

풍하중에 대한 아웃리거 댐퍼시스템의 응답 제어 성능 평가

Performance Evaluation of Response Reduction of Outrigger Damper System Subjected to Wind Loads

김수진*
Kim, Su-Jin

김민주*
Kim, Min-Ju

김준일*
Kim, Jun-Il

강주원**
Kang, Joo-Won

Abstract

The outrigger damper system is a structural system with excellent lateral resistance when a wind load occurs. However, research on outrigger dampers is still in its infancy. In this study, dynamic response control performance of damper is analyzed according to change of stiffness value and damping value of damper. To do this, a real-scale 3D model of 50 stories has been developed and the artificial wind load has been entered for dynamic analysis. Generally, the larger the damping value, the smaller the stiffness value is, the more effective it is to reduce the maximum displacement and acceleration response. However, the larger the attenuation value as the cost of construction increases, it is necessary to select appropriate stiffness and damping value when applying an outrigger damper.

Keywords : Outrigger damper system, Artificial wind loads, Tall building, Dynamic response control

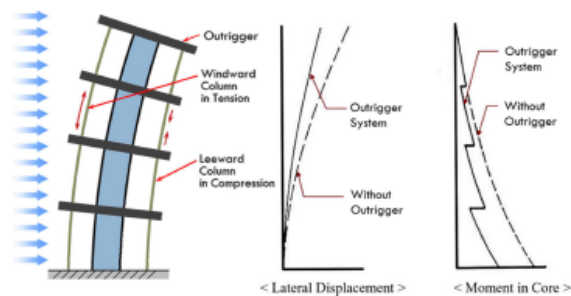
1. 서론

초고층 건물은 뉴욕의 WTC(World Trade Center)나 시카고의 Sears Tower와 같이 도시의 기술력과 이미지를 제고하는데 상징적인 역할을 하게 되었다.

특히 1990년대 이후부터 최근까지 초고층 건물이 중국, 동남아시아 및 중동 지역에서 급증하게 되면서 높이 경쟁에 따른 구조 시스템에 대한 개발과 연구가 활발하다. 초고층 건물은 고층화됨에 따라 바람이나 지진과 같은 수평 하중의 영향을 많이 받게 되므로 구조 계획 시 횡력 저항 시스템 결정이 가장 중요하다.

현재 횡력 저항에 효과적인 시스템으로 아웃리거 시스템이 여러 건물에 적용되고 있다¹⁾. <Fig. 1>에 나타낸 아웃리거 시스템은 중앙부 코어와 외부 기둥을 아웃리거라는 매우 높은 강성의 구조체로 연

결한 것으로 지진이나 태풍 등의 동적 하중 작용 시 이를 수직 부재에 전달하여 압축력과 인장력으로 저항하게 된다³⁾.

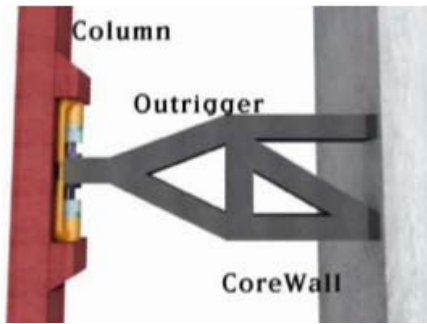


<Fig. 1> Concept of outrigger²⁾

그러나 이때 발생하는 부등 축소로 인하여 아웃리거와 외부 기둥 접합부의 응력이 증가하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 <Fig. 2>와 같이 내부 충전재가 포함된 댐퍼가 아웃리거와 외부 기둥 사이에 추가로 결합된 아웃리거 댐퍼 구조 시스템이 개발되었다.

* 학생회원, 영남대학교 건축학부 대학원, 석사과정
School of Architecture, Yeungnam 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



〈Fig. 2〉 Concept of outrigger damper⁴⁾

이를 적용한 대표적인 국외 사례로 필리핀의 The St. Francis Shangri-La Place를 살펴보면, 설계 단계에서부터 아웃리거 댐퍼를 이용한 내풍 설계를 통하여 매우 효과적인 가속도 응답 저감과 함께 최상층 거주성 개선 및 안정성을 확보하였다.

