

개폐식 대공간 구조물의 감쇠장치 적용 및 최적설계에 관한 연구

정 보 라¹·김 시 욱²·김 치 경^{3†}

¹단국대학교 건축공학과 연구원, ²단국대학교 건축공학과 박사과정, ³단국대학교 건축공학과 교수

Study on Application of Dampers and Optimal Design for Retractable Large Spatial Structures

Bo-Ra Joung¹, Si-Uk Kim² and Chee-Kyeong Kim^{3†}

¹Researcher, Department of Architectural Engineering, Dankook Univ., Yongin, 16890, Korea

²Graduate Student, Department of Architectural Engineering, Dankook Univ., Yongin, 16890, Korea

³Professor, Department of Architectural Engineering, Dankook Univ., Yongin, 16890, Korea

Abstract

This paper presents a tuned mass damper (TMD) utilizing a parametric design technique to reduce the dynamic responses to seismic loads of retractable large spatial structures. An artificial intelligence algorithm was developed to automatically search for the installation position of the damping device. This enables confirming the dynamic response of the structure in real time while finding the optimum position for the damping device. Further, the optimum mass of the damping device is determined from among several alternatives, and a design that can be effectively applied to both open and closed conditions of the roof is obtained.

Keywords : retractable large spatial structure, tuned mass damper (TMD), parametric modeling

1. 서론

대공간 건축물의 국내·외 시공 사례들을 살펴보면 해외 건설시장에서 개폐식 돔이나 개폐식 지붕 구조물의 건설이 보편화되어 있는 반면에 국내에서는 관련 기술이 미진한 실정이다. 그러나 최근 대공간 건설관련 사업과제(Kang *et al.*, 2015)를 통해 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중 선행연구(Kim *et al.*, 2019a; Lee *et al.*, 2019)에서 스포츠 경기장 및 다목적 체육시설인 대공간 구조물의 지진응답 제어에 관한 연구가 진행되었다. 연구내용을 살펴보면 지진하중으로 인한 과도한 진동이 발생하여 지붕에 설치된 각종 장비 및 시설물 등이 낙하하여 인명피해가 발생할 가능성이 높다고 보고 구조물에 감쇠장치를 모델링하여 동적응답을 저감시키는 연구였다. 이와 같이 장스팬의 철골지붕구조는 경량이고, 유연한 변형이 가능하며 낮은 감쇠비 및 고유주파수를 나타내는 특성을 가지고 있어서 풍하중이나 지진 하중이 가해지면 진동하기 쉽다. 이러한 구조물

의 진동을 줄이기 위한 조치로 감쇠장치를 설치하여 외부하중에 대한 동적응답을 줄이는 것은 구조설계 과정에서 매우 중요한 일이다.

본 연구는 개폐식 대공간 구조물의 지진하중에 대한 동적응답을 줄이기 위한 목적으로 파라메트릭 설계 기법을 적용하여 동조질량감쇠기(TMD : Tuned Mass Damper)를 설치하였다. 기존에 감쇠장치 모델링 시 엔지니어가 일일이 구조물의 절점을 찾아 모델링했던 문제점을 해결하고자 감쇠장치의 설치 위치를 자동 탐색하는 컴포넌트를 개발하였다. 이는 구조물의 동적응답을 실시간으로 확인할 수 있을 뿐만 아니라 감쇠장치의 최적위치를 찾을 수 있다. 또한 여러 대안을 생성하여 감쇠장치 질량의 최적값을 찾아주며, 지붕의 열린 상태와 닫힌 상태에 모두 효과적으로 적용될 수 있는 설계안을 찾을 수 있다.

동조질량감쇠기는 설치하는 위치와 질량에 따라서 성능이 천차만별이며, 동조를 제대로 시키지 않았을 경우에는 오히려 지진하중의 증폭을 초래한다. 감쇠장치를 정확하게 성능최적

[†]Corresponding author:

Tel: +82-31-8005-3760; E-mail: cheekim@dankook.ac.kr

Received August 27 2020; Revised October 16 2020;

Accepted October 19 2020

© 2020 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

화하기 위해서는 질량비의 계산과 설치위치에 대한 탐색이 필요하며, 이는 비슷한 알고리즘의 반복을 통해 다양한 대안을 비교해 볼 수 있도록 이루어진다. 이와 같은 관점에서 파라메트릭 설계방법을 도입하면 더욱 손쉽게 최적의 대안을 찾을 수 있다.

2. 본 론

이 장에서는 첫 번째, 연구개발에 사용된 디자인 도구 및 파라메트릭 환경 구성에 대한 소개를 하고 두 번째, 감쇠장치를 적용한 파라메트릭 구조설계 프로세스를 정립하였다. 세 번째, 개발한 컴포넌트들을 기술하고 네 번째, 예제건물을 통한 개발기술의 적용 및 검증하는 단계를 거쳤으며 마지막으로 결론과 추후 연구방향을 기술하였다.

2.1 디자인 도구 및 파라메트릭 환경 구성

연구개발에 사용된 디자인 도구는 3차원 자유 형상 모델러로 널리 알려진 라이노(Rhino3D) 및 파라메트릭 디자인 도구인 그라스하퍼(Grasshopper)를 기반으로 개발되었다. 라이노는 대공간 구조물의 3D 형상을 모델링하고 표현하기 위한 3D 그래픽 커널로서 형상 설계를 위하여 가장 많이 사용하는 소프트웨어 중 하나이다. 그라스하퍼는 라이노와 긴밀하게 결합된 비주얼 프로그래밍 언어 및 그래픽 알고리즘 편집기이다. 파라메트릭 모델을 생성하기 위한 파라메트릭 설계 엔진으로서 그라스하퍼를 도입하였다(Choi *et al.*, 2017).

