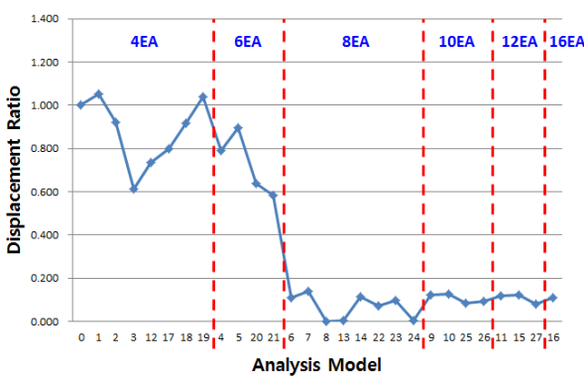


(a) Open roof

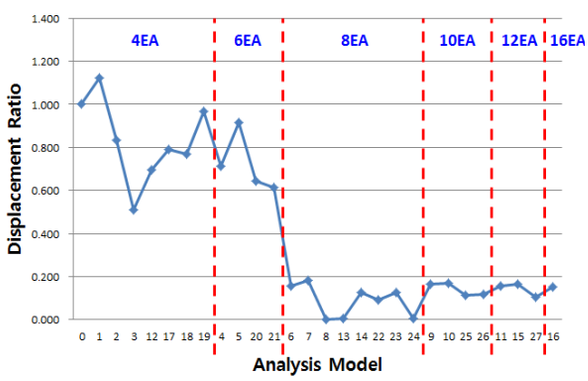


(b) Closed roof

〈Fig. 10〉 Maximum vertical displacement of earthquake wave(El Centro) ('a' point)

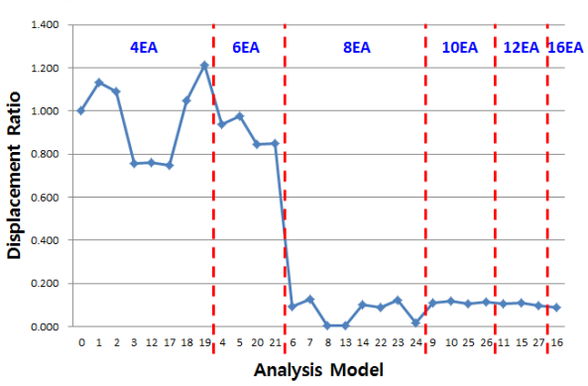


(a) Open roof

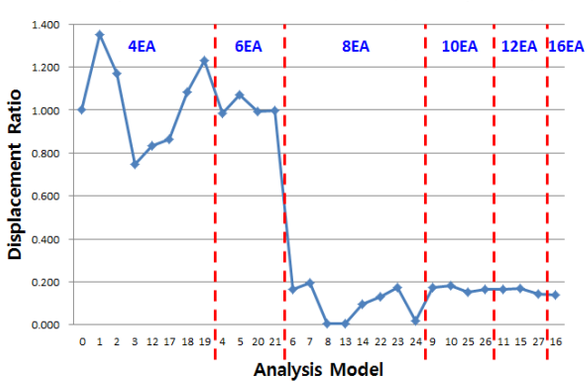


(b) Closed roof

〈Fig. 11〉 Maximum horizontal displacement of earthquake wave(El Centro) ('a' point)



(a) Open roof



(b) Closed roof

〈Fig. 12〉 Maximum horizontal displacement of earthquake wave(El Centro) ('b' point)

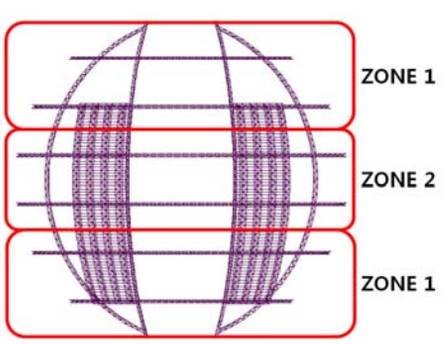
만, 공진 하중을 가하였을 경우, Model 1에서는 Model 0보다 4.6배가량 변위 응답이 증가하는 역효과를 보였다. 따라서, 4개를 설치한 해석 모델에서는 Model 1과 3 그리고 Model 17과 19를 각각 비교하였을 때 TMD 설치 위치에 대한 영향이 크게 작용한 것으로 판단된다.