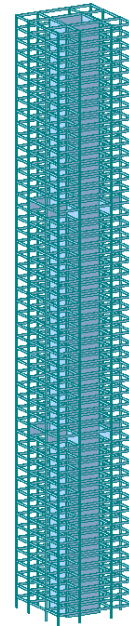
국내 사례로 송도 신도시에 건설된 동북아 무역센터(NEATT)를 살펴볼 수 있다. 본래 아웃리거 댐퍼시스템의 주목적은 강성과 감쇠의 복합적인 거동을 통한 동적 응답의 저감이지만, 동북아 무역센터에 적용된 아웃리거 댐퍼시스템은 외부 기둥과 중앙부 전단벽의 부등 축소로 인해 발생하는 아웃리거 거와 외부 기둥 접합부 응력의 흡수라는 한정적인 목적으로 적용되었다. 위의 사례와 같이 아웃리거 댐퍼시스템에 대한 관심과 실제 건물에 적용되는 사례는 증가하고 있다. 특히 댐퍼의 거동 특성상 고층 건물의 내풍 설계에 적용 시 가속도 응답을 현저히 줄여, 물량 감소와 거주성 개선 부문에서 큰 강점이 있을 것으로 기대되고 있다.

그러나 국내에서 아웃리거 댐퍼의 주 목적인 강성과 감쇠를 통한 동적 응답 제어에 관한 연구와 적용 사례는 부족한 실정이다. 이러한 배경을 바탕으로 본 논문에서는 동일한 해석 모델을 대상으로 2개의 다른 감쇠(C_d)값을 갖는 댐퍼 모델을 구성하여 강성(K_d)값 변화에 따른 풍하중에 대한 동적 응답 특성을 분석하고자 한다.

2. 해석 모델과 해석 방법

2.1 해석 모델

본 연구에서는 층고 5m, 층수 50층, 전체 높이는 250m의 실물 크기를 갖는 초고층 건물 3D 해석 모델을 설계하였다. 이는 건축법 시행령에 정의된 초고층 건물 기준인 높이 200m 이상 또는 50층 이상을 만족한다. 또한 35×34m의 일정한 구조 평면을 가지며 이때 건물의 세장비는 1:7로 <Fig. 2>에 나타내었다.



〈Fig. 3〉 Analytical model

아웃리거는 평판 형태로 중앙부 전단코어와 외부 기둥을 연결하도록 모델링하였다. 아웃리거의 위치는 McNabb & Muvdi(1975)가 기존 연구⁵⁾에서 제안한 2개층 아웃리거 시스템의 최적 위치인 0.312h와 0.685h, 해석 모델의 16층과 35층에 설치하였다.

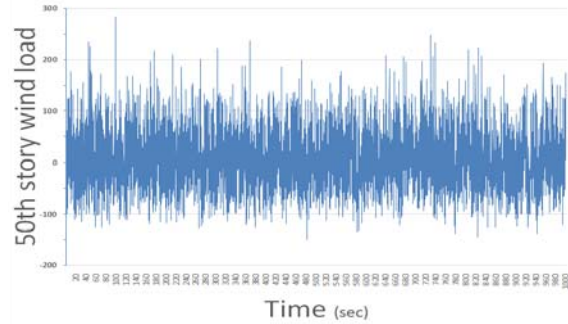
댐퍼는 아웃리거의 상단부와 하단부 절점에 설치하여 총 2개층 32개의 절점에 생성하였다. 해석 모델의 일반 사항을 <Table 1>에 정리하였다.

<Table 1> Specification of analytical model

Variable		Specification
Height		5m × 50Story=250m
Principal place		XYZ Plane
Core	Height	5m
	Thickness	0.55m
	Structure	Concrete
Beam		
Material	Column	SM570TMC
	Outrigger	
Outrigger	Thickness	0.2m
	Structure	Wall type
	Location	16, 35F
Section	Column	H - 620×600×60/70
	Beam	H - 700×300×13/24
Slenderness ratio		1 : 7
Main mode period	1st	4.7325 s
	2nd	4.5593 s
	3rd	0.9281 s

2.2 해석 방법

본 연구에서는 초고층 건물의 풍하중에 대한 응답 제어 성능 검토를 위해 상용 프로그램인 Midas Gen Ver. 860을 사용하여 인공 풍하중에 대한 시간 이력 해석을 수행하였다. 인공 풍하중은 Kaimal spectrum을 이용하였으며 설계 기준에 맞는 난류 강도를 산정하여 작성하였다. 이때 인공 풍하중 작성 시 설정 값은 국내 기상 관측 기준 및 자료에 따른 지면으로부터 건물 높이 10m인 지점을 기준으로 하여 30m/s를 기본 풍속으로 설정하였다. 또한 노풍도 C, 시간 간격 0.1초로 하여 End time 총 1,000초로 작성된 인공 풍하중 데이터는 해석 모델의 풍하중 작용 면적을 고려하여 각 층별 절점에 집중 하중의 형태로 입력하였다. <Fig. 4>는 각 층에 입력한 층별 인공 풍하중의 평균 시간 이력 그래프를 나타낸 것이다.



