ISSN 1598-4095 (Print)
ISSN 2287-7401 (Online)
http://dx.doi.org/10.9712/KASS.2016.16.1.095

Journal of Korean Association for Spatial Structures
Vol. 16, No. 1 (통권 63호), pp.95~104, March, 2016

아웃리거 댐퍼시스템의 고층건물 지진응답제어 성능 평가

Evaluation of Vibration Control Performance of Outrigger Damper System for Tall Buildings Subjected to Seismic Load

윤 성 욱* 이 령 경* 김 광 일** 김 현 수*** 강 주 원****
Yoon, Sung-Wook Lee, Lyeong-Kyeong Kim, Kwang-Il Kim, Hyun-Su Kang, Joo-Won

Abstract

Recently, the concept of damped outrigger system has been proposed for tall buildings. But, structural characteristics and design method of this system were not sufficiently investigated to date. In this study, the dynamic response control performance of outrigger damper has been analyzed. To this end, a simplified analysis model with outrigger damper system has been developed. Use the El Centro seismic(1940, NS) analysis was performed. Analysis results, on the top floor displacement response to the earthquake response, did not have a big effect. However, acceleration response control effect was found to be excellent. The increase of outrigger damper capacity usually results in the improved control performance. However, it is necessary to select that proper stiffness and damping values of the outrigger damper system because, the outrigger damper having large capacity is result in heavy financial burden.

Keywords : Outrigger damper system, Seismic response, Dynamic response control, Time history analysis

1. 서론

전 세계적으로 초고층 빌딩은 도심지의 높은 지가와 초고층이 가지는 이미지 때문에 미국 등 선진국에 이어 중국, 아랍에밀리트, 한국 등에서 경쟁적으로 건립 혹은 계획되고 있다. 이러한 초고층 빌딩의 설계 및 시공에서 가장 중요한 요소로 결정되는 것이 구조시스템이다[1].

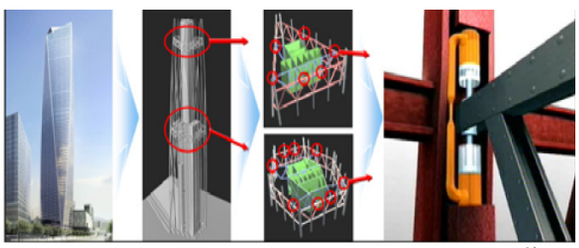
아웃리거 시스템은 전 세계적으로 초고층 구조물에 대한 가장 경제적인 구조시스템으로 각광받고 있으며 일반적으로 알려져 있는 60층 규모를 훨씬 넘어선 100층 이상의 규모에도 효과적으로 적용되고 있다[2]. 아웃리거 시스템은 중앙부 코어와 외부 기둥을 아웃리거라는 매우 높은 강성을 지닌 구조체로 연결하는 것으로 태풍 및 지진 등의 횡력 작용 시 이를 외부 수직 부재에 인장과 압축력으로 전달하며 횡력에 복합적으로 저항하게 된다. 하지만 코어와 외부 기둥 간의 부등축소량 발생으로 추가적인 응력이 발생하는 등 구조시스템의 설계 및 시공에 상당한 어려움 또한 있다[3].

이러한 아웃리거에 관한 연구로 김병전 등[4]은 건축물의 풍진동 제어를 위한 아웃리거 댐퍼 시스템의 설계에 대한 연구를 위하여 강성과 감쇠가 복합적으로 거동하면서 발생하는 아웃리거 댐퍼 시스템의 응답특성을 검토하였고 아웃리거 댐퍼의 최적위치와 적정용량을 찾기 위한 연구를 수행하였으며, Chen 등[5]은 아웃리거 댐퍼 시스템이 설치된 고층건물의 해석기법을 제안하였고 이를 바탕으로 아웃리거 댐퍼의 최적설치위치 및 적정용량을 설계할 수 있는 디자인 커브를 제안하였다.

최근에는 아웃리거 시스템의 횡방향 동적응답 제어성능을 더욱 향상시키기 위하여 <Fig. 1>과 같이

* 정회원, 영남대학교 대학원 건축학과, 석사과정
Dept. of Architecture, Grad. School, Yeungnam University
** 정회원, 영남대학교 대학원 건축학과, 박사수료
Dept. of Architecture, Grad. School, Yeungnam University
*** 정회원, 선문대학교 건축사회환경학부 부교수, 공학박사
Div. of Architecture, Architectural & Civil Engineering, Sunmoon University.
****교신저자, 종신회원, 영남대학교 건축학과 교수, 공학박사
School of Architecture, Yeungnam University
Tel: 053-810-2429 Fax: 031-810-4625
E-mail: kangj@ynu.ac.kr

아웃리거 단부에 댐퍼를 설치하여 구조물의 감쇠성능을 증가시키는 아웃리거 댐퍼시스템이 제안되었다. 아웃리거 댐퍼가 실제로 적용된 사례는 국내외적으로 많지 않으며, 국내에 아웃리거 댐퍼가 적용된 동북아무역센터 NEATT의 경우에는 아웃리거 댐퍼의 설치목적이 구조물의 감쇠성능을 증가시키는 것 보다 코어 전단벽과 외곽기둥의 부등축소로 인해 발생하는 아웃리거와 외곽기둥 접합부의 응력을 흡수하는데 주목적이 있었다.



