

스마트 아웃리저 댐퍼시스템의 멀티해저드 저항성능평가

김현수
선문대학교 건축사회환경학부

Performance assessment of multi-hazard resistance of Smart Outrigger Damper System

Hyun-Su Kim

Division of Architecture, Architectural and Civil Engineering, Sunmoon University

요약 아웃리저 시스템은 지진이나 풍하중에 의한 동적 응답을 줄이기 위하여 고층 건물의 횡방향 강성을 증가시키는데 널리 사용되고 있다. 풍하중과 지진하중의 동적 특성은 매우 다르기 때문에 스마트 진동 제어 시스템이 아웃리저 시스템과 함께 사용된다면 두 가지 동적 하중에 대해서 효과적으로 사용될 수 있을 것이다. 본 논문에서는 아웃리저 댐퍼 시스템 기반 멀티 해저드 적응형 스마트 구조 제어 시스템에 대한 연구를 수행하였다. 스마트 아웃리저 댐퍼 시스템을 개발하기 위하여 MR 댐퍼를 사용하였다. 수치 해석을 위해 미국에 있는 LA, 찰스턴, 앵커리지의 세 도시에 대한 멀티 해저드 지진하중과 풍하중을 생성하였다. 스마트 아웃리저 댐퍼 시스템의 최적 설계를 위하여 MR 댐퍼 용량에 대한 파라미터 연구를 수행하였다. 유전자 알고리즘으로 최적화된 퍼지 논리 제어를 이용하여 스마트 제어 알고리즘을 개발하였다. 해석결과를 통하여 아웃리저 댐퍼 시스템 기반 적응형 스마트 구조제어 시스템이 풍하중과 지진하중의 멀티 해저드에 대해서 우수한 제어성능을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract An outrigger system is used widely to increase the lateral stiffness of high-rise buildings, resulting in reduced dynamic responses to seismic or wind loads. Because the dynamic characteristics of earthquake or wind loads are quite different, a smart vibration control system associated with an outrigger system can be used effectively for both seismic and wind excitation. In this study, an adaptive smart structural control system based on an outrigger damper system was investigated for the response reduction of multi-hazards, including seismic and wind loads. A MR damper was employed to develop the smart outrigger damper system. Three cities in the U.S., L.A., Charleston, and Anchorage, were used to generate multi-hazard earthquake and wind loads. Parametric studies on the MR damper capacity were performed to investigate the optimal design of the smart outrigger damper system. A smart control algorithm was developed using a fuzzy controller optimized by a genetic algorithm. The analytical results showed that an adaptive smart structural control system based on an outrigger damper system can provide good control performance for multi-hazards of earthquake and wind loads.

Keywords : Adaptive Smart Structural Control System, Multi-Hazard, Outrigger Damper System, Optimal Structural Design, Vibration Control Algorithm.

1. 서론

국내외적으로 현재 지진이나 태풍과 같은 멀티해저드 재난하중을 고려한 설계 및 보수보강에 대한 연구가 다

수 수행되고 있다. Wen과 Kang(2001)[1]은 지진하중이나 풍하중 중 하나의 재해가 설계하중에 지배적인 역할을 할지라도 다른 재해하중이 최종적인 설계결과에 중요

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2016R1D1A1A09919159)

*Corresponding Author : Hyun-Su Kim (Sunmoon Univ.)

Tel: +82-41-530-2315 email: hskim72@sunmoon.ac.kr

Received February 12, 2018

Revised (1st March 16, 2018, 2nd March 22, 2018)

Accepted May 4, 2018

Published May 31, 2018

한 역할을 할 수 있다는 것을 밝혔다. Li 등(2012)[2]은 하나의 재해하중에 대해 구조물의 성능을 향상시킬 수 있는 설계나 보수보강 방법이 다른 재해하중에 대해서는 구조물을 취약하게 만들 수 있다는 것을 보여주었다. 고층건물의 횡방향 강성을 증가시켜서 지진하중이나 풍하중에 의한 횡방향 응답을 저감시키기 위한 방법 중 아웃리거시스템이 최근 각광을 받고 널리 사용되고 있다 [3,4]. 아웃리거시스템이 매우 효과적인 횡응답 저감시스템으로 사용되고 있지만 근래에는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 아웃리거와 기둥 사이를 감쇠기로 연결시킨 아웃리거 댐퍼시스템이 개발되어 효과적으로 활용되고 있다[5,6].

