

TMD 적용에 따른 Twisted 비정형 건축물의 변위 응답 분석

Displacement Response Analysis of Twisted Irregular Buildings According to TMD

유 상 호*
Yoo, Sang-Ho

김 현 수**
Kim, Hyun-Su

강 주 원***
Kang, Joo-Won

Abstract

In this study, we investigated the dynamic characteristics of three irregular building models to analyze the effectiveness of displacement response control with Tuned Mass Damper (TMD) installation in twisted irregular buildings. The three irregular models were developed with a fixed angle of twist per story at one degree, subjected to three historical seismic loads and resonant harmonic loads. By designing TMDs with linear and dashpot attributes, we varied the total mass ratio of the installed TMDs from 0.00625% to 1.0%, encompassing a total of 10 values. Two TMDs were installed at the center of the top story of the analysis model in both X and Y directions to evaluate displacement response control performance based on TMD installation. Our findings suggest that the top displacement response control performance was most effective when a 1.0% TMD was installed at the top layer of the analysis model.

Keywords : Irregular Structure, Twisted Shape, Tuned Mass Damper, Seismic Response, Story Displacement

1. 서론

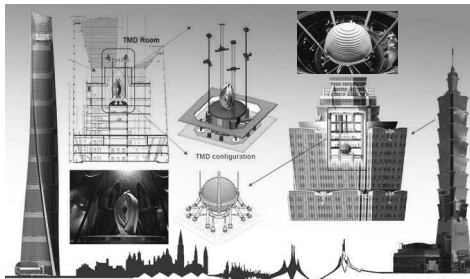
인구의 과집중화로 등장한 초고층 건축물들은 한정적인 대지의 효율성을 향상시키고 도시의 경제력 및 상징적인 역할을 하는 랜드마크로서 자리매김하였다.¹⁾ 이러한 초고층 건축물들이 21세기에는 설계 및 시공 기술, IT기술, 구조시스템 성능 향상 등의 이유로 정형적 형상이 아닌 비정형적 형상(Irregular Shaped)과 자유로운 형상(Free-Form)의 건축물들이 등장하기 시작하였다.²⁾ 비정형적 형상의 건축물들은 일정한 각도로 비틀어진 형태, 경사로 기울어진 형태, 높이가 증가함에 따라 평면의 크기가 감소하여 좁아지는

형태로 크게 3T(Twisted, Tilted, Tapered)로 분류가 가능하다. 이 중 Twisted 형태의 건축물들은 구조물의 평면이 하나의 회전축을 중심으로 일정한 회전 각도를 가지며, 비틀림 형상으로 인해 풍하중에 취약한 거동을 가지는 일반적인 정형적 고층 건축물에 비해 공기역학적 입면형태를 가지고 있다. 하지만 비틀어진 평면으로 인해 중력하중의 흐름이 크게 변하는 부분이 발생하며, 지진하중이 집중되는 부재가 발생하게 된다. 이처럼 기하학적 비정형성을 가지는 구조물의 구조적 거동을 직관적으로 예측하기는 어렵다.³⁾ 이러한 비정형 건축물들의 지진취약성을 보완하고자 면진장치나 제진장치 등을 적용하여 에너지를 소산시키거나, 지진하중을 감소시킬 수 있다.⁴⁾

제진시스템 중 하나인 동조질량감쇠기(Tuned mass damper, TMD)는 진동 에너지를 건축물의 고유진동수에 동조하여 기계적 감쇠비를 증가시킴으로써 구조물의 진동을 제어하는 진동제어장치이다. TMD 설계를 위해서는 TMD의 구성체인 질량체와 스프링의 강성값, 그리고 감쇠장치의

* 학생회원, 영남대학교 일반대학원 건축학과, 석사과정
Dept. of Architecture, Yeungnam University
** 정회원, 선문대학교 건축학부 교수, 공학박사
Division of Architecture, Sunmoon University
*** 교신저자, 정회원, 영남대학교 공과대학 건축학부 교수, 공학박사
School of Architecture, Yeungnam University
Tel: 053-810-2429 Fax: 053-810-4625
E-mail: kangj@ynu.ac.kr

적절한 감쇠값을 선정하여야 한다. 또한, TMD의 최적 감쇠비와 최적 진동수비는 설치되는 TMD의 총 질량비에 따라 결정되며, TMD의 효율성에 관계되는 요인들 중 하나인 총 질량비 선정은 TMD 설계의 주요한 변수로 작용한다. 그 예로 초고층 건축물에 TMD가 적용된 대표적 사례인 중국 상하이의 Shanghai tower(2015)의 경우 건축물 질량의 0.12%인 1000ton의 동조질량감쇠기가 설치되었으며, 대만의 Taipei 101(2004)의 경우 건축물 질량의 약 0.1%로 설정하여 660ton의 TMD가 설치되었다.⁵⁾〈Fig. 1 참고〉