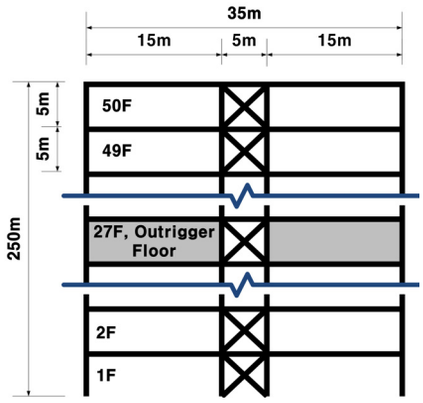
〈Fig. 1〉 Outrigger damper of NEATT[3)]

기존의 아웃리거 시스템은 동적응답이 구조물의 강성분포에만 의존한다. 그러나 아웃리거 댐퍼시스템은 강성과 감쇠가 복합적으로 거동하므로 최적설계의 어려움이 있다. 아웃리거 댐퍼시스템에 관한 연구는 전 세계적으로 아직 초기 단계에 있기 때문에 기존에 수행된 아웃리거 댐퍼시스템의 제어성능 분석이나 해석 및 설계에 관련된 연구는 많지 않다[6)]. 이러한 배경을 바탕으로 본 연구에서는 상용프로그램을 이용하여 지진하중을 받는 고층건물을 대상으로 아웃리거 댐퍼시스템의 지진응답 제어성능을 검토하고 그 성능을 분석하고자 한다.

2. 해석 모델

2.1 해석모델 개요

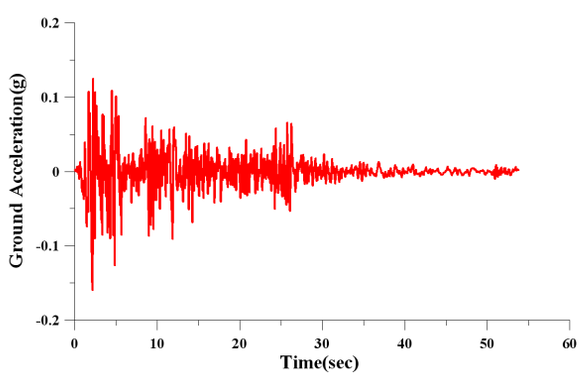
본 해석에서는 지진하중을 받는 고층건물에 대한 아웃리거 댐퍼시스템의 동적응답 제어성능을 검토하기 위하여 <Fig. 2>에 나타낸 바와 같이 아웃리거 댐퍼 해석 모델을 사용하였다. 아웃리거의 위치는 기존 연구[7)]에서 나온 아웃리거 시스템의 최적 위치인 0.525h에 고정하여 입력하였으며, 해석모델의 일반사항은 <Table 1>과 같다.



〈Fig. 2〉 Analytical model

〈Table 1〉 Specification of analytical model

Variables		Specification
Hight		5m × 50story = 250m
Principal plane		XZ plane
Core	Width	5m
	Structure	Truss
Material		SS400
Outrigger	Thickness	0.2m
	Structure	Flat board
	Location	0.525h = 135m (27F)
Section	Column	H 700 × 300 × 13 / 24
	Beam	H 800 × 300 × 14 / 26
Main mode period	1st mode	4.518 sec
	2nd mode	1.232 sec
	3rd mode	0.605 sec
Slenderness ratio		1:7



〈Fig. 3〉 Earthquake time history (El Centro, 1940, NS)

입력 지진하중은 1940년에 캘리포니아에서 관측된 El Centro(1940, NS) 지진파를 이용하여 입력하였으며 해석모델의 X축 방향으로 가하였다. 지진하

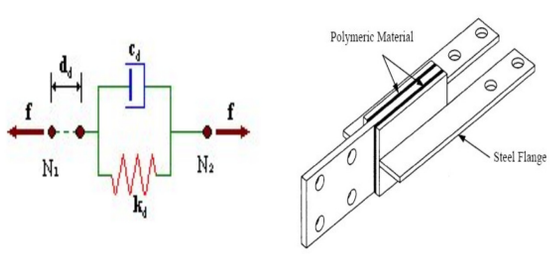
중의 입력 시 0.1초 간격 End time 30초로 지진하중을 입력하였다. 본 연구에서 입력한 지진하중의 시간이력을 <Fig. 3>에 나타내었다.

2.2 모델링 및 분석방법

본 연구에서는 상용프로그램(Midas Gen Ver 795)을 사용하여 해석을 수행하였으며, 해석모델에 지진하중을 입력하여 시간이력해석을 수행하였으며, 댐퍼의 감쇠(C_d)값 및 강성(K_d)값의 변화에 따라 최상층의 최대 변위 및 RMS 변위 응답, 최대 가속도 및 RMS 가속도 응답을 구하여 비교 분석하였다.

아웃리거 댐퍼시스템의 댐퍼 속성을 점탄성 댐퍼(Viscoelastic Damper)로 사용하였다. 점탄성 댐퍼는 부등축소와 같은 정적하중에 의한 변형이 발생할 경우 충진재가 좁은 배관을 천천히 흐르며 부가적인 응력을 발생시키지 않고, 지진이나 바람으로 인한 동적하중으로 인한 변형이 발생할 경우 좁은 배관에서 충진재의 흐름이 제어가 되어 댐퍼의 강성이 증가하며 접합부가 일체 거동을 하도록 한다.