파라메트릭 모델링은 한번 구축된 시스템에 의해 다양한 대안을 만들어 낼 수 있다는 장점이 있다. 이러한 장점 덕분에 파라메트릭 모델링에 대한 플랫폼이 많이 생겨나고 있다. 파라메트릭 디자인 접근은 스크립트나 프로그래밍 언어를 활용하여 디자인 알고리즘을 사용자가 직접 설계할 수 있기 때문에 그 활용도가 뛰어나지만, 건축과 개발언어를 동시에 구사해야 하기 때문에 결과물까지 순탄하지 않다. 다행히 상용화된 모델링 소프트웨어에는 파라메트릭 설계 도구가 어느 정도 탑재되어 있으며, Revit, Rhinoceros, CATIA, Microstation, ArchiCAD 등 BIM을 지향하는 Computer-Aided Design Tool의 정보는 기본적으로 파라메터를 이용해 다루어지고, 이들을 활용할 수 있도록 구성되어 있다.

파라메트릭 구조설계의 자동화에는 파라메터로 부재를 조절하는 것 이외에도 다른 특성들이 필요하다. 하나는 파라메터를 이용하여 설계한 이력이 남아 있어야 한다. 이를 이력 트리 시스템(History Tree System)이라고 한다. 설계 이력이 남아 있으면 모델링 결과물은 항상 변경 혹은 수정하기 쉬운 상태이

며, 이력 트리 시스템을 통해 지난 이력을 다시 통과하거나 이미 설계 이력의 재활용이 가능하다. 또 하나는 구속조건 솔버 시스템(Constraint Solver System)이다. Grasshopper를 예로 들면 각각의 입력 값에 따라 출력 값의 범위가 정해지고 단순 파라메터에 의해 입력값 값이 정해지기만 하는 것이 아니라 단계를 이어나가며 연동됨을 의미한다. 설계 이력을 기반으로 한 파라메트릭 설계를 수행해야 최종산출물에 의해 재입력 값을 지정하고 다시 설계 이력을 반복수행할 수 있다.

2.2 TMD를 적용한 파라메트릭 구조설계 프로세스

파라메트릭 구조해석 환경에는 아래와 같은 특징이 있다. 첫째로 파라메트릭 구조 모델 컴포넌트들을 이용해 파라메트릭한 방식으로 구축된 구조 모델을 작성한다. 둘째, 작성된 구조 모델을 외부의 구조해석 패키지를 제어하는 API 컴포넌트에 연결해 해석 솔버와 연동하여 자동화된 구조해석을 수행하고 그 결과를 추출한다. 셋째, 전달된 해석 결과를 평가하고 그에 근거하여 구조 모델 대안을 자동 생성한 다음 이를 다시 해석 솔버와 실시간 연동해 성능을 확인함으로써 유전자 알고리즘에 기반을 둔 자동 최적화를 수행한다. 이와 같이 작성된 모델은 다양한 설계변수의 변형을 통해 수많은 대안 생성이 가능하며, 여러 대안의 자동 검토를 통해 최적의 성능을 가지는 구조 모델을 효율적으로 찾아낼 수 있다(Choi *et al.*, 2016).

선행연구(Jeong *et al.*, 2018)에서 제시한 개폐식 대공간 건축물의 구조설계 프로세스를 바탕으로 개폐식 대공간 건축물의 파라메트릭 최적설계를 위해 필요한 기능들을 정리하면 다음과 같다. 여기서 3)항에 해당하는 구조물의 진동제어를 위한 감쇠장치 모델링부분을 추가 개발하여 기능들을 고도화하였다(Fig. 1).

2.2.1 개폐식 대공간 건축물의 비선형성 모델링

곡선(면) 형태를 가지는 대공간 건축물의 경우 비선형성으로 인하여 사용자가 좌표를 일일이 입력하여 모델링하는 방식은 많은 시간과 노력이 소요된다. 3차원 공간상에 표현되어야 하는 파라메트릭 모델링 기법은 본 구조물 형태에서는 매우 중요한 기술이다.

2.2.2 개폐지붕구조물의 메커니즘을 반영한 하중 자동 산정

일반 대공간과 달리 지붕이 개폐되는 구조물은 개폐 정도에 따라 구조물이 형상과 하중 조건이 달라진다. 또한 곡면 지붕에 작용하는 풍하중이나 적재, 적설하중도 형상에 기반하여 하중의 크기와 방향이 산정되고 표현되어야 하기에 일반 건축물의 풍하중 모델링과는 비교할 수 없는 작업량이 발생한다.

그러므로 개폐상태에 따라 변화하는 지붕구조물의 자중, 설계 하중, 이동하중 및 대차(bogies)장치의 구조적 구동메카니즘 등을 복합적으로 고려하여 설계가 이뤄져야 한다.

2.2.3 구조물의 진동제어를 위한 감쇠장치 모델링

서론에서도 언급했듯이 지진하중(외부하중)에 대한 동적 응답을 줄이는 것은 구조물의 과도한 진동발생을 제어하여 1차적 각종 장비 및 시설물 낙하 방지, 2차적 인명피해를 예방할 수 있다. 또한 지붕 개폐여부에 따라 구조물의 강성 및 질량분포가 달라지면서 고유진동수와 모드형상이 달라진다. 이에 대응하여 감쇠장치를 모델링하고 최적의 제어 위치를 찾아 주는 일은 매우 중요하다.

2.2.4 정적/동적해석을 위한 구조해석 모듈 연계

정적/동적해석 모듈은 2.2.1~2.2.3항의 입력 데이터를 외부 구조해석 프로그램으로 실시간으로 연동됨에 따라 파라미터로 설정된 계수들에 의해 구조해석모듈은 실시간 업데이트가 된다.