<Fig. 4> Wind load time history graph

해석 모델에 사용된 댐퍼 모델은 상용 프로그램인 Midas Gen의 General link properties에서 점탄성 댐퍼(Viscoelastic damper)로 구성하였으며, 이는 대표적인 내풍 댐퍼이다. 또한 점탄성 댐퍼 모델 중에서도 선형 스프링과 점성 감쇠가 병렬로 연결된 Kelvin model을 사용하였다. 해석 모델 구성은 아래 <Table 2>에 나타내었다.

<Table 2> Analysis model with changes in stiffness value

Model	Outrigger presence	Outrigger damper presence	Damping value (kN*sec/m)	Changes in damper stiffness value (kN/m)
NOR	-	-	-	-
OR	○	-	-	-
ORD -AX		○	10,000	10,000
ORD -BX			20,000	~40,000
ORD -AY			10,000	10,000
ORD -BY			20,000	~40,000

아웃리거 댐퍼시스템의 강성(K_d)값과 감쇠(C_d)값에 따른 동적 응답 제어 성능을 검토하기 위하여 아웃리거가 설치되지 않은 NOR모델과 아웃리거만

설치된 OR모델을 기준 모델로 설정하였다.

강성(K_i)값의 변화에 따른 동적 응답 제어 성능을 알아보기 위하여 댐퍼의 강성(K_i)값이 10,000~40,000 kN/m로 변화할 때, 감쇠(C_i)값이 10,000kN*sec/m인 ORD-AX, ORD-AY모델과, 20,000kN*sec/m인 ORD-BX, ORD-BY모델을 구성하여 <Table 2>에 나타내었다. 강성(K_i)값과 감쇠(C_i)값을 조절하여 최상층 최대 수평 변위 응답과 가속도 응답을 비교 분석하였다.

3. 동적 응답 분석

앞서 언급한 바와 같이 댐퍼의 강성(K_i)값과 감쇠(C_i)값에 따른 동적 응답 제어 성능을 알아보기 위하여 아웃리저가 설치되지 않은 NOR모델과, 아웃리저만 설치된 OR모델에 인공 풍하중을 입력하여 시간 이력 해석을 수행한 후 기본 모델에 대한 최상층 최대 수평 변위 응답과 최상층 최대 수평 가속도 응답을 <Table 3, 4>에 정리하였다.

<Table 3> X Dir. dynamic response of the basic model the top floor

Model	Maximum displacement		Maximum acceleration	
	Data	Ratio	Data	Ratio
	(m)	(%)	(m/sec ²)	(%)
NOR	0.6246	118.27	2.399	104.76
OR	0.5281	100	2.29	100

<Table 4> Y Dir. dynamic response of the basic model the top floor

Model	Maximum displacement		Maximum acceleration	
	Data	Ratio	Data	Ratio
	(m)	(%)	(m/sec ²)	(%)
NOR	0.784	130.97	2.82	104.44
OR	0.5986	100	2.7	100

기본 모델의 해석 결과, 먼저 NOR모델의 최상층 수평 변위가 H/400(H:건물 전체 높이) 이내의 응답이 나타나는 것을 확인하였다. 다음으로 아웃리저가 설치되지 않은 NOR모델 대비 아웃리저만 설치된 OR모델의 응답을 분석한 결과, X방향과 Y방향에서 각각 18.27%, 30.97%의 최상층 최대 수평 변위 응답 저감과, 4.76%, 4.44%의 최상층 최대 수평 가속도 응답 저감을 확인하였다.

3.1 강성값에 따른 최상층 최대 수평 변위 응답

아웃리저 댐퍼의 감쇠(C_i)값이 각각 10,000kN*sec/m, 20,000kN*sec/m로 일정할 때, 강성(K_i)값 10,000kN/m에서 40,000kN/m까지의 변화에 따른 X방향과 Y방향의 최상층 최대 수평 변위 응답을 <Table 5, 6>에 나타내었다.