해석 변수로는 댐퍼의 감쇠(C_d)와 강성(K_d)로 하여 점탄성 댐퍼 속성을 입력하였다. 댐퍼 유형은 점탄성 댐퍼(Viscoelastic Damper)의 Kelvin(Voigt) Model을 사용하였으며 Kelvin Model은 아래 <Fig. 4>와 같이 선형스프링과 점성감쇠가 병렬로 연결된 모델로서 Solid Viscoelastic Device의 해석에 사용된다.



〈Fig. 4〉 Kelvin(Voigt) model

힘-변형 관계식은 식 (1)과 같으며 우변의 모든 항이 기지값이므로 아래 식을 직접 풀어 점탄성 댐퍼에 작용하는 힘을 구할 수 있다. 해석시 점탄성 댐퍼의 강성(K_d)값과 점탄성 댐퍼의 감쇠 상수(C_d)값을 변수로 사용하였으며, 참조 속도(V_0)와 점탄성 댐퍼의 비선형점성감쇠 특성 상수(s)는 1.0으로 고정하여 모델링을 진행하였다.

$$f = K_d d + C_d sign(\dot{d}) \left| \frac{\dot{d}}{V_o} \right|^s \quad (1)$$

여기서,

K_d(Damper Stiffness) = 점탄성 댐퍼의 강성

C_d(Damping) = 점탄성 댐퍼의 감쇠 상수

V_0(Reference Velocity) = 참조 속도

s(Damping Exponent) = 점탄성 댐퍼의 비선형 점성감쇠 특성을 정의하는 상수

국내의 송도 NEATT의 경우 10,000kN· sec/m, 8,000kN· sec/m, 6,000kN· sec/m의 세 가지 타입의 아웃리거 댐퍼를 설치하였다. 본 논문에서는 해석모델의 높이와 댐퍼 개수를 고려하여 최대 3,000 kN· sec/m의 댐퍼를 모델링하여 해석을 수행하였다. 아웃리거가 설치되지 않은 NOR50모델과 아웃리거만 설치된 OR50-0모델 두 모델을 기본모델로 두고, 댐퍼의 감쇠값에 따른 동적응답 저감성능을 검토하기 위하여 <Table 2>와 같이 감쇠범위 200~3,000kN·sec/m로 하여 강성(K_d)값 500, 1,000, 1,500, 2,000kN/m에 대한 네 가지 해석모델을 사용하여 분석하였다.

〈Table 2〉 Analysis model with changes in damping value

Model	Outrigger presence	Outrigger damper presence	Damper stiffness value kN/m	Changes in damping value kN·sec/m
NOR50	-	-	-	-
OR50-0	O			
ORD50-A		O	500	200~3,000
ORD50-B			1,000	
ORD50-C			1,500	
ORD50-D			2,000	

또한 <Table 3>과 같이 댐퍼의 강성값의 변화에

따른 동적응답 저감성능을 검토하기 위하여 강성범위 200~3,000kN/m로 하여 감쇠(C_d)값 1,000, 1,500, 2,000, 2,500kN·sec/m에 대한 네 가지 모델을 사용하여 해석을 수행하였다.

〈Table 3〉 Analysis model with changes in stiffness value

Model	Outrigger presence	Outrigger damper presence	Damper damping value kN·sec/m	Changes in stiffness value kN/m
NOR50	-	-	-	-
OR50-0				
ORD50-E	O	O	1,000	200~3,000
ORD50-F			1,500	
ORD50-G			2,000	
ORD50-H			2,500	

3. 해석 결과 및 분석

3.1 기본모델 동적응답

지진하중을 받는 아웃리거가 설치되지 않은 NOR50모델과 아웃리거만 설치된 OR50-0모델의 최상층 동적응답은 <Table 4>와 같다.

〈Table 4〉 Dynamic response of the basic model the top floor

Model	Maximum displacement		Displacement RMS		Maximum acceleration		Acceleration RMS	
	data (m)	ratio (%)	data (m)	ratio (%)	data (m/sec^2)	ratio (%)	data (m/sec^2)	ratio (%)
NOR50	0.637	112.9	0.296	119.4	6.934	111.4	1.668	92.4
OR50-0	0.564	100	0.248	100	6.226	100	1.806	100

기본모델에 대한 해석 결과, 아웃리거가 설치되지 않은 NOR50모델 대비 아웃리거만 설치된 OR50-0 모델이 최대 수평변위 응답에 대하여 12.9%, RMS 변위 응답에 대하여 19.4%, 최대 수평가속도 응답에 대하여 11.4% 응답 저감효과를 나타냈으며, RMS 가속도 응답의 경우 NOR50모델이 7.6% 작은 응답을 나타내었다.

3.2 감쇠값에 따른 최상층 동적응답

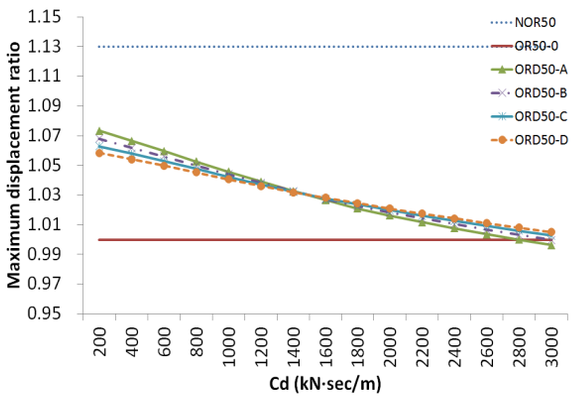
지진하중을 받는 해석모델에서 아웃리거 댐퍼의 감쇠(C_d)에 따른 최상층의 최대 수평변위 응답을 <Table 5>에 나타내었다. 아웃리거 댐퍼가 설치된 모델은 모두 댐퍼의 감쇠 증가에 따라 최상층 변위 응답이 점차 감소하지만 아웃리거만 설치된 모델보다 큰 응답을 보인다. 각 모델의 강성의 증가에 따른 지진하중에 따른 최상층 최대 수평변위 응답에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