2.2.5 다수의 대안 생성

최종적으로 구조물의 최적대안을 창출하기 위해서는 다수의 대안을 생성하여 비교하고 검토하는 일들은 매우 중요하다. 파라메트릭 설계의 강점을 살려 기존의 기술적 한계를 극복하고 최단시간에 수천 개 구조시스템 대안 생성 및 비교검토가 가능한 기술을 개발하였다.

2.2.6 최적화 설계

대공간 건축물의 경우 설계변수와 구조물의 성능 간의 상관관계를 예측하기 어려워 다수의 구조시스템 대안을 생성하고 비교·검토하여 최적의 안을 찾는 시행착오 방식의 설계 기법이 요구된다. 그러나 하나의 대안에 대한 모델링, 해석, 설계에 선형 구조물 대비 많은 시간이 소요되어 다수 대안 검토가 불가능한 한계를 극복할 수 있도록 앞서 제시한 2.2.5항의 대공간 건축물 모델링 및 대안생성 기술을 바탕으로 구조적 성능, 골조 경제성 등 설계 목표를 최적화할 수 있는 기술 및 시스템이 필요하다.

2.3 동조질량감쇠장치(TMD)의 이론적 배경 및 최적설계 변수 적용

동조질량 감쇠장치(Tuned Mass Damper)는 구조물의 동적 응답을 감소시키기 위해 질량체, 강성, 그리고 감쇠로 구성된 장치이다. 설치대상 건축물의 특정진동수(대부분 건축물의 1차모드)와 동일한 진동수를 갖도록 하여, 건축물이 그 진동수로 거동할 때 구조물의 거동과 반대의 위상으로 거동하게 되고 발생한 관성력을 바탕으로 제어하게 된다. 구조물의 감쇠가 0 이고 가진 하중의 진동수가 변화할 때 이론적으로 제어하고자 하는 특정진동수의 진동을 0으로 만들게 되나, 주변 진동수는 크게 증폭되어 원 구조물의 응답보다 더 커지는 현상이 발생하게 된다. 이러한 감쇠 비의 영향에 의해 TMD 설계에서 최적 진동수비와 최적 감쇠비의 개념이 도출되었다. 지반운동이나 동적하중으로 가해지는 구조물에 진동제어를 위해서 설치되는 TMD의 강성 및 감쇠의 최적설계 값에 대한 연구는 다수 수행된 바 있다.

Den Hartog(1956)은 무감쇠 구조물을 조화하중으로 가진하여 변위응답을 최소화하기 위한 경우, Warburton(1982)은 무감쇠 구조물을 랜덤하중으로 가진했을 때, Sadek 등(1997)은

Table 1 Methods to estimate optimal parameters of TMD

Reference	Optimal Parameters of TMD	
	Frequency Ratio (f_{opt})	Damping Ratio (ξ_{opt})
Den Hartog, 1956	$\frac{1}{1+\mu}$	$\sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}}$
Warburton, 1982	$\frac{\sqrt{1-\frac{\mu}{2}}}{1+\mu}$	$\sqrt{\frac{\mu(1-\frac{\mu}{4})}{4(1+\mu)(1-\frac{\mu}{2})}}$
Sadek, 1997	$\frac{1}{1+\mu} \left[1 - \xi_s \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}} \right]$	$\frac{\xi_s}{1+\mu} + \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}}$
Tsai & Lin, 1993	$\left(\frac{\sqrt{1-0.5\mu}}{1+\mu} + \sqrt{1-2\xi_s^2} - 1 \right)$ $- \left[(2.375 - 1.034\sqrt{\mu} - 0.426\mu)\xi_s \sqrt{\mu} \right]$ $- \left[(3.730 - 16.903\sqrt{\mu} + 20.496\mu)\xi_s^2 \sqrt{\mu} \right]$	$\sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)(1-0.5\mu)}}$ $+ (0.151\xi_s - 0.170\xi_s^2)$ $+ (0.163\xi_s + 4.980\xi_s^2)\mu$

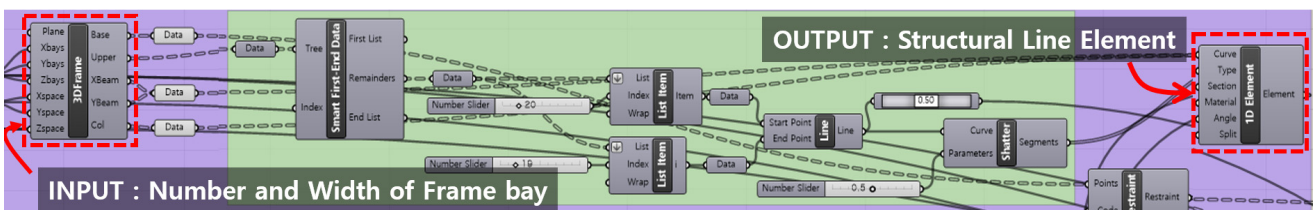


Fig. 1 Automatic location generation component of TMD

감쇠를 갖는 구조물의 고유치해석을 통해 변위응답을 최소화할 경우, Tsai와 Lin(1993)은 감쇠를 갖는 구조물의 정상상태 응답을 줄이기 위한 목적으로 최적 파라미터를 회귀분석을 통해 제안하였다. Table 1은 선행연구(Kim and Kang, 2017)의 경험을 바탕으로 TMD의 최적 파라미터를 결정하는 진동수비와 감쇠비를 선행연구별로 정리한 것이며, 질량비를 1~8%까지 적용하여 수식을 계산한 값은 Fig. 2와 같다. 여기서, $\mu = m_t/m_s$ 는 TMD의 질량비, ξ_s 는 구조물의 감쇠비를 나타낸다.