<Table 5> X Dir. maximum displacement based on the stiffness value

(unit : m)

Model K(kN/m)	NOR	OR	ORD-AX	ORD-BX
10,000			0.5857	0.4850
12,000			0.5916	0.4897
14,000			0.5965	0.4938
16,000			0.6003	0.4973
18,000			0.6029	0.5002
20,000			0.6063	0.5072
22,000			0.6093	0.5145
24,000			0.6112	0.5214
26,000	0.6246	0.5281	0.6137	0.5278
28,000			0.6203	0.5338
30,000			0.6262	0.5394
32,000			0.6314	0.5444
34,000			0.6359	0.5490
36,000			0.6397	0.5531
38,000			0.6429	0.5581
40,000			0.6470	0.5627

먼저 <Table 5>에서 X방향 최상층 최대 변위 응답을 살펴본 결과, OR모델의 응답 대비 응답 저감이 가장 크게 나타난 것은 ORD-AX모델과 ORD-BX모델 모두 강성(K_i)값이 10,000kN/m일 때 각각 0.5857m, 0.485m의 최소 변위 응답이 나타났다.

<Table 6> Y Dir. maximum displacement based on the stiffness value

(unit : m)

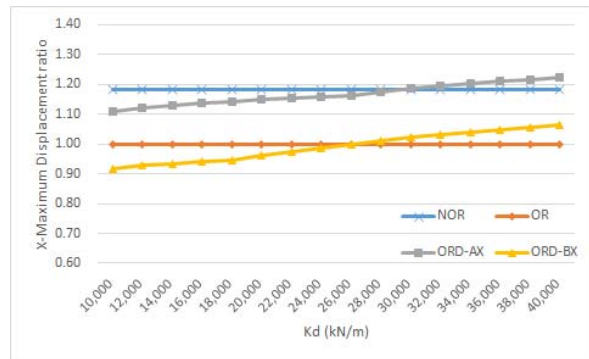
Model K(kN/m)	NOR	OR	ORD-AY	ORD-BY
10,000			0.5078	0.4798
12,000			0.5066	0.4799
14,000			0.5098	0.4804
16,000			0.5134	0.4807
18,000			0.5166	0.4809
20,000			0.5196	0.4811
22,000			0.5223	0.4812
24,000			0.5259	0.4841
26,000	0.7840	0.5986	0.5293	0.4885
28,000			0.5324	0.4930
30,000			0.5353	0.4976
32,000			0.5396	0.5022
34,000			0.5455	0.5069
36,000			0.5514	0.5116
38,000			0.5573	0.5163
40,000			0.5637	0.5210

Y방향에서 최소 변위 응답 또한 ORD-AY모델과 ORD-BY모델에서 강성(K_i)값이 10,000kN/m일 때 각각 0.5078m, 0.4798m의 최소 변위 응답이 나타났다. <Fig. 5, 6>는 강성(K_i)값 증가에 따른 최상층 최대 수평 변위 응답을 OR모델을 기준으로 하여 비로 나타낸 것이다. X방향과 Y방향 변위 응답 모두 강성값이 증가함에 따라 최상층 최대 수평 변위 응답이 증가하는 양상이 나타났다.

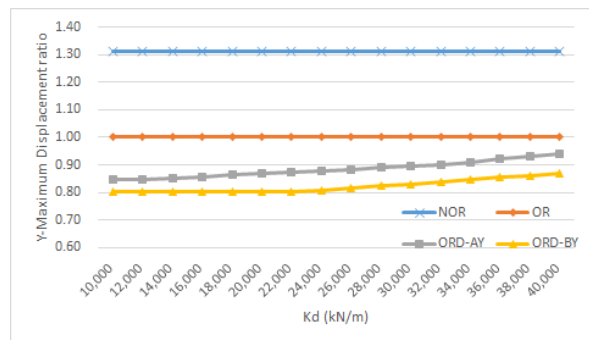
<Fig. 5>에 나타난 X방향의 수평 변위 응답비 그

래프를 보면 ORD-AX모델의 최상층 최대 수평 변위 응답은 강성값 변화 전체 구간에서 OR모델의 응답보다 크게 나타났으며, 강성값 30,000kN/m에서 NOR모델의 응답보다 변위 응답이 증가하였다. 강성(K_i)값의 변화 초기 구간에서 ORD-BX모델은 OR모델의 응답 대비 응답 저감 확인이 가능하였으며, 강성값 10,000kN/m에서 최대 8.1%의 응답 저감을 하였다. 그러나 ORD-BX모델 역시 강성값 28,000 kN/m에서 OR모델의 응답보다 증가하였다.