〈Fig. 1〉 TMD application case (shanghai tower & taipei101)

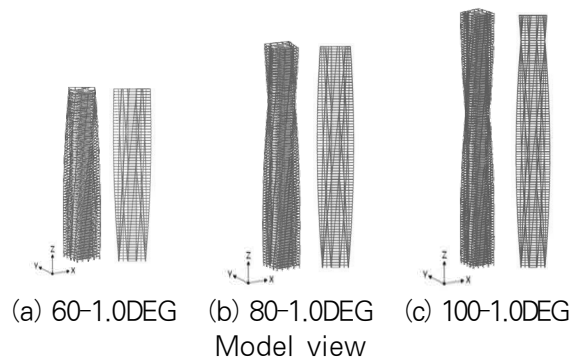
이에 따라 본 연구에서는 비정형 구조시스템에 진동제어 장치인 TMD의 설치 적합성 검토를 위해, 선행연구⁶⁾를 참고하여 비정형 형상 중 하나인 Twisted 형상 구조물을 선정하여 세 가지 역사지진하중과 공진조화하중을 가진하였다. 시간이력해석법을 사용하여 변위응답 제어 성능을 평가하기 위해 동조질량감쇠기를 해석모델 최상층에 설치하였으며, 동조질량감쇠기의 총 질량비를 변수로 설정하여 Twisted 비정형 건축물에 높이에 따른 TMD 적용에 대한 변위 응답을 분석하고자 한다.

2. 해석모델 일반사항

2.1 해석모델 개요

본 연구에서는 비정형 구조물 중 Twisted 형상 구조물의 높이를 변수로 설정하여, TMD의 변위 응답 제어성능을 분석하기 위해 상용 구조해석 프로그램인 Midas Gen Ver.940을 사용하여 〈Fig. 2〉와 같이 세 가지 해석모델을 모델링하였다. 사용된 해석모델은 선행연구⁶⁾를 참고하여 평면 길

이 36m, 경간 12m의 정사각형 평면과 층고가 3.9m이며 건축물의 총 높이가 60층(234m), 80층(312m), 100층(390m)으로 해석모델을 생성하였다. 해당 모델들은 층당 회전 각도를 모두 1°씩 가지며, Twisted 모델은 층수와 층당 회전각도에 따라 “60-1.0DEG”, “80-1.0DEG”, “100-1.0DEG”로 명명하였다. 해석모델에 대한 일반사항은 〈Table 1〉과 같다.



〈Fig. 2〉 Analytical model

〈Table 1〉 Specification of analytical model

Material	Column	
	Girder	SS275
	Beam	
Section	Shear Wall	C24
	Column	H-700×700×45/70
	Girder	H-700×300×13/24
Height	Beam	
	Shear Wall	600mm
	60-1.0DEG	60F×3.9m=234m
80-1.0DEG	80F×3.9m=312m	
100-1.0DEG	100F×3.9m=390m	

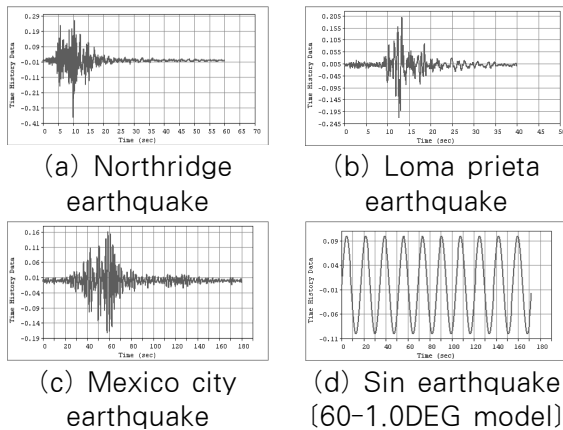
2.2 해석방법

본 연구에서는 TMD 설치에 따른 최상층 변위 응답을 분석하기 위해 시간이력해석법을 실시하였으며, Northridge(1994), Loma prieta(1989), Mexico city(1985)로 세 가지 역사지진파와 공진조화지진파를 X,Y축 양방향 가진하였다. 사용된 공진조화지진파는 고유치해석을 통한 각 해석모델별 1차 고유진동수를 이용하여 생성하였다. 네 가지의 지진파를 아래의 〈Fig. 3〉에 나타내었으며, 지반 가속도로 가진 후 TMD가 설치되지 않은 모델과 총 질량비를

변수로 설정한 TMD가 설치된 해석모델의 동적특성을 비교하였다. 그 중 층간변형률과 층 최대 변위 결과값을 분석하였으며, 층간변형률은 아래의 식(1)로 산정되었고 해석모델들은 철골 중간모멘트골조시스템으로 변위증폭계수 C_d 값은 4이며, 중요도 계수 I_E 값은 내진등급 I에 따라 1.2로 산정하였다.

$$\delta_x = \frac{C_d \delta_{xe}}{I_E} \quad (1)$$

허용 층간변형률은 건축물 내진설계기준⁷⁾에 명시된 내진등급 I에 따라 0.015로 제한하였다.