TMD의 질량비를 사용하여 진동원(조화외력진동)에 따라서 진동수비(f_{opt})와 감쇠비(ξ_{opt})는 Table 1에 의해 산정하고, 실제 해석시 사용되는 변수인 TMD의 강성(k_t) 및 감쇠(c_t)값은 식 (1)~(3)을 사용하여 결정하게 된다(Soong and Rahul, 1998).

$$f_t = f_{opt} f_s \tag{1}$$

$$k_t = 4\pi^2 f_t^2 m_t \tag{2}$$

$$c_t = \xi_{opt} w_t m_t \tag{3}$$

여기서, f_t =TMD 고유진동수, f_{opt} =TMD 진동수비, f_s =설계 대상(구조물) 진동모드의 진동수, k_t =TMD 강성(kN/m), m_t =TMD 질량(μ 에 따라 산정), c_t =TMD 감쇠(KN), ξ_t =TMD 감쇠비, w_t =원진동수를 나타낸다.

2.4 개발 컴포넌트 소개

본 컴포넌트 개발의 최종 목표는 인공지능 알고리즘을 이용하여 개폐식 대공간 구조물의 지붕의 열린 상태와 닫힌 상태를 모두 고려하여 효과적 구조물의 동적응답을 제어할 수 있는 TMD의 위치와 용량을 찾는 것이 최종 목표이다. 이에 따라 개발된 컴포넌트 크게 3가지로 분류되며 다음과 같다.

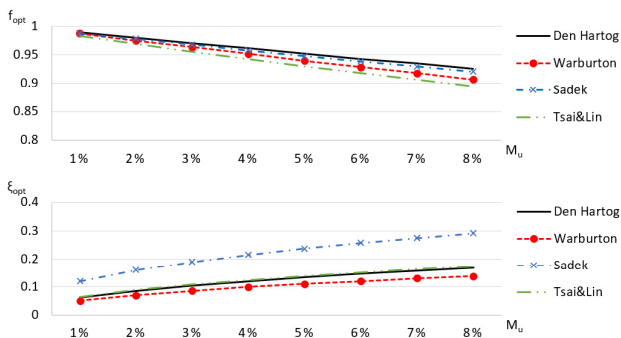


Fig. 2 Frequency & damping ratio for mass ratio of TMD

2.4.1 TMD 위치 자동 생성 컴포넌트

Fig. 1은 구조물에 TMD의 위치를 자동으로 생성하기 위한 컴포넌트들을 보여준다. 컴포넌트 내 구성하는 알고리즘을 살펴보면, 첫 번째 설치될 위치의 절점을 모두 추출한다. 두 번째, 개수와 설치 옵션 등을 고려(X, Y축 대칭)하여 위치 지정한다. 세 번째, Point Mass 컴포넌트(Fig. 3)를 이용하여 TMD의 질량비에 따라 자동 계산된 TMD 질량을 중력방향으로 벡터와 함께 생성시키고, 생성된 PointMass는 구조체의 절점과 Link element를 생성하여 연결시켜 준다.

2.4.2 최적설계용 TMD 모델링 컴포넌트

자동 생성된 TMD 위치 절점과 TMD질량이 부여된 Point-Mass를 연결하는 Link element에 TMD의 속성 값을 부여시켜 주게 된다. 컴포넌트의 입력데이터는 1차 구조해석 후 나온 구조물의 총 질량과 진동수 · TMD의 질량비이며, 출력데이터는 앞서 소개한 Warburton(1982)이 제안한 식을 통해 자동 계산된 TMD의 최적 강성, 감쇠값이 된다(Fig. 4).

2.4.3 진동 성능 평가 컴포넌트

Fig. 5는 구조물의 진동 성능을 평가하기 위해 개발된 시간 이력하중 생성 컴포넌트로 엑셀파일 형태로 저장된 파일을 불러들여와 입력하는 형식으로 여러 하중에 대하여 검토가 가능하다.

컴포넌트로 생성된 출력 값은 Grasshopper상에서 텍스트 형태나 시각화하여 확인할 수 있으며, SAP2000에 그 값이 입력되어 해석을 수행한다. 예제건물에서는 El Centro(1940, 180Deg) 지진하중을 사용하였으며, 해석 후 사용자가 원하는 절점의 최대 변위(X, Y, Z방향), 가속도 데이터들을 추출하여 확인할 수 있다.

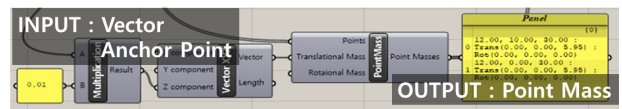


Fig. 3 Results of point mass component with the informations of mass vector and location