〈Table 5〉 Maximum displacement based on the damping value (unit : m)

C_d \ Model	ORD50-A	ORD50-B	ORD50-C	ORD50-D
200	0.605	0.602	0.599	0.597
400	0.601	0.599	0.597	0.594
600	0.598	0.596	0.594	0.592
800	0.594	0.592	0.591	0.589
1,000	0.590	0.589	0.588	0.587
1.200	0.586	0.586	0.585	0.584
1,400	0.582	0.582	0.582	0.582
1,600	0.579	0.579	0.580	0.580
1,800	0.576	0.577	0.577	0.578
2,000	0.573	0.574	0.575	0.576
2,200	0.571	0.572	0.573	0.574
2,400	0.568	0.570	0.571	0.572
2,600	0.566	0.568	0.569	0.570
2,800	0.564	0.566	0.567	0.568
3,000	0.562	0.564	0.565	0.567

<Fig. 5>는 OR50-0모델을 기준으로 최상층 최대 변위 응답에 대한 비를 나타낸 그래프이다. 아웃리거가 설치되지 않은 NOR50모델 대비 아웃리거만 설치된 OR50-0모델은 13%의 변위 응답 제어 성능이 향상되었다. 최소값은 ORD50-A모델의 감쇠(C_d)값이 3,000kN·sec/m일 때 0.562로 아웃리거만 설치된 OR50-0모델과 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 그래프의 양상을 보면 감쇠값 200~1,200 kN·sec/m의 범위에서는 강성값이 큰 모델이 더 작은 응답을 나타내며, 1,200~3,000kN·sec/m의 범위에서는 반대로 강성값이 작은 모델이 더 작은 응답을 나타낸다. 감쇠값이 작은 경우에는 강성값이 큰 모델이 응답저감에 유리하고 감쇠값이 큰 경우

에는 강성값이 작은 모델이 유리한 것으로 판단된다. 감쇠값의 증가에 따라 지진응답에 대한 최상층 최대 변위 응답이 감소하는 양상을 나타내지만, 아웃리거만 설치된 OR50-0모델 대비 최상층 최대 변위 응답 제어에는 효과가 없는 것으로 나타났다.

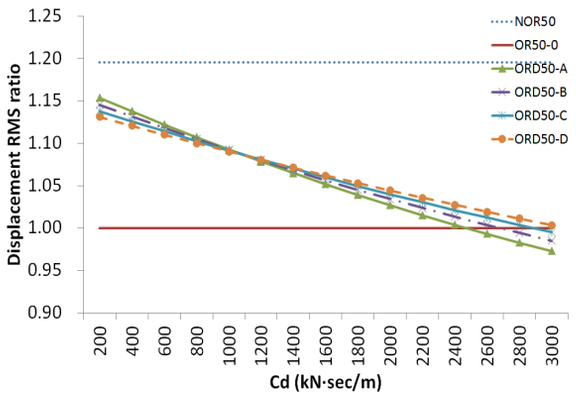


〈Fig. 5〉 Maximum displacement ratio based on the damping value

<Table 6>은 최상층 RMS 변위 응답을 나타낸 표이다. 최상층 변위 응답 대비 55% 낮은 응답을 나타내며, 감쇠값의 증가에 따라 RMS 변위 응답이 감소하는 양상을 나타내고 있다.

〈Table 6〉 Displacement RMS based on the damping value (unit : m)

Model / C_d	ORD50-A	ORD50-B	ORD50-C	ORD50-D
200	0.286	0.284	0.282	0.280
400	0.282	0.280	0.279	0.278
600	0.278	0.277	0.276	0.275
800	0.274	0.274	0.273	0.273
1,000	0.271	0.271	0.271	0.270
1.200	0.267	0.268	0.268	0.268
1,400	0.264	0.265	0.265	0.265
1,600	0.261	0.262	0.263	0.263
1,800	0.257	0.259	0.260	0.261
2,000	0.254	0.256	0.258	0.259
2,200	0.252	0.254	0.255	0.257
2,400	0.249	0.251	0.253	0.255
2,600	0.246	0.249	0.251	0.253
2,800	0.244	0.246	0.249	0.251
3,000	0.241	0.244	0.247	0.249



〈Fig. 6〉 Displacement RMS ratio based on the damping value

<Fig. 6>은 지진하중을 받는 모델들의 최상층 RMS 변위 응답을 OR50-0모델을 기준으로 그에 대한 비로 나타낸 그래프이다. 최상층 최대 수평 변위 응답 그래프와 마찬가지로 감쇠값 1,200kN·sec/m에서 교차하는 비슷한 양상을 나타내고 있다. ORD50-A모델의 경우 <Fig. 5>에서는 감쇠값 3,000 kN·sec/m에서 OR50-0모델보다 작은 응답을 보였으나 <Fig. 6>의 최상층 RMS 변위 응답에 대해서는 감쇠값 2,600kN·sec/m부터 더 작은 응답을 나타내고 있다. 지진하중을 받는 고층건물에 대하여 아웃리거 댐퍼 시스템의 강성값이 낮고 감쇠값이 높을수록 최상층 최대 변위 응답 저감에 더욱 효율적인 것으로 판단된다.