<Fig. 3> Acceleration graph of earthquake load

3. TMD 속성 및 설치 위치

3.1 TMD 구성원리 및 속성

동조질량감쇠기(Tuned Mass Dampers, TMD)는 구조물에 지진하중, 풍하중과 같이 수평하중이 작용하였을 때, 구조물이 외력과 반대 방향으로 거동하도록 작용하여 진동을 제어하는 진동제어장치이다.⁸⁾ 일반적인 TMD는 스프링, 감쇠장치, 질량체로 이루어져 있으며, 설계 시 TMD의 최적 감쇠비와 최적 진동수비에 따라서 TMD의 강성과 감쇠값이 산정된다. TMD를 설계하기 위해 상용 프로그램인 Midas Gen을 사용하였으며, 본 연구에서는 강성과 감쇠값을 모두 가지는 Spring&Linear Dashpot으로 설계하였다. Warbuton(1982)⁹⁾이 제안한 최적 감쇠비와 최적 진동수비 산정식을 사용하여 TMD의 강성과 감

$$\xi_d = \sqrt{\frac{\mu(1-\mu/4)}{4(1+\mu)(1-\mu/2)}}, (\mu = m_d/m_s) \quad (2)$$

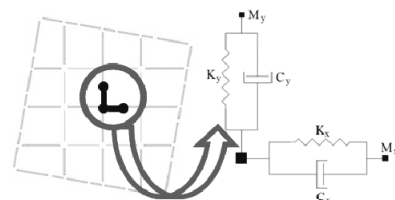
$$f_{opt} = \frac{\sqrt{1-\mu/2}}{1+\mu} \quad (3)$$

$$\begin{cases} K_d = \omega_d^2 m_d \\ C_d = 2 \xi_d \omega_d m_d \end{cases} \quad (4)$$

쇠값을 산정하였다. 여기서, μ 는 구조물과 TMD의 질량비를 의미하며, ξ_d 는 최적 감쇠비, f_{opt} 는 최적 진동수비, m_d 는 TMD의 질량, m_s 는 구조물의 질량, ω_d 는 TMD의 진동수를 의미한다. 식(2), (3)을 통해 도출된 값을 활용하여 총 질량비를 변수로 설정한 TMD에 대한 강성값인 K_d 와 감쇠값 C_d 를 도출할 수 있다.

3.2 TMD 설치 위치

고차모드가 지배적인 대공간 건축물의 경우 TMD의 총 질량비가 동일할 때, TMD를 분산 설치하는 것이 변위응답 제어 성능 효과가 우수할 수 있으나, 일반적인 고층 건축물의 경우 저차모드가 지배적이기 때문에 TMD의 분산 설치에 대한 변위응답 제어성능은 미미할 수 있다. 본 연구에서는 비틀린 비정형 건축물의 TMD 설치에 따른 변위응답 제어성능을 분석하기 위해 해석모델 최상층 중앙에 X,Y축 방향으로 총 2개의 TMD를 설치하였다. 또한, TMD 총 질량비를 1.0%부터 0.00625%까지 감소시켜 총 10개의 변수를 설정하여 TMD의 설치개수를 고정한 후 연구를 진행하였으며, TMD를 최상층에 설치 후 최대 층 변위 응답을 분석하였다. TMD의 설치 위치를 <Fig. 4>에 나타내었으며, <Table 2>에 60-1.0 DEG 해석모델에 설치된 TMD의 질량과 강성, 감쇠값을 나타내었다.



<Fig. 4> Example of TMD installation location

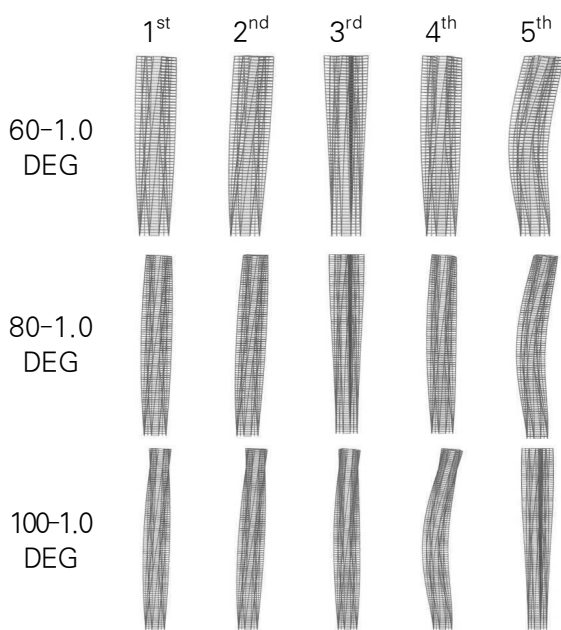
〈Table 2〉 Result value of TMD for 60-1.0DEG model