<Fig. 6>의 Y방향 최상층 최대 수평 변위 응답비 그래프를 보면 두 모델 모두 OR모델 대비 수평 변위 응답이 저감하였으며, ORD-BY모델에서 강성값이 10,000kN/m일 때 최대 19.85%의 변위 응답의 저감을 확인하였다.



<Fig. 5> X Dir. maximum displacement ratio based on the stiffness value



<Fig. 6> Y Dir. maximum displacement ratio based on the stiffness value

두 해석 모델의 감쇠(C_d)값 차에 따른 X방향 변위 응답차는 일정하게 유지되는 것으로 나타났으나, Y

방향의 변위 응답차는 X방향 대비 상대적으로 적게 나타났으며, 강성값이 증가함에 따라 감쇠값 차에 따른 응답차가 미소하지만 점점 증가하는 것으로 나타났다.

3.2 강성값에 따른 최상층 최대 가속도 응답

변위 응답과 마찬가지로 아웃리거 댐퍼의 감쇠(C_d)값이 각각 10,000kN*sec/m, 20,000kN*sec/m로 일정할 때, 강성(K_d)값의 변화에 따른 X방향과 Y방향의 최상층 최대 수평 가속도 응답을 <Table 7, 8>에 나타내었다. X방향에서 가속도 응답은 ORD-AX 모델에서 강성값이 20,000kN/m일 때 $1.878m/sec^2$, ORD-BX모델에서 강성값이 10,000kN/m일 때 $1.595m/sec^2$ 의 최소 가속도 응답이 나타났다.

<Table 7> X Dir. maximum acceleration based on the stiffness value
(unit : m/sec^2)

Model K(kN/m)	NOR	OR	ORD-AX	ORD-BX
10,000			1.9150	1.5950
12,000			1.9120	1.6030
14,000			1.9070	1.6100
16,000			1.9000	1.6080
18,000			1.8900	1.6220
20,000			1.8780	1.6310
22,000			1.8860	1.6480
24,000			1.9150	1.6640
26,000	2.3990	2.2900	1.9400	1.6790
28,000			1.9640	1.6940
30,000			1.9860	1.7080
32,000			2.0060	1.7210
34,000			2.0230	1.7340
36,000			2.0390	1.7450
38,000			2.0530	1.7560
40,000			2.0650	1.7670

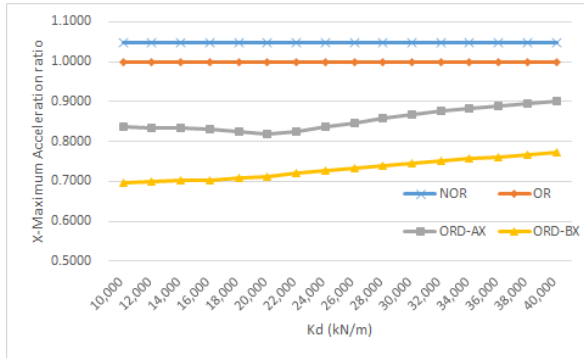
<Table 8>의 Y방향 최상층 최대 수평 가속도 응답을 살펴보면, ORD-AY모델과 ORD-BY모델 모두 강성값이 10,000kN/m일 때 각각 $1.746m/sec^2$, $1.59m/sec^2$ 의 최소 가속도 응답이 나타났다.

<Table 8> Y Dir. maximum acceleration based on the stiffness value
(unit : m/sec^2)

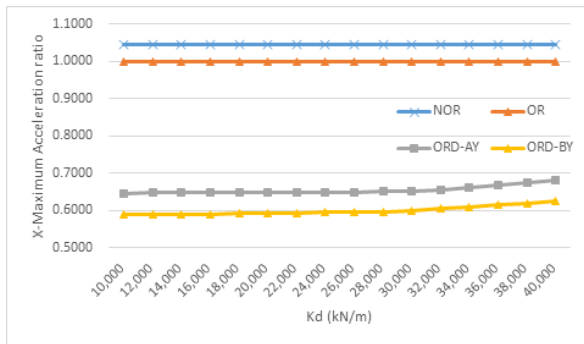
Model K(kN/m)	NOR	OR	ORD-AY	ORD-BY
10,000			1.7460	1.5900
12,000			1.7470	1.5920
14,000			1.7470	1.5940
16,000			1.7480	1.5950
18,000			1.7480	1.5980
20,000			1.7480	1.6010
22,000			1.7490	1.6040
24,000			1.7490	1.6070
26,000	2.8200	2.7000	1.7500	1.6100
28,000			1.7550	1.6130
30,000			1.7600	1.6180
32,000			1.7650	1.6310
34,000			1.7830	1.6450
36,000			1.8020	1.6580
38,000			1.8220	1.6720
40,000			1.8410	1.6850