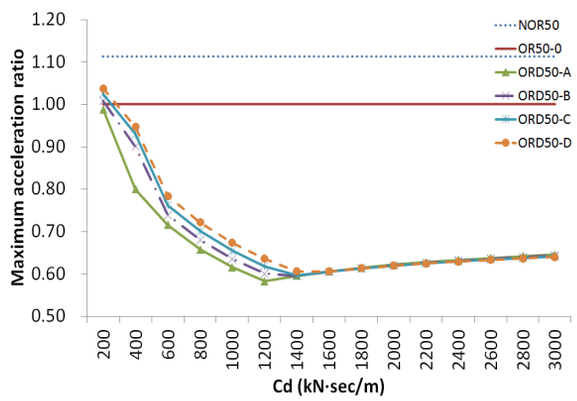
해석모델의 최상층 최대 수평가속도 응답을 <Table 7>에 나타내었다. 모든 해석 모델이 감쇠값의 증가에 따라 최대 수평가속도 응답이 크게 저감되는 양상을 나타낸다. 최소값은 강성값이 가장 작은 ORD50-A모델의 감쇠값 1,200kN·sec/m에서 나타났으며, 최대값은 강성값이 가장 큰 ORD50-D 모델의 감쇠값 200kN·sec/m에서 나타났다.

<Fig. 7>은 최상층 최대 수평가속도 응답을 아웃리거만 설치된 OR500모델을 기준으로 그에 대한 비율로 나타낸 그래프이다. 아웃리거 댐퍼 시스템이 적용된 ORD50-A, ORD50-B, ORD50-C, ORD50-D 모델의 경우 감쇠값 200kN·sec/m에서는 OR50-0 모델보다 높은 응답을 보였으나 감쇠값의 증가에 따라 가속도 응답이 크게 감소하고, 감쇠값 1,400 kN·sec/m부터 모델에 상관없이 비슷한 값을 나타

내고 있다. 가속도 응답 저감효과는 기존 아웃리거 시스템 대비 최대 40%의 효과를 나타낸다.

〈Table 7〉 Maximum acceleration based on the damping value (unit : $m/\sec^2$)

C_d \ Model	ORD50 -A	ORD50 -B	ORD50 -C	ORD50 -D
200	6.153	6.280	6.381	6.460
400	4.978	5.608	5.790	5.895
600	4.455	4.602	4.745	4.883
800	4.098	4.234	4.365	4.493
1,000	3.835	3.957	4.077	4.196
1.200	3.631	3.742	3.851	3.961
1,400	3.710	3.709	3.713	3.772
1,600	3.775	3.771	3.771	3.775
1,800	3.828	3.822	3.819	3.820
2,000	3.872	3.864	3.860	3.857
2,200	3.910	3.900	3.894	3.890
2,400	3.943	3.931	3.923	3.918
2,600	3.972	3.959	3.949	3.942
2,800	3.998	3.983	3.972	3.964
3,000	4.021	4.005	3.993	3.984



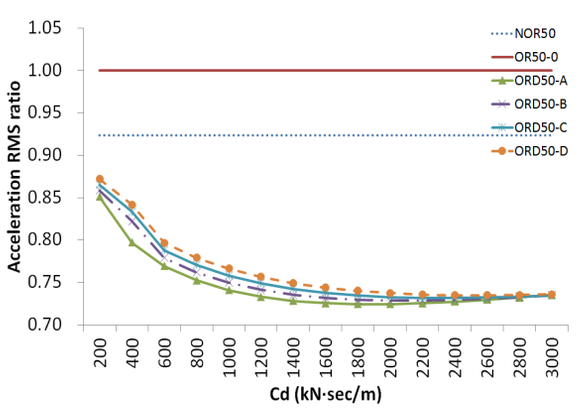
〈Fig. 7〉 Maximum acceleration ratio based on the damping value

<Table 8>은 최상층 RMS 가속도 응답 데이터를 나타낸 표이다. 시간에 따른 RMS 가속도 응답은 최대 가속도 응답의 33.7%의 응답을 나타낸다. 최대 수평 가속도 응답과는 다르게 감쇠값이 작은 구간에 아웃리거만 설치된 OR50-0모델보다 더 작은 RMS 가속도 응답을 나타낸다. 최대 가속도 응답과 마찬가지로 감쇠값의 증가에 따라 가속도 응답이 줄어드는 경향을 보인다.

<Fig. 8>은 감쇠값에 따른 최상층 RMS 가속도 응답을 아웃리거만 설치된 OR50-0모델을 기준으로 그에 대한 비를 나타낸 그래프이다. 최소값은 모델 ORD50-A의 감쇠값 2,000kN·sec/m에서 1.308 $m/\sec^2$로 OR50-0모델 대비 27.6% 가속도 응답 저감 효과를 나타낸다.