$\mu_{Total}(\%)$	$m_d(kN)$	$K_d(kN/m)$	$C_d(kN*sec/m)$
1.0%	2903.5	2173.90	177.32
0.9%	2613.15	1958.95	151.52
0.7%	2032.45	1527.43	104.10
0.5%	1451.75	1093.75	62.945
0.3%	871.05	657.89	29.30
0.1%	290.35	219.84	5.65
0.05%	145.18	109.99	1.99
0.025%	72.59	55.013	0.71
0.0125%	36.29	27.51	0.25
0.00625%	18.15	13.76	0.088

4. 모델별 결과 분석

4.1 고유치 해석

해석모델의 동적응답을 분석하기 전 고유치해석을 15차 모드까지 실시하였으며, 질량참여율이 90% 이상이 되는 모드 차수를 확인하였다. 60-1.0DEG 해석모델은 10차 모드에서 80-1.0DEG 해석모델과 100-1.0DEG 해석모델은 11차 모드에서 질량참여율이 90%를 초과하는 것을 확인하였다. 〈Table 3〉에 고유주기와 X방향 질량참여율이 80%를 초과한 5차 모드까지 나타내었으며, 〈Fig. 5〉는 5차 모드까지 모드형상을 나타내었다. 고유 진동주기를 분석하였을 때, 60-1.0DEG 해석



〈Fig. 5〉 Mode shape of analytical model

모델은 7.217초, 80-1.0DEG 해석모델은 11.706초, 100-1.0DEG 해석모델은 17.238초로 나타났다. 해석모델의 층수가 증가함에 따라 총 평면회전각도와 세장비가 증가하고 횡강성이 저하되어 고유주기가 증가하는 것으로 판단된다.

4.2 최대 층간변형률

세 가지 지진파에 대한 해석모델별 TMD의 총 질량비에 대한 최대 층간변형률 분석결과를 〈Fig. 6〉에 나타내었다. 해석모델 모두 TMD 설치 유무와 관계없이 Northridge 지진파와 Loma prieta 지진파에 대해서는 허용 층간변형률을 만족하였으며, Mexico city 지진파에 대해서는 모두 최대 층간변형률이 허용층간변형률을 초과하였다.

60-1.0DEG 해석모델의 경우 Northridge 지진파, Loma prieta 지진파, Mexico city 지진파에서 각각 총 질량비 0.05%, 0.5%, 0.1%의 TMD를 설치 시 높은 응답 저감성능을 보였다. 또한, 0.00625%의 TMD 설치 시 변위 응답 제어효과가 없는 것으로 나타났다.

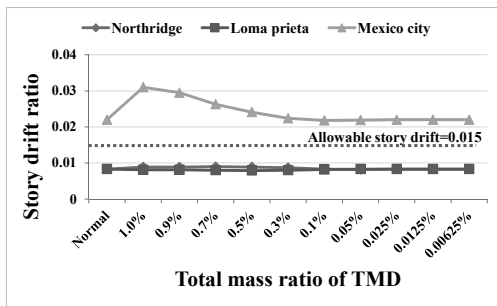
80-1.0DEG 해석모델에서는 Northridge 지진파와 Loma prieta 지진파에 대해서는 총 질량비 0.9%의 TMD 설치 시 최대 층간변형률 제어성능이 가장 우수하였다. Mexico city 지진파중에서는 총 질량비 1.0% TMD 설치 시 제어성능이 우수하였으며, TMD의 총 질량비가 감소할수록 최대 층간변형률 제어성능은 감소하였다.

100-1.0DEG 해석모델의 경우 Northridge 지

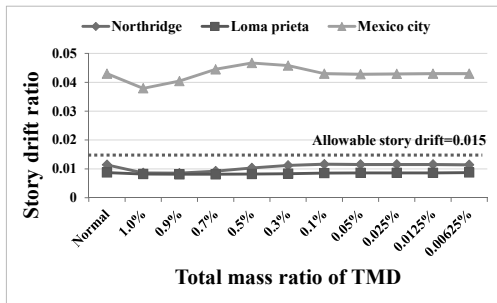
〈Table 3〉 Period by analytical model

Mode	60-1.0DEG	80-1.0DEG	100-1.0DEG
1 st	7.217 (3.2961)	11.706 (8.886)	17.238 (13.7354)
2 nd	7.186 (64.8746)	11.664 (64.6789)	17.183 (64.3622)
3 rd	1.971 (64.8746)	2.604 (64.6789)	3.611 (64.3679)
4 th	1.574 (64.9027)	2.523 (64.7961)	3.597 (82.4282)
5 th	1.5695 (82.4365)	2.5142 (82.367)	3.2377 (82.4282)