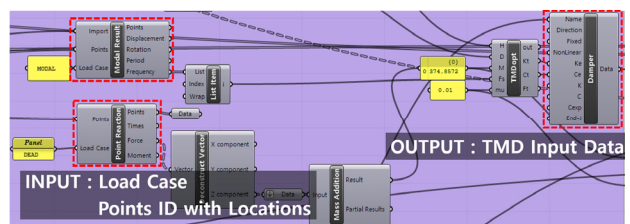


Fig. 4 Components for optimal design of TMD

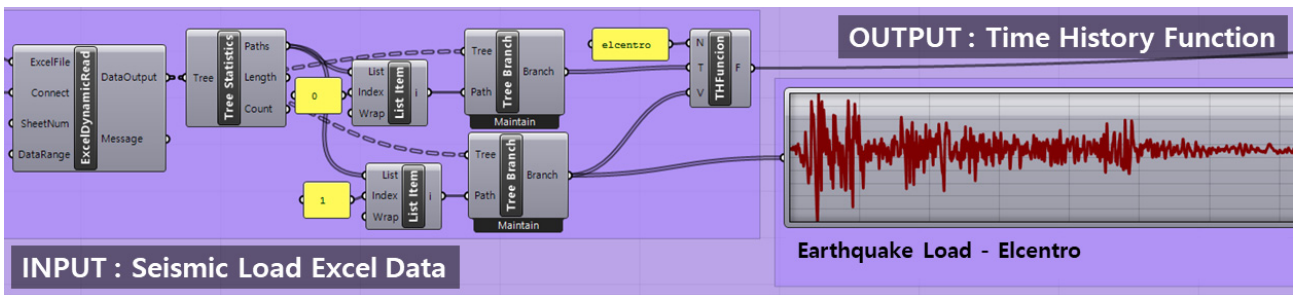


Fig. 5 Time history load generation component

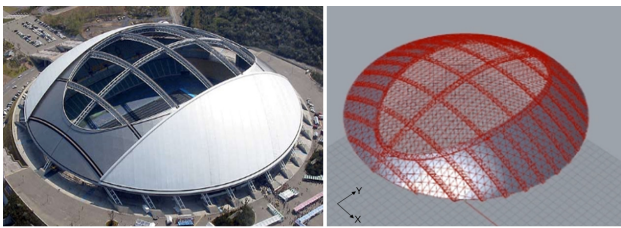


Fig. 6 A panoramic view of the o'dome

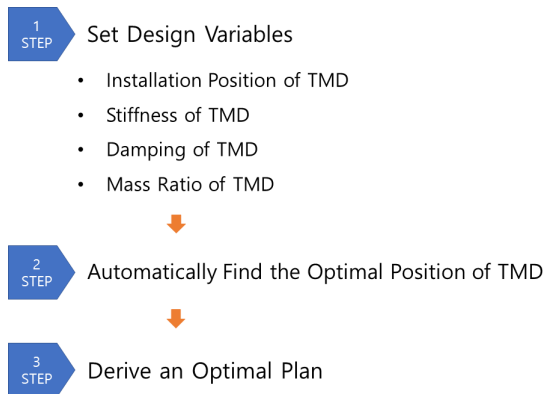


Fig. 7 Structural analysis process with parametric design technique (by Warburton, 1982)

2.5 개발 컴포넌트의 구현 및 구조해석 결과

개발한 감쇠장치모듈의 검증에 사용된 예제건물은 선형 (Kim et al., 2019b)으로 수행했던 O'dome으로 최대높이 57.46m, 직경 405m의 규모로 되어있다. 주 골조는 강관으로 된 삼각형 입체 트러스로 구성되어 있으며, 지붕을 포함한 구조물의 면은 막 구조물(PTFE)로 구조형식을 이룬다. 지붕은 Y축을 기준으로 좌우로 개폐되는 수평슬라이딩 시스템으로 되었고, 사용된 철골량은 약 12,500ton이다(Fig. 6).

앞서 소개한 개발 컴포넌트를 적용한 구조해석 순서는 다음과 같다(Fig. 7). 첫 번째 파라메트릭 구조설계 프로세스에 따라 1차 구조물 해석을 수행한다. 이때 구조물의 진동수, 감쇠비, 그리고 대상하중선정 및 그에 따른 성능수준 결정하게 된

Table 2 Alternatives for mass ratio and location of TMD

	Number of TMD (EA)	Installation Positions of TMD(Fig. 9)
Case1	2	5
Case2	4	0 / 10
Case3	4	1 / 9
Case4	4	2 / 8
Case5	4	3 / 7
Case6	4	4 / 6
Case7	4	5 / Y1 / Y5
Case8	4	5 / Y2 / Y4
Case9	6	1 / 5 / 9
Case10	6	2 / 5 / 8
Case11	6	3 / 5 / 7
Case12	6	4 / 5 / 6
Case13	6	0 / 5 / 10
Case14	6	1 / 9 / Y1 / Y5
Case15	6	1 / 9 / Y2 / Y4
Case16	6	3 / 7 / Y1 / Y5
Case17	6	3 / 7 / Y2 / Y4
Case18	8	1 / 2 / 8 / 9
Case19	8	1 / 3 / 7 / 9
Case20	8	1 / 4 / 6 / 9
Case21	8	0 / 1 / 9 / 10
Case22	8	2 / 3 / 7 / 8
Case23	8	2 / 4 / 6 / 8
Case24	8	0 / 2 / 8 / 10
Case25	8	3 / 4 / 6 / 7
Case26	8	0 / 3 / 7 / 10
Case27	8	0 / 4 / 6 / 10
Case28	8	1 / 9 / Y1 / Y2 / Y4 / Y5
Case29	8	3 / 7 / Y1 / Y2 / Y4 / Y5

다. 두 번째, TMD 설치 위치를 결정하게 된다. 해석모델에서의 TMD 위치는 메인 트러스의 교차점, X / Y 중심축을 기준으로 대칭으로 설치하게 되는 옵션을 기준으로 자동 생성된다. 세 번째, TMD의 질량 적용을 위해서는 두 번째에서 생성된 TMD절점에 전체 구조물의 질량 대비 퍼센트로 산정된 TMD의 질량을 절점질량(Nodal Masses)으로 입력한다. 네 번째, TMD의 제어 방향(X, Y, Z)을 벡터로 입력받는다. 다섯 번째, 최적 파라메터 산정식을 통해 나온 TMD의 강성 및 감쇠값을

자동 산정하여 입력한다. 여섯 번째, 응답을 검토할 지진하중을 입력한다. 일곱 번째, TMD 질량비에 따른 여러 대안을 생성한 후 결과값에 따라 결정하게 된다. 여덟 번째, 위와 같은 프로세스로 개폐지붕의 열리고 닫히는 상태에 따라 해석을 수행한다.