〈Table 8〉 Acceleration RMS based on the damping value (unit : $m/\sec^2$)

C_d \ Model	ORD50 -A	ORD50 -B	ORD50 -C	ORD50 -D
200	1.536	1.550	1.562	1.574
400	1.439	1.485	1.505	1.519
600	1.389	1.407	1.423	1.438
800	1.358	1.376	1.392	1.407
1,000	1.337	1.354	1.369	1.383
1.200	1.324	1.338	1.352	1.366
1,400	1.315	1.327	1.340	1.352
1,600	1.310	1.321	1.332	1.343
1,800	1.308	1.317	1.326	1.336
2,000	1.308	1.315	1.323	1.331
2,200	1.310	1.315	1.321	1.328
2,400	1.313	1.316	1.321	1.327
2,600	1.317	1.319	1.322	1.327
2,800	1.322	1.322	1.324	1.327
3,000	1.327	1.326	1.327	1.329



〈Fig. 8〉 Acceleration RMS ratio based on the damping value

<Fig. 7>과 <Fig. 8>을 살펴보면, 모든 모델이 강성에 관계없이 감쇠값의 증가에 따라 가속도 응답 저감 효과가 증대된다. 그러나 일정 감쇠값 이상에서는 가속도 응답이 일정값에 수렴하는 양상을 나타내므로 적절한 감쇠값을 사용하는 것이 효율적일

것으로 판단된다.

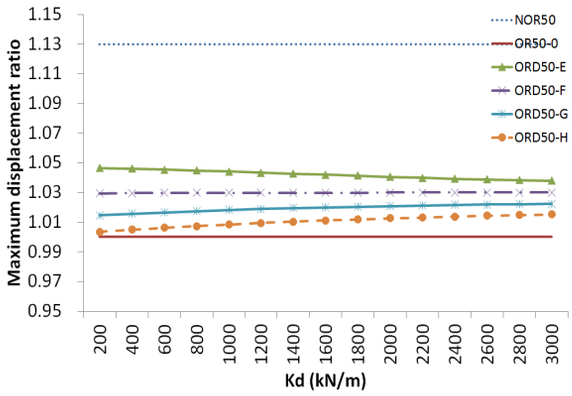
3.3 강성값에 따른 최상층 동적응답

<Table 9>는 지진하중을 받는 모델의 강성값에 따른 최상층 최대 변위 응답을 나타낸 표이다. 데이터를 살펴보면 감쇠값이 큰 모델일수록 더 작은 응답을 나타내며, 강성값 증가에 따른 변화는 매우 미소한 것으로 나타났다.

〈Table 9〉 Maximum displacement based on the stiffness value (unit : m)

Model / K_d	ORD50-E	ORD50-F	ORD50-G	ORD50-H
200	0.591	0.581	0.572	0.566
400	0.590	0.581	0.573	0.567
600	0.590	0.581	0.573	0.567
800	0.589	0.581	0.574	0.568
1,000	0.589	0.581	0.574	0.569
1,200	0.588	0.581	0.575	0.569
1,400	0.588	0.581	0.575	0.570
1,600	0.588	0.581	0.575	0.570
1,800	0.587	0.581	0.576	0.571
2,000	0.587	0.581	0.576	0.571
2,200	0.586	0.581	0.576	0.571
2,400	0.586	0.581	0.576	0.572
2,600	0.586	0.581	0.576	0.572
2,800	0.586	0.581	0.576	0.572
3,000	0.585	0.581	0.577	0.573

<Fig. 9>는 OR50-0모델을 기준으로 최대 수평변위 응답 비를 나타낸 그래프이다. 감쇠값이 가장 작은 ORD50-E모델은 댐퍼 강성의 증가에 따라 최상층 최대 변위 응답이 감소하고, ORD50-F모델의 경우 강성의 변화에 따른 응답 변화가 없는 것으로 나타났다. 또한 ORD50-G모델과 ORD50-H모델의 경우 강성의 증가에 따라 응답이 증가하는 양상을 나타낸다. 모든 해석모델이 아웃리거만 설치된 OR50-0모델보다 더 큰 최대 수평 변위 응답을 나타내고 있다. 최대 4.7% 큰 응답을 나타내므로 아웃리거 댐퍼시스템이 적용된 모델과 아웃리거만 적용된 모델과의 최대 변위 응답은 큰 차이가 없는 것으로 판단된다.



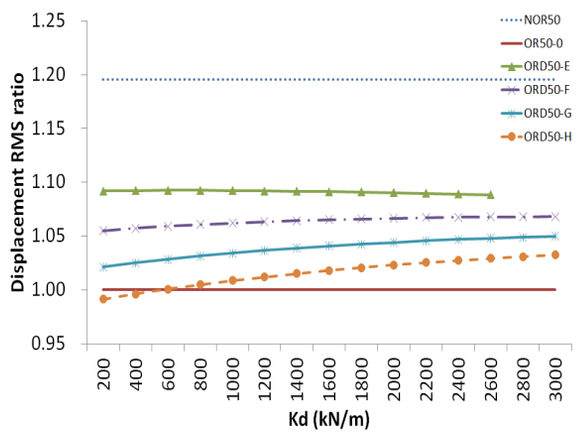
〈Fig. 9〉 Maximum displacement ratio based on the stiffness value

<Table 10>은 지진하중을 받는 모델의 최상층 RMS 변위 응답을 나타낸 표이다. RMS 변위 응답은 최대 변위 응답의 45%의 응답을 나타내고 있다. 모든 모델의 데이터는 강성값 증가에 따라 큰 변화는 없으며 댐퍼의 감쇠값이 작은 ORD50-E의 경우 미소하게 감소하는 경향을 보이는 반면 ORD50-F, ORD50-G, ORD50-H 모델의 경우 미소하게 응답이 증가하는 경향을 나타내고 있다.