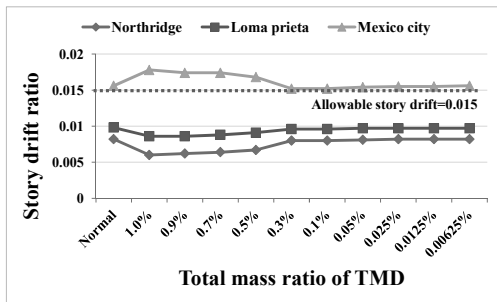
Unit : sec(x-dir. modal participation mass sum : %)



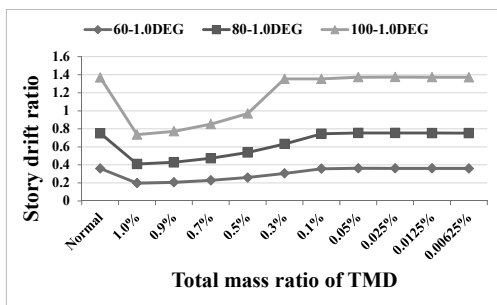
(a) 60-1.0DEG



(b) 80-1.0DEG



(c) 100-1.0DEG



(d) Sin earthquake
 <Fig. 6> Story drift ratio

진파와 Loma prieta 지진파에 의한 최대 층간변형률의 경우 설치된 TMD의 총 질량비가 증가함에 따라 높은 저감 성능을 보였으며, 총 질량비 1.0% TMD 설치 시 가장 높은 최대 층간변형률 제어성능이 나타났다. Mexico city 지진파에 의한 최대 층간변형률의 경우 총 질량비 0.3% TMD 설치 시 높은 저감성능을 보였다.

Sin 지진파의 경우 세 가지 해석모델 모두 TMD

의 총 질량비가 증가할수록 층간변형률 감소율이 증가하는 양상이 나타났다. 총 질량비 1.0% TMD를 설치하였을 때 60-1.0DEG, 80-1.0DEG, 100-1.0DEG 해석모델 순서로 44.39%, 45.25%, 46.22% 감소율이 나타났으며, 구조물의 규모에 따른 비정형성이 증가함에도 불구하고 응답 감소율이 증가하였다.