TMD 개수 변화에 따른 변위 응답 분석 결과, 최대 응답 저감 효과를 보인 것은 TMD를 8개 설치한 경우이다. 6개의 TMD를 설치하였을 경우에는 El centro 지진 하중을 가하였을 때 평균적으로 17.2%의 응답 저감 효과가 나타났지만, 공진조화 하중을 가하였을 때는 모든 해석 모델에서 Model 0보다도 큰 변위 응답이 나타났다. 여기에 2개의 TMD를 추가시켜서 8개를 설치한 해석 모델에서는 지진 하중 및 해석 모델의 개폐 유무에 상관없이 71%에서 최대 99%까지 응답 저감 효과가 나타났다. TMD를 추

가 설치함으로서 해석 모델의 TMD 질량비가 증가되고 이로 인해 진동 제어 효과가 확연하게 나타남을 알 수 있다. 이후 10개, 12개, 16개의 TMD를 설치하여 개수를 점차 증가시킬 경우 더욱 탁월한 효과가 나타날 것이라 예상하였지만, 변위 응답은 8개를 설치한 경우보다 상대적으로 크게 나타났다. 그 이유는 TMD에 의한 질량 제어 효과보다 가해지는 지반 가속도에 의한 지진 하중 증가 효과가 더 크게 작용하였기 때문이라고 판단된다. 따라서 8개의 TMD를 설치하였을 경우 최대 응답 제어 효과가 나타남을 알 수 있다.

3.2 TMD 설치 위치 변화에 따른 응답 분석

TMD 설치 개수 변화에 따른 응답 분석에 이어, 각각의 트러스 부재에 설치된 TMD의 설치 위치 변화에 따른 변위 응답을 분석하였다. 먼저, 본 해석 모델에서 TMD가 설치될 트러스 종류와 그 위치에 대한 다양한 경우의 수로 인하여 분석에 대한 효과적인 결과 도출을 위하여 <Fig. 13>과 같이 해석 모델에 대한 구획화(Zoning) 작업을 실시하였다. <Fig. 13>은 열린 상태의 해석 모델을 구획화한 것이며, 닫힌 상태의 해석 모델에서도 동일하게 적용하였다.



〈Fig. 13〉 Zoning about plot planning of TMD (Open roof)

Runway trusses에 4개의 TMD가 설치된 Model 1, 2, 3을 비교해 볼 때, RT 3과 RT 4에 설치하는 경우보다 RT 1과 RT 6에 설치한 경우 최대 49%의 응답 저감 효과가 나타났다. <Table 1>에서 분석한 바와 같이, 본 해석 모델에서 RT 3과 RT 4에서 a점의 수직 방향 변위 응답이 가장 크게 나타났기 때문에 TMD를 설치할 경우 극대의 효과가 나타날 것이라 예측하였다. 그러나, Runway trusses와 Transverse trusses의 교차점에 설치한 해석 모델에서도 확인할 수 있듯이, Zone 2에 TMD를 위치시킨 Model 1과 19보다 Zone 1에 위치시킨 Model 2, 3, 12, 17, 18에서 평균적으로 7.1%의 효과적인 응답 저감이 나타났다.

그리고 TMD를 6개 설치한 해석 모델을 통해 TMD 위치 계획에 대한 영향이 중요한 인자로 작용하는 것을 알 수 있다. TMD를 4개 설치한 경우보다 개수를 증가시킴으로 인해 보다 더 효과적인 응답 저감 효과를 기대하였지만, Model 0보다도 큰 변위 응답을 나타내거나 혹은 4개를 설치한 모델보다 효과적이지 못하였다. 이는 TMD의 설치 위치에 있어서 Zone별 분포에 따른 설치가 대칭적으로 이루어지지 않았기 때문에 4개를 설치한 경우보다 효과적이지 못하였다고 판단된다. 다시 말해, 본 논문에서는 6개의 TMD 설치를 계획함에 있어서 해석 모델의 중심선을 기준으로 좌우 대칭을 고려하여 설치하였으나, RT에만 TMD가 설치된 해석 모델에서는 상하 대칭을 고려하지 않은 것이 그 이유라고 판단된다. 따라서, TMD 설치를 계획하면서 개수 증가뿐만 아니라 설치 위치에 대한 계획도 상호 동반되어야 극대의 효과가 발현될 수 있을 것이라 판단된다.