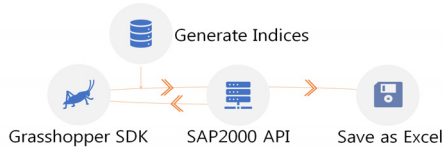


Fig. 8 Process for storing analysis results

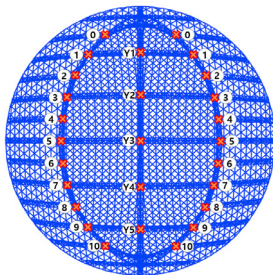


Fig. 9 Location number of TMD

Table 3 Z-DIR. deformation for seismic load(closed)

	Mu=1%	Mu=2%	Mu=4%	Mu=8%
Original	0.205m			
Case1	0.155m	0.117m	0.091m	0.086m
Case2	0.190m	0.171m	0.146m	0.113m
Case3	0.152m	0.113m	0.087m	0.066m
Case4	0.134m	0.092m	0.074m	0.053m
Case5	0.171m	0.131m	0.079m	0.051m
Case6	0.155m	0.119m	0.097m	0.091m
Case7	0.130m	0.094m	0.066m	0.046m
Case8	0.127m	0.087m	0.066m	0.044m
Case9	0.123m	0.089m	0.065m	0.037m
Case10	0.110m	0.080m	0.054m	0.030m
Case11	0.130m	0.079m	0.059m	0.048m
Case12	0.129m	0.098m	0.084m	0.089m
Case13	0.144m	0.098m	0.073m	0.051m
Case14	0.123m	0.093m	0.073m	0.047m
Case15	0.128m	0.091m	0.065m	0.035m
Case16	0.129m	0.082m	0.052m	0.027m
Case17	0.135m	0.082m	0.055m	0.027m
Case18	0.116m	0.088m	0.069m	0.046m
Case19	0.129m	0.083m	0.055m	0.026m
Case20	0.118m	0.080m	0.054m	0.027m
Case21	0.144m	0.104m	0.074m	0.051m
Case22	0.116m	0.075m	0.047m	0.033m
Case23	0.105m	0.070m	0.043m	0.032m
Case24	0.129m	0.090m	0.074m	0.058m
Case25	0.131m	0.081m	0.067m	0.058m
Case26	0.161m	0.115m	0.069m	0.045m
Case27	0.144m	0.102m	0.070m	0.048m
Case28	0.107m	0.083m	0.055m	0.055m
Case29	0.113m	0.074m	0.043m	0.019m

Table 4 Z-DIR. deformation for seismic load(open)

	Mu=1%	Mu=2%	Mu=4%	Mu=8%
Original	0.151m			
Case1	0.129m	0.100m	0.069m	0.072m
Case2	0.126m	0.113m	0.114m	0.116m
Case3	0.122m	0.125m	0.123m	0.113m
Case4	0.110m	0.098m	0.077m	0.049m
Case5	0.117m	0.091m	0.061m	0.082m
Case6	0.123m	0.089m	0.101m	0.116m
Case7	0.119m	0.084m	0.050m	0.036m
Case8	0.117m	0.078m	0.053m	0.036m
Case9	0.110m	0.097m	0.072m	0.038m
Case10	0.097m	0.072m	0.043m	0.033m
Case11	0.101m	0.060m	0.066m	0.059m
Case12	0.106m	0.076m	0.093m	0.086m
Case13	0.108m	0.079m	0.053m	0.039m
Case14	0.122m	0.120m	0.108m	0.086m
Case15	0.118m	0.113m	0.091m	0.056m
Case16	0.108m	0.085m	0.053m	0.045m
Case17	0.107m	0.081m	0.059m	0.055m
Case18	0.114m	0.108m	0.096m	0.081m
Case19	0.110m	0.096m	0.069m	0.048m
Case20	0.103m	0.084m	0.057m	0.033m
Case21	0.119m	0.119m	0.114m	0.104m
Case22	0.098m	0.073m	0.051m	0.064m
Case23	0.092m	0.064m	0.069m	0.061m
Case24	0.108m	0.099m	0.091m	0.099m
Case25	0.097m	0.072m	0.095m	0.101m
Case26	0.103m	0.088m	0.070m	0.053m
Case27	0.103m	0.065m	0.061m	0.044m
Case28	0.117m	0.108m	0.080m	0.043m
Case29	0.102m	0.080m	0.047m	0.031m

TMD 적용 유무에 따른 구조물 응답을 평가하기 위해 미설치한 모델은 선형해석을 통해 응답을 평가하고, 설치한 해석 모델에는 시간이력 해석법(Time History Analysis)으로 수행하였다.

설계 변수는 앞서 언급했듯이 TMD의 설치 위치, 개수, 질량비이며, 지붕이 열리고 닫힌 상태 모두 고려하였을 때 총 234 개의 대안(Table 2)에 대한 해석 값을 얻을 수 있었다. 해석결과 파일은 Fig. 8와 같은 프로세스로 반복문을 수행하여 엑셀 형태로 자동 저장된다. 결과값을 엑셀로 저장하기 때문에 엑셀에서 제공하는 그래프 및 분류기능을 자유롭게 사용할 수 있으며 엑셀의 각 기능들도 API를 통해 제어하며 컴포넌트로 만들어 추후 용이하게 사용할 수 있도록 메뉴를 추가하는 것도 가능하다.