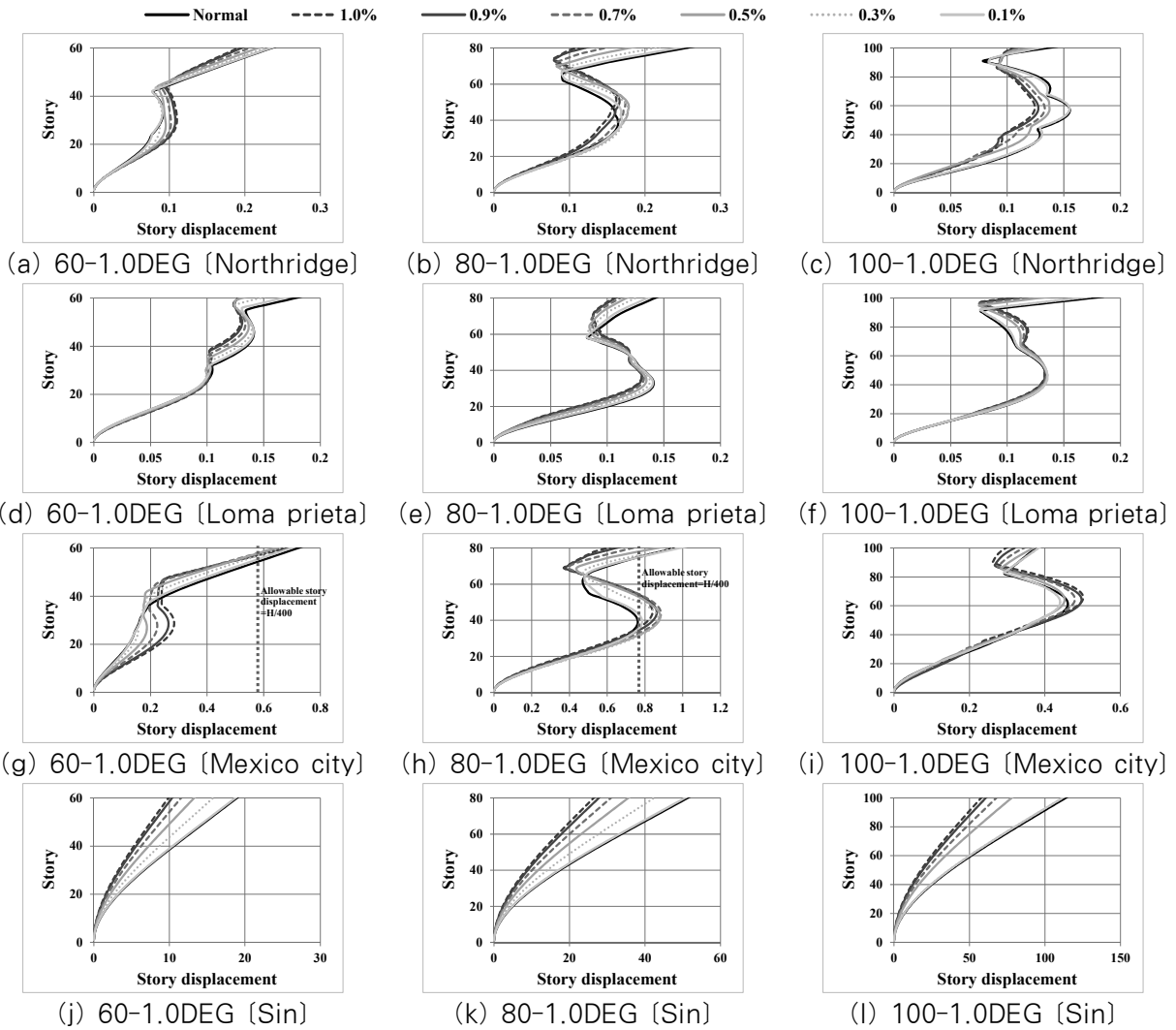
4.3 층 변위

<Fig. 7>은 세 가지 해석모델에 대한 TMD의 총 질량비에 따른 각 층별 최대 변위를 나타내었다. 해석모델의 층 변위 분석 결과 총 질량비가 0.05% 이하의 TMD가 설치된 해석모델들은 TMD를 설치하지 않은 모델과 근사한 응답이 나타났으며, TMD에 의한 변위 응답 제어성능이 미미하다고 판단되어 해당 그래프에서는 제외하였다. 또한, 지진하중에 대한 해석모델의 각 층별 최대 변위 값을 비교 분석하기 전 수평 변위 한계치를 ASCE 7-22¹⁰⁾를 참고하여 H/400으로 선정하였다.

층별 최대 변위 분석 결과, 60-1.0DEG 해석모델은 Northridge 지진파에서 TMD를 설치하지 않은 해석모델보다 총 질량 1.0%의 TMD를 설치하였을 때 4층부터 44층까지 층 최대 변위는 증가하였다. Loma prieta 지진파의 경우 TMD의 총 질량비가 증가함에 따라 층 변위 응답이 전반적으로 감소하는 양상이 나타났다. 또한, Mexico city 지진파에서는 TMD의 총 질량비가 증가할수록 중층부에서 층 최대 변위가 최대 0.1305m(88.3%) 증가하였다.

80-1.0DEG 해석모델의 경우 Northridge 지진파와 Loma prieta 지진파에 대하여 TMD의 총 질량비가 증가할수록 TMD 설치 전 해석모델에 비해 전반적으로 층 변위 응답이 감소하는 양상이 나타났다. 그러나 Mexico city 지진파에 대한 층별 최대 변위는 TMD의 총 질량비가 0.5% 이상인 해석모델이 TMD 설치 전 해석모델에 비해 중층부에서 오히려 응답이 증가하는 양상이 나타났다.

100-1.0DEG 해석모델의 경우 Northridge 지진파와 Mexico city 지진파에서 모두 TMD 설치 유무와 관계없이 모든 해석모델이 중층부에서 최대 층 변위가 나타났다. 이는 구조물의 비정형성에 따른 고차모



〈Fig. 7〉 Story displacement by analytical model

드에 대한 영향성과 지진파의 상관성 및 해석모델의 낮은 코어 면적으로 인해 강성이 저하되어 하부층에서 층 최대 변위가 증가한 것으로 판단된다. Sin 지진파에 대한 층 변위는 해석모델 모두 TMD의 총 질량비가 증가할수록 감소하는 양상이 나타났다. 또한, 60-1.0DEG, 80-1.0DEG 해석모델에서는 TMD의 총 질량비 0.05%, 100-1.0DEG 해석모델의 경우 TMD의 총 질량비가 0.025% 이하로 감소할수록 층 최대 변위 값이 증가하는 양상이 나타났다. 세 가지 지진파에 대한 Twisted 형상 해석모델의 TMD 설치에 따른 층 변위응답 분석 결과, TMD 설치 시 최상층 변위는 전반적으로 감소하였으나, 일부 해석모델에서 중하부층의 변위응답이 증가하는 양상이 나타났다. 1차 진동모드의 고유 진동수를 기반으로 설계된 TMD가 지진발생 시 구조물의

진동수 변화에 효과적으로 반응하지 못한 것으로 판단되며, 고차 진동모드를 고려한 위치에 TMD를 추가로 설치하여 변위응답 제어를 실시할 필요가 있을 것으로 판단된다.