〈Table 10〉 Displacement RMS based on the stiffness value (unit : m)

Model / K_d	ORD50-E	ORD50-F	ORD50-G	ORD50-H
200	0.271	0.261	0.253	0.246
400	0.271	0.262	0.254	0.247
600	0.271	0.262	0.255	0.248
800	0.271	0.263	0.256	0.249
1,000	0.271	0.263	0.256	0.250
1,200	0.271	0.264	0.257	0.251
1,400	0.271	0.264	0.257	0.252
1,600	0.270	0.264	0.258	0.252
1,800	0.270	0.264	0.258	0.253
2,000	0.270	0.264	0.259	0.254
2,200	0.270	0.264	0.259	0.254
2,400	0.270	0.265	0.259	0.255
2,600	0.270	0.265	0.260	0.255
2,800	0.270	0.265	0.260	0.255
3,000	0.269	0.265	0.260	0.256

<Fig. 10>은 OR50-0모델을 기준으로 RMS 변위 응답 비율을 나타낸 그래프이다. 모든 모델은 아웃리거만 설치된 OR50-0모델보다 큰 응답을 나타내고 있으며, 감쇠값이 작은 모델일수록 더 큰 응답을 보인다. 강성값이 증가함에 따라 응답이 미소하게 증가하는 경향을 보이나 그 증가가 매우 작으므로 지진하중을 받는 모델의 경우 강성값의 증가는 최상층 수평변위 응답 저감에 큰 효과가 없는 것으로 나타났다.



〈Fig. 10〉 Displacement RMS ratio based on the stiffness value

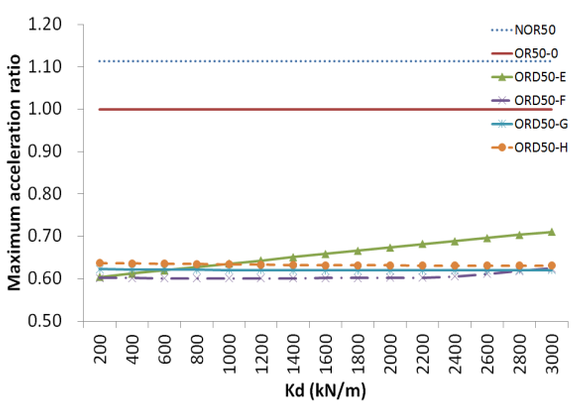
지진하중을 받는 모델의 강성값에 따른 최상층 최대 수평가속도 응답은 <Table 11>과 같다. 모든 모델의 응답이 아웃리거만 설치된 OR50-0모델 대비 최대 40% 낮은 응답을 보이며 댐퍼의 강성값 증가에 따라 가속도 응답이 미소하게 증가하는 경향을 나타내고 있다.

<Fig. 11>은 지진하중을 받는 모델의 강성값에 따른 최상층 최대 수평가속도 응답을 OR50-0모델을 기준으로 그에 대한 비율로 나타낸 그래프이다. 감쇠값 1,500kN·sec/m인 ORD50-F모델이 강성값 600kN/m에서 최소값을 나타내고 있다. 감쇠값이 더 작은 ORD50-E와 감쇠값이 더 높은 모델인 ORD50-G와 ORD50-H 모델이 더 큰 가속도 응답을 나타내고 있으므로 지진하중을 받는 경우 댐퍼에 적절한 감쇠값을 사용하는 것이 필요한 것으로 판단된다.

〈Table 11〉 Maximum acceleration based on the stiffness value

(unit : $m/\sec^2$)

Model / K_d	ORD50-E	ORD50-F	ORD50-G	ORD50-H
200	3.762	3.747	3.878	3.967
400	3.811	3.745	3.874	3.961
600	3.859	3.743	3.870	3.955
800	3.908	3.742	3.867	3.950
1,000	3.957	3.742	3.864	3.946
1,200	4.005	3.742	3.862	3.941
1,400	4.054	3.743	3.860	3.938
1,600	4.101	3.744	3.859	3.935
1,800	4.149	3.747	3.858	3.933
2,000	4.196	3.749	3.857	3.930
2,200	4.243	3.752	3.857	3.929
2,400	4.289	3.769	3.858	3.928
2,600	4.335	3.809	3.859	3.927
2,800	4.379	3.848	3.860	3.926
3,000	4.423	3.886	3.862	3.926

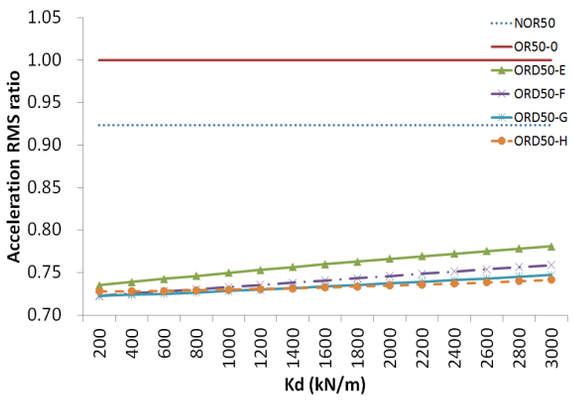


〈Fig. 11〉 Maximum acceleration ratio based on the stiffness value

지진하중을 받는 모델의 강성값에 따른 최상층 RMS 가속도 응답을 <Table 12>에 나타내었다. RMS 가속도 응답은 최대 가속도 응답의 34.2%의 응답을 나타내고 있다. 최소값은 ORD50-G모델의 강성 600kN/m에서 1.309$m/\sec^2$로 나타났으며 모든 모델이 아웃리거만 있는 OR50-0모델과 아웃리거가 없는 NOR50모델보다 작은 응답을 나타내었다.