<Fig. 7, 8>은 강성값에 따른 X방향과 Y방향의 최상층 최대 수평 가속도 응답을 OR모델을 기준으로 하여 비로 나타낸 것이다. 기존의 아웃리거 시스템인 OR모델 대비 X방향과 Y방향에서 각각 최대 30.35%와 41.11%의 수평 가속도 저감을 확인하였다. 가속도 응답의 경우 감쇠값이 클수록 가속도 응답이 작게 나타나고, 강성값이 증가함에 따라 응답이 증가하는 양상을 띄었다.

강성값에 따른 최적 응답은 강성값을 감소시킬수록 가속도 응답 제어에 효과적인 것으로 판단된다.



〈Fig. 7〉 X Dir. maximum acceleration ratio based on the stiffness value



〈Fig. 8〉 Y Dir. maximum acceleration ratio based on the stiffness value

4. 결론

본 연구에서는 상용 프로그램(Midas Gen Ver. 860)을 사용하여 2개층 아웃리거 댐퍼시스템이 설치된 실물 크기의 50층 건물을 모델링하였다. 풍하중에 대한 댐퍼의 동적 응답 제어 성능을 비교 분석하기 위하여 강성값과 감쇠값을 변수로 한 구조 해석을 실시하여 응답을 비교 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 아웃리거 모델의 수평 변위 응답 대비 아웃리거 댐퍼 모델에서 최대 19.85%의 변위 응답 저감을 확인하였다. 그러나 X방향과 Y방향 모두 강성값이 증가함에 따라 변위 응답이 증가하였으며, X방향 변위 응답에서 기존의 아웃리거 시스템의 응답을 초과하였다. 이때 감쇠값 차에 따른 응답차가 Y방향 대비 X방향에서 크게 나타났으며, 감쇠값이 큰

모델이 응답 저감에 효과적인 것으로 나타났다.

2) 아웃리거 모델의 가속도 응답 대비 모든 댐퍼 모델에서 가속도 응답 저감을 확인하였다. Y방향에서 최대 41.11%의 가속도 응답 저감을 통해 변위 응답 대비 가속도 응답 제어에 더욱더 효과적인 것으로 판단된다. 그러나 변위 응답과 마찬가지로 강성값이 증가함에 따라 가속도 응답이 점차 증가하는 양상이 나타났다.

3) 기존의 아웃리거 모델의 응답 대비 X방향과 Y방향의 변위 응답과 가속도 응답 모두 응답 저감이 확인된 구간을 분석한 결과, 강성값 대 감쇠값의 비가 최소 1:2를 만족할 때 기존의 아웃리거 모델 대비 응답 저감에 효과적인 것으로 나타났다.

따라서 아웃리거 댐퍼시스템을 통한 초고층 건물의 풍하중에 대한 동적 응답 제어 시, 최상층 수평 변위 응답과 가속도 응답 모두 댐퍼의 강성값은 낮추고 감쇠값을 증가시키는 것이 응답 제어에 효과적이라 판단된다. 특히 강성값의 감소보다 감쇠값을 증가시켜 제어 성능을 확보하는 것이 비교적 효율적이다.

이후 풍하중을 제외한 다양한 동적 하중이 적용된 고층 건물에서 아웃리거 댐퍼의 강성값과 감쇠값에 따른 동적 응답 특성 분석 및 최적의 강성값, 감쇠값에 관한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2017R1A2B4006226).

References

- Kim, H. K., Tae, A. R., & Kim, J. K. (2010). Investigating the Optimum Outrigger System Location of Tall Building. Proceedings of Autumn Annual Conference of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Republic of Korea, Vol.30,

No.1, pp.49~50

2. Kim, B. J., Lee, S. H., & Lan, C., "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.163~171, 2011
3. 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
4. Kim, D. Y. (2010). Application of outrigger dampers to songdo NEATT. Proceedings of Spring Conference of the Korea Institute of Building Construction, Republic of Korea, Vol.10, No.1, pp.69~74
5. McNabb, J. W., & Muvdi., B. B., "Drift Reduction Factors for Belted High-Rise Structures", Engineering Journal, Vol.12, No.3, pp.88~91, 1975

- Received : November 06, 2017
- Revised : November 19, 2017
- Accepted : November 20, 2017