4.4 최상층 변위

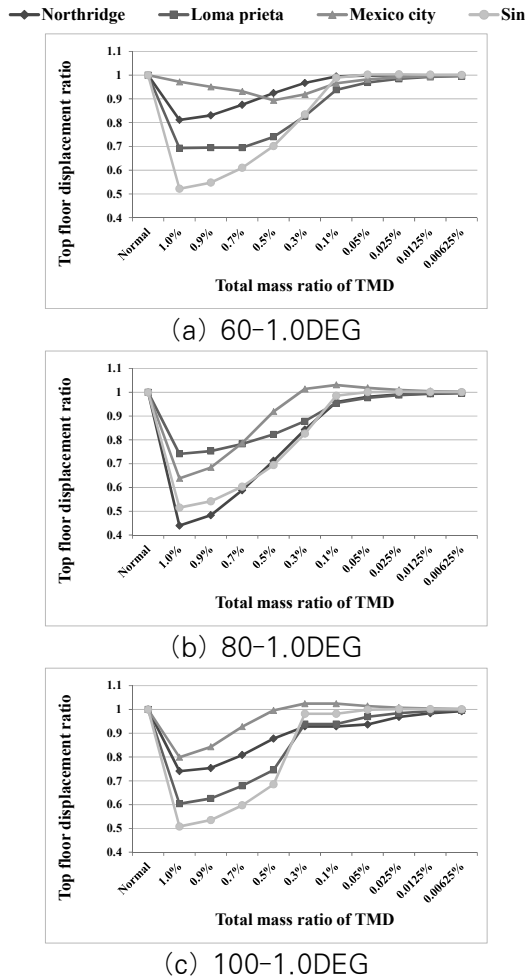
지진파에 대한 최상층 변위를 비교 분석하기 위해 TMD가 설치되지 않은 해석모델을 기준으로 최상층 변위비 그래프를 〈Fig. 8〉과 같이 도식화하였으며, 해석모델별 최상층 변위 응답 저감능이 가장 우수한 TMD의 총 질량비 및 최상층 변위 감소율을 〈Table 4〉에 나타내었다.

최상층 변위 분석결과, 60-1.0DEG 해석모델의 경우

Northridge, Loma prieta, Mexico city, Sin 지진파에 대하여 TMD 설치 전 각각 0.2446m, 0.1869m, 0.7466m, 19.3638m로 나타났다. TMD 설치 후 최상층 변위는 최대 0.1985m, 0.1295m, 0.7258m, 10.1023m로 감소하였으며, 감소율이 각각 18.85%, 30.71%, 10.58%, 47.83%로 나타났다. 80-1.0DEG 해석모델의 경우, TMD 설치

전 최상층 변위는 0.2675m, 0.1457m, 0.9966m, 52.1875m로 나타났으며, TMD 설치 후 0.1175m, 0.108m, 0.636m, 26.8819m로 각각 56.07%, 25.88%, 36.18%, 48.49% 감소하였다. 100-1.0 DEG 해석모델은 0.1446m, 0.185m, 0.3794m, 115.265m에서 TMD 설치 후 0.1071m, 0.1116m, 0.3032m, 58.5366m로 25.93%, 39.68%, 20.08%, 49.22% 감소하였다.

Mexico city 지진파에 대한 총질량비 0.5%의 TMD가 설치된 60-1.0DEG 해석모델을 제외한 해석모델의 경우 모두 총 질량비 1.0%의 TMD 설치 시 변위 응답 제어성능이 가장 효과적으로 나타났다. 이는 TMD의 총 질량비가 증가할수록 변위 응답 제어성능이 확보될 수 있다고 판단된다.



(Fig. 8) Top floor displacement ratio

(Table 4) Reduction ratio of top floor displacement

	North ridge	Loma prieta	Mexico city	Sin
60-1.0D EG	18.85 (1.0%)	30.71 (1.0%)	10.58 (0.5%)	47.83 (1.0%)
80-1.0D EG	56.07 (1.0%)	25.88 (1.0%)	36.18 (1.0%)	48.49 (1.0%)
100-1.0D EG	25.93 (1.0%)	39.68 (1.0%)	20.08 (1.0%)	49.22 (1.0%)

Unit : % (TMD mass ratio : %)

5. 결론

본 연구에서는 진동제어 장치인 동조질량감쇠기의 총 질량비를 변수로 Twisted 형상 비정형 해석모델에 적용하여 변위응답 분석을 진행하였으며, 결과는 다음과 같다.