Fig. 9는 TMD를 설치하는 위치를 위에서 바라본 모습에 표시한 그림이다. Table 3은 지붕면이 닫힌 상태, Table 4는 열린 상태의 동적 지진하중에 대해 시간이력해석을 수행하여 최대 처짐에 대한 결과 값을 나타낸다.

구조물의 높이가 높아질수록 각 자유도의 변형이 증대되어

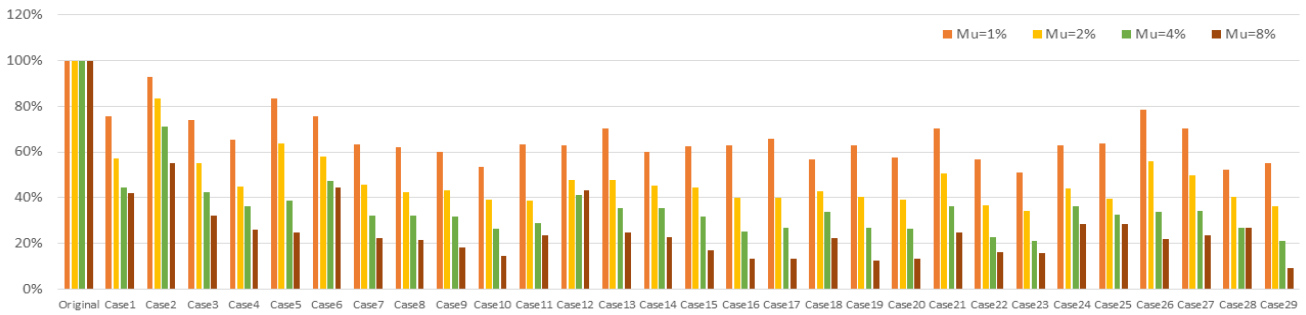


Fig. 10 Z-dir. deformation for seismic load(roof closed condition)

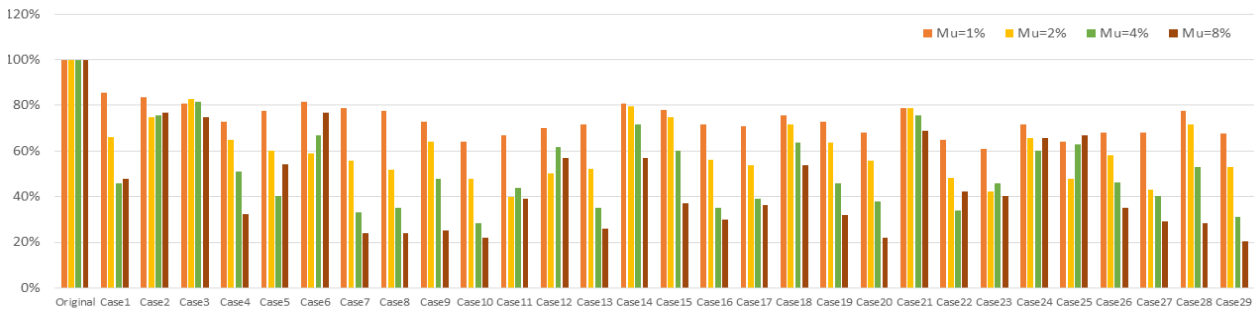


Fig. 11 Z-dir. deformation for seismic load(roof open condition)

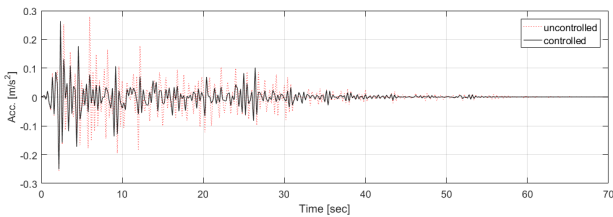


Fig. 12 Reduced acceleration due to additional damping devices

실제 최상단의 변형이 가장 크다. 따라서 해석결과 값의 비교 검토할 위치는 Y3위치의 절점으로 보았다. Fig. 10, 11은 원안 대비 감쇠장치 추가로 인해 줄어든 처짐량을 보여주며, TMD 질량비(μ)를 1~8%로 조절한 결과 TMD의 질량비가 8%일 때 효과적인 것으로 나타났다. 그 중 개폐상태를 고려하여 Case29가 가장 효과적인 것으로 제어된 것을 알 수 있다.

Case29는 TMD 질량비(μ) 8%의 8개 TMD가 분산 배치되는 대안으로 TMD 한 개당 1%의 질량비를 갖게 된다. 지붕면이 닫혔을 때 원안의 최대변위는 0.205m로 감쇠장치를 설치하자 0.019m로 약 90.7%가 줄어들었음을 확인할 수 있었다. 또한 열렸을 때 원안의 최대변위는 0.151m 였고, 감쇠장치 설치 후 0.031m로 약 79.5%가 줄어들었다. Fig. 12를 보면 감쇠장치 추가로 인해 원안대비 줄어든 가속도를 확인할 수 있었다.

추가적으로 해석결과를 통해 TMD 개수 및 위치 측면에서는 지붕 폐쇄형, 개폐형 모두 6, 8개 TMD를 설치했을 때 제어

율이 높을 것으로 나타났다. 이 결과를 선행 연구(Lee *et al.*, 2019)와 비교해 보면 폭 400m, 최대높이 95m의 철골트러스로 구성된 동형 수평슬라이딩 시스템에 같은 지진하중에 대해 해석한 결과 TMD를 8개를 설치하였을 때 변위 응답 저감 효과가 가장 크게 나타났다. 또한 TMD의 설치 개수와 설치 위치를 동일하게 하였을 때는 변위 응답 저감 효과가 큰 것은 TMD 전체 질량비가 6%일 때였으므로 본 논문의 결과와 비슷한 경향을 나타낸다는 것을 알 수 있었다.