〈Table 12〉 Acceleration RMS based on the stiffness value (unit : $m/\sec^2$)

Model / K_d	ORD50 -E	ORD50 -F	ORD50 -G	ORD50 -H
200	1.327	1.305	1.304	1.314
400	1.334	1.310	1.307	1.315
600	1.341	1.314	1.309	1.315
800	1.347	1.319	1.312	1.316
1,000	1.354	1.324	1.315	1.318
1,200	1.360	1.328	1.318	1.319
1,400	1.366	1.333	1.321	1.321
1,600	1.372	1.338	1.324	1.322
1,800	1.378	1.343	1.328	1.324
2,000	1.383	1.347	1.331	1.327
2,200	1.389	1.352	1.335	1.329
2,400	1.394	1.357	1.338	1.331
2,600	1.400	1.361	1.342	1.334
2,800	1.405	1.366	1.345	1.336
3,000	1.410	1.370	1.349	1.339



〈Fig. 12〉 Maximum acceleration ratio based on the stiffness value

<Fig. 12>는 지진하중을 받는 모델의 최상층 RMS 가속도 응답을 OR50-0모델을 기준으로 그에 대한 비로 나타낸 그래프이다. 아웃리거만 있는 OR50-0모델 대비 최대 27.5% 응답 저감효과가 있으며 <Fig. 11>의 최상층 최대 수평가속도 응답의 비 그래프와 달리 강성값의 증가에 따라 응답이 증가하는 양상이 뚜렷하게 나타나고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 지진하중을 받는 아웃리거 댐퍼시스템의 해석을 통하여 동적응답 제어성능을 기존 아웃리거 시스템과 비교 분석하였다. 해석을 통해 구한 최상층 최대 수평변위 응답, RMS 수평변위 응답, 최대 수평가속도 응답, RMS 수평가속도 응답을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 수치해석결과 아웃리거 댐퍼 강성값의 변화는 최상층 수평변위 응답 저감에 별다른 효과를 나타내지 못한다는 것을 확인하였다. 따라서 경제적 부담이 큰, 높은 강성의 댐퍼를 사용할 필요가 없는 것으로 판단된다. 또한, 댐퍼의 감쇠값이 3,000kN·sec/m 이상부터 기존 아웃리거 시스템보다 작은 수평변위 응답을 나타내므로, 최상층 수평변위 응답 저감이 설계의 주목적이라면 보다 큰 감쇠값의 선택이 필요한 것으로 판단된다.

(2) 아웃리거 댐퍼시스템은 기존 아웃리거 시스템 대비하여 최상층 수평가속도 응답이 최대 40% 저감되는 것을 확인하였다. 지진하중을 받는 고층건물에 대하여 아웃리거 댐퍼 시스템을 적용한다면 수평가속도 응답 제어에 탁월한 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 감쇠값 1,600kN·sec/m부터 응답 저감 효과가 미소하게 증가하므로 이를 고려하여 적절한 감쇠값의 선택이 경제적일 것으로 판단된다.

(3) 지진하중을 받는 고층건물의 경우 최상층 변위 응답 제어에는 댐퍼의 감쇠값이 높고 강성값이 작은 것이 유리한 것으로 판단되며, 가속도 응답의 경우 적절한 감쇠값의 선택이 효율적인 것으로 판단된다.

(4) 추후에 경제적 설계를 위한 댐퍼의 최적 감쇠값 및 강성값에 대한 추가적 연구와 다양한 형상의 고층건물 모델에 대한 아웃리거 댐퍼 시스템의 성능 해석 및 평가가 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2014R1A2A2A01005418).

References

1. Lee, C. H, Chung, K. R, Kim, S, D, “Outrigger System for Tall Buildings: State-of-the-Art, Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol.23, No.3, pp.35-40, 2011
2. Kim, D. H, Chung, K. R, “Evolution of Tall Building Structural System”, Journal of Architectural Institute of Korea, Vol.53, No.8, pp.18-23, 2009
3. Park, K. D, Kim, D. Y, Jung, D. K, Yang, D. H, “Improving Construction Quality and Conveniency by Applying Outrigger Dampers to Outrigger to Perimeter Column Joints”, Journal of Architectural Institute of Korea, Vol.53, No.8, pp.30-37, 2009
4. Kim, B. J, Lee, S. H, Chung, L, “Design of Outrigger Damper System for Wind-Induced Vibration Control of Building Structures”, Journal of The Wind Engineering Institute of Korea, Vol.15, No.4, pp.163-671, 2011
5. Chen, Y, McFarland, D.M, Wang, Z. Spencer Jr. B.F. and Bergman, L.A, “Analysis of tall buildings with damped outriggers”, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 136, No.11, pp.1435-1443, 2010
6. Kim, H. S, Yoon, S. W, Kang, J. W, “Optimal Design of Outrigger Damper using Multi-objective Genetic Algorithm”, Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol.14, No.4, pp.97-104, 2014
7. Kim, H. K, Tae, A. R, Kim, J. K, “Investigating the Optimum Outrigger System Location of Tall Building”, Proceeding of Autumn Annual Conference of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol.30, No.1, pp.49-50, 2010

■ Received : December 16, 2015
■ Revised : February 15, 2016
■ Accepted : February 18, 2016