1) 높이에 따른 해석모델(60F, 80F, 100F)의 최대 층간변형률 분석 결과, 역사지진파에 의한 최대 층간변형률 응답 감소율이 뛰어난 TMD의 총 질량비는 상이하게 나타났으며, 각 지진하중에 따른 해석모델에서 총 질량비 1.0%(3건), 0.9%(2건), 0.5%(1건), 0.3%(1건), 0.1%(1건), 0.05%(1건) TMD 설치 시 높은 응답감소율을 보였다. Sin 지진파에 의한 응답감소율은 총 질량비가 1.0% TMD 설치 시 감소율이 우수하였으며, 총 질량비 0.05% 이하의 TMD 설치 시 오히려 응답 제어성능이 상실되는 것으로 나타났다. 이는 설치되는 TMD의 총 질량비가 상승함에 따라 층간변형률 제어성능을 확보할 수 있다고 판단된다.

2) 높이에 따른 해석모델의 최상층에 TMD를 설치하여 지진파에 대한 층 변위 응답을 분석한 결과, 일부 해석모델에서는 최상층 변위는 감소하나 중하부층에서 변위 응답이 증폭되는 양상이 나타났다. 해석모델의 낮은 코어 면적으로 인해 횡강성이 저하되어 중하부층에서 층 변위가 증가한 것으로 판단되며, 고차 진동모드를 고려한 위치에 TMD를 추가로 설치하여 변위 응답 제어를 실시할 필요가 있을 것으로 판단된다.

3) 최상층 변위 분석 결과, 60-1.0DEG 해석 모델에서 Mexico city 지진파를 제외한 모든 해석모델의 최상층 변위 응답 제어성능은 총 질량비 1.0%의 TMD를 설치하였을 때 가장 효과적인 것으로 나타났다. 해석모델의 규모와는 무관하게 TMD의 총 질량비가 증가할수록 변위 응답 제어 성능이 우수할 것으로 판단된다.

4) Twisted 비정형 구조물의 경우 Mexico city 지진파에 의한 60-1.0DEG 해석모델을 제외한 모든 경우에서 설치된 TMD의 총 질량비가 증가할수록 변위 응답 제어성능이 우수하였으며, 선행연구를 통한 일반 정형적 형상을 가지는 구조물의 결과와 동일하게 나타났다. 이는 TMD 설치 시 비정형성에 대한 영향성이 미미하다고 판단된다.

추후 연구에서는 풍하중에 대한 Twisted 비정형 구조물의 TMD 적용에 따른 변위 응답 평가에 관한 연구를 수행할 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2023R1A2C1002542)

References

1. Jung, K. T., "Atypical Facade Design Elements and Structural Systems in High-rise Buildings" Journal of the regional association of architectural institute of korea, Vol.25, No.4, pp.37~44, 2023
2. Kim, C. K., Choi, H. C., & Lee, Y. J., "Computational Design of Freeform Tall Buildings", Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol.27 No.4, pp.7~19, 2014
3. Khan, U. H., Baig, M. A., " Behaviour of Tall Buildings using Tuned Mass Dampers", International Journal of Engineering Research & Technology, Vol.9 No.9, pp.84~94, 2020

- DOI:<https://doi.org/10.17577/IJERTV9IS090069>
4. Lee, D. H., Kim, H. S. & Kang, J. W., "Analysis of the Static Characteristics of High-Rise Structure With Twisted Shape", Journal of the Korean Association for Spatial Structure, Vol.20 No.4, pp.93~100, 2020
DOI:<https://doi.org/10.9712/KASS.2020.20.4.93>
 5. Lee, Y. R.(2021), " Optimal Design of Tuned Mass Damper for Seismic Response Control of Large Spatial Structures(Doctor's thesis)". Yeungnam University, Republic of Korea
 6. Lee, D. H. (2021). "Analysis of Static and Dynamic Response Characteristics of High-Rise Structures with Twisted Shapes (Master's thesis)". Yeungnam University, Republic of Korea.
 7. Architectural Institute of Korea, Korean Design Standard(KDS 41 17 00 : 2022),2022
 8. Kim, J. M.(2023). "Seismic Response Characteristics of Dome Structures by Number and Location of TMD Installation (Master's thesis)". Yeungnam University, Republic of Korea.
 9. Warbuton, G.B, "Optimum absorber parameters for various combination of response and excitation parameters", Earthquake Engineering Structural Dynamics, Vol.10, pp.381~401, 1982
DOI:<https://doi.org/10.1002/eqe.4290100304>
 10. American Society of Civil Engineers, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE 7-22),2021

- Received : February 16, 2024
- Revised : February 19, 2024
- Accepted : February 21, 2024