3. 결론

본 연구에서는 개폐식 대공간 구조물의 지진하중에 대한 동적응답을 줄이기 위한 목적으로 감쇠장치의 설치 위치를 자동 탐색하는 컴포넌트를 개발하였다. 감쇠장치의 설치 위치를 결정하는 설계 변수는 설치 위치, 개수, 질량비이며, 지붕이 열리고 닫힌 상태 모두 고려하였다.

개발 컴포넌트를 통해 여러 대안을 생성하여 구조물의 처짐, 가속도 등 동적응답을 비교해 봄으로써 구조물의 감쇠장치 최적의 위치를 찾을 수 있을 있다.

예제 건물의 대안을 생성하여 결과를 검토해 본 결과 TMD의 질량비가 8%일 때 효과적인 것으로 판단된다. 또한 TMD 개수 및 위치 측면에서는 폐쇄형, 개폐형일 때 모두 6, 8개 TMD를 설치했을 때 제어율이 높을 것으로 나타났다.

- 1) 본 기술을 통해 감쇠장치를 모델링하고, 대안을 생성할 때 소요되는 시간 절감 가능하다.
- 2) 지붕면의 개폐형, 폐쇄형 대안들을 비교평가해 본 결과 국부적으로 TMD를 설치한 대안보다 대칭적으로 분산 배치하였을 경우 더 효과적으로 구조물을 제어할 수 있다.
- 3) 구조물 진동제어의 저감에 대한 영향은 TMD의 질량비, 개수 및 설치 위치의 영향을 받는다.
- 4) 추후 연구로 여러 형태의 구조물에 본 기술을 적용하여 검토해 볼 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원이 주관하는 도시건축 연구사업(No. 20AUDP-B100342-06, 개폐식 대공간 건축물 최적화 구조설계 프로그램 개발), (No. 20AUDP- B106333-06, 초고층 비정형 건축물 ICT 융합 설계 및 다축제어 기술 개발)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

Choi, H.C., Lee, S.E., Kim, C.K. (2016) Development of a Parametric Design System for Membrane Structures, *J. Korean Assoc. Spat. Struct.*, 16(4), pp.29~36.

Choi, H.C., Lee, S.E., Kim, C.K. (2017) Parametric Design Process for Structural Quantity Optimization of Spatial Building Structures, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 30(2), pp.103~110.

Den Hartog, J.P. (1956) *Mechanical Vibrations*, 4th Edition, McGraw-Hill, New York, USA.

Jeong, J.Y., Jung, B.R., Kim, C.K., Lee, S.E., Kim, S.U. (2018) Design and Implementation of Parametric Modeler for Retractable Roof Three-Dimensional Truss, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 31(1), pp.1~8.

Kang, J.W., Kim, G.C., Lee, D.W., Park, K.S. (2015) Research Center of Integrated Design Engineering Technology for Retractable Large Spatial Structures, *J. Korean Assoc. Spat. Struct.*, 15(4), pp.31~36.

Kim, D.H., Kim, H.S., Kang, J.W. (2019a) A Study on Optimum Mass of TMD for Improving Seismic Response Control Performance of Retractable-Roof Spatial Structure, *J. Korean Assoc. Spat. Struct.*, 19(3), pp.93~1003.

Kim, H.S., Kang, J.W. (2017) Parameter Study for Optimal Design of Smart TMD, *J. Korean Assoc. Spat. Struct.*, 17(4) pp.123~132.

Kim, S.U., Jung, B.R., Kim, C.K., Lee, S.E. (2019b) Parametric Design and Wind Load Application for Retractable Large Spatial Structure, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 32(6), pp.341~348.

Lee, Y.R., Ro, H.S., Kim, H.S., Kang, J.W. (2019) Seismic Response Control Performance Evaluation of Retractable-Roof Spatial Structure With Variation of TMD Mass, *J. Korean Assoc. Spat. Struct.*, 19(1), pp.75~82.

Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A.W., Chung, R.M. (1997) A Method of Estimating the Parameters of Tuned Mass Dampers for Seismic Applications, *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, 26, pp.617~635.

Soong, T.T., Rahul, R. (1998) Parametric Study and Simplified Design of Tuned Mass Dampers, *Eng. Struct.*, 20(3), pp.193~204.

Tsai, K.C., Lin, G.C. (1993) Optimum Tuned-mass Dampers for Minimizing Steady-state Response of Support-excited and Damped Systems, *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, 22, pp.957~973.

Warburton, G.B. (1982) Optimum Absorber Parameters for Various Combinations of Response and Excitation Parameters, *Earthq. Engrg. & Struct. Dyn.*, 10, pp.381~401.

요 지

본 논문은 개폐식 대공간 구조물의 지진하중에 대한 동적응답을 줄이기 위한 목적으로 파라메트릭 설계 기법을 적용한 TMD에 관한 연구이다. 인공지능 알고리즘을 이용하여 감쇠장치의 설치 위치를 자동 탐색하는 컴포넌트를 개발하였다. 이는 구조물의 동적응답을 실시간으로 확인하고, 구조물의 감쇠장치 최적의 위치를 찾을 수 있을 있다. 또한, 여러 대안에 대한 감쇠장치 질량의 최적 값을 찾아주며, 지붕의 열린 상태와 닫힌 상태에 모두 효과적으로 적용될 수 있는 설계안을 찾을 수 있다.

핵심용어 : 개폐식 대공간 구조물, TMD, 파라메트릭 모델링