상기 내용들을 뒷받침하기 위해 TMD를 2개 추가함으로써 8개 설치한 해석 모델을 통해 보다 안정적인 분석 결과를 확인할 수 있다. Model 7과 Model 8을 보면 서로 간에 최대 28.8%의 응답 차이가 나타나고, Model 23과 Model 24를 통해 서로 간에 18.5%의 응답 차이가 나타남을 알 수 있다. 이를 통해 상대적으로 Zone 2에 집중되어 설치된 경우보다 가장자리로 분산시켜 Zone 1에 설치하는 것이 더 효과적임을 알 수 있다. 또한 6개의 TMD가 설치된 해석 모델과 비교하였을 때 효과적인 응답 저감 효과를 나타낸 경우는 해석 모델의 중심선을 기준으로 상하 대칭적으로 설치되어 있다. 마찬가지로 Runway trusses와 Transverse trusses의 교차점에 설치한 Model 22, 23, 24를 보면, 교차점에 TMD가 4개 설치된 해석 모델에서는 응답 저감 효과가 크지 않았지만, 8개를 설치한 해석 모델에서는 평균적으로 91.4%의 응답 저감 효과를 보이며 TMD 설치 개수에 대한 영향이 동시에 작용함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 개폐식 대공간 구조물에 TMD를 설치하고, 해석 모델에 설치될 TMD의 개수 및 설치 위치 변화에 따른 해석 모델의 변위 응답을 분석하였다.

TMD의 설치 개수 변화에 따른 분석 결과, 4개 설치한 해석 모델에서는 6개를 설치한 경우보다도 큰 응답 저감 효과를 보인 해석 모델이 있는 반면, TMD를 설치하지 않은 해석 모델보다도 변위 응답이 증가하는 결과가 나타나면서 설치 위치에 대한 영향이 중요한 요소로 작용함을 확인하였다. 특히, 8개의 TMD를 설치한 해석 모델은 본 연구 결과에서 최대 응답 저감 효과를 나타내었다. Zone별 구획화를 통해서 설치 위치에 따른 분석 결과, Zone 2에 집중시켜서 설치한 해석 모델보다 Zone 1에 더 많은 TMD가 설치되어 있을 때 상대적으로 응답 저감 효과가 크게 나타났다. 이는 TMD의 설치 개수에 따른 원인과 함께 Zone별 설치 위치에 대한 영향도 상호작용한다면 극대의 응답 저감 효과가 나타남을 알 수 있다. 다시 말해, TMD 설치 위치에 대한 계획시 해석 모델의 중앙부에 TMD를 집중시키는 것보다 해석 모델의 가장 자리에 설치하여 분산시켜 배치하는 것이 보다 더 효과적이라고 판단된다.

향후 추가 연구 진행 방향으로는 응답 효과가 가장 큰 8개의 TMD를 설치하여, 각각의 TMD 질량을 동일한 비율로 변화시키면서 변위 응답 결과를 분석해보고, 더불어 트러스별 혹은 Zone별 설치 위치에 따라 TMD 질량 비율을 달리한 연구도 진행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비 지원(18AUDP-B100343-04)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Kawaguchi, K., & Suzuki, Y. (2005). Damage investigations of public hall in Nagaoka city after Niigata-Chuetu earthquake 2004 in Japan. Proceedings of the International Symposium of Shell and Spatial Structures, Romania, pp.421~428
2. 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
3. Yoshinaka, S., & Kawaguchi, K. (2008). Vibration control of large-span architectures using spatially distributed MTMDs. Proceedings of the 7th European Conference on Structural Dynamics, UK, pp.1~11
4. Yoshinaka, S., & Kawaguchi, K., “Vibration control of spatial structures using spatially distributed MTMDs”, Memoirs of the Faculty of Engineering Osaka City University, Vol.49, pp.19~28, 2008
5. Kim, H. S., & Kang, J. W., “Seismic Response Control of Spacial Arch Structures using Multiple Smart TMD”, Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.16, No.1, pp.43~51, 2016
6. Warburton, G. B., “Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters”, Earthquake Engineering Structural Dynamics, Vol.10, No.3, pp.381~401, 1982
7. Kim, H. S., & Kang, J. W., “Seismic Response Control of Retractable-roof Spatial Structure Using Smart TMD”, Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.16, No.4, pp.91~100, 2016

■ Received : February 02, 2018
■ Revised : February 20, 2018
■ Accepted : February 26, 2018