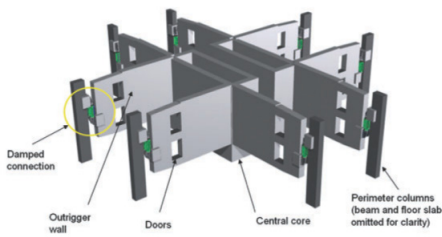


Fig. 1. Concept of outrigger damper system^[5]

비록 아웃리거 댐퍼시스템이 효과적인 횡응답 저감시스템으로 활용되고 있지만 동적특성이 매우 다른 풍하중과 지진하중에 대해서 모두 최적의 제어성능을 발휘하기에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 아웃리거 댐퍼시스템 기반의 멀티헤저드 적응형 스마트 구조제어시스템을 제안하고 이의 제어성능을 평가하고자 한다. 스마트 아웃리거 댐퍼시스템을 개발하기 위하여 널리 사용되고 있는 스마트 감쇠기인 MR (magnetorheological) 댐퍼[7]를 이용하였다. 실시간으로 변하는 지진하중 및 풍하중에 따라서 스마트 아웃리거 댐퍼시스템을 효과적으로 제어하기 위하여 퍼지논리제어알고리즘[8]을 사용하였으며 다목적 유전자알고리즘[9]을 사용하여 최적화하였다.

2. 멀티헤저드 사이트맵과 지진하중

본 연구에서는 강진에서 약진, 강풍에서 약풍지역까지 모두 포함하고 있는 미국을 대상으로 하였다. 지진하중에 대하여 LA, Anchorage, Charleston은 각각 강진, 중진 및 약진지역을 대표하고 풍하중에 대해서는 반대로

약풍, 중풍 및 강풍지역을 대표한다. 인공지진하중을 작성하기 위하여 각 도시를 대표하는 설계가속도스펙트럼을 ASCE 7-10[10]을 바탕으로 생성하였다. LA지역에 대한 S_S 는 2.348g, S_1 은 0.823g, Anchorage에 대한 S_S 는 1.500g, S_1 은 0.676g, 그리고 Charleston에 대한 S_S 는 1.119g, S_1 은 0.355g의 값을 이용하였다. 여기서, S_S 는 단주기 최대지진스펙트럼가속도 계수를 의미하고 S_1 은 1초 주기 최대지진스펙트럼가속도를 나타낸다. 지반종류는 세 도시 모두에 대하여 class D(단단한 토사지반)를 사용하였다. 스펙트럼을 생성하기 위한 S_{DS} (단주기 설계스펙트럼 가속도)와 S_{D1} (주기 1초의 설계스펙트럼 가속도)은 LA, Anchorage 및 Charleston에 대하여 각각 1.565g와 0.823g, 1.000g와 0.676g, 그리고 0.785g와 0.400g로 계산되었다. 이렇게 생성된 세 지역의 설계가속도스펙트럼을 바탕으로 인공지진을 생성하였고 생성한 인공지진의 스펙트럼을 설계스펙트럼과 함께 Fig. 2에 나타내었다. 인공지진하중의 길이는 30초로 하였고 시간간격은 0.01초로 하였다. 생성된 LA, Anchorage 및 Charleston 지역을 나타내는 인공지반가속도의 PGA (peak ground acceleration)는 각각 0.626g, 0.400g, 0.315g로 나타났다.

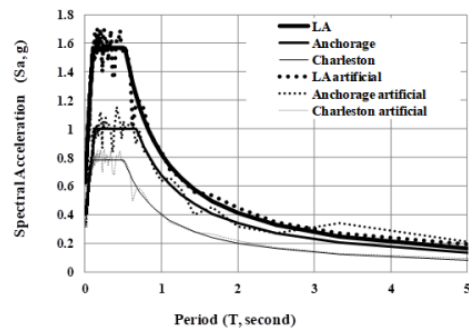


Fig. 2. Design spectra and compatible ground motions

멀티헤저드 중 풍하중에 대한 스마트 아웃리거 댐퍼시스템의 제어성능을 검토하기 위해서 인공풍하중을 생성하였다. 인공풍하중의 시간이력을 작성하기 위한 풍속 스펙트럼은 널리 알려진 Kaimal 스펙트럼[11]을 이용하였다. 인공풍하중의 생성 시 노풍도는 C로 하였고 600초 동안의 풍하중을 0.1초 간격으로 작성하였다. 예제구조물의 폭은 24m이고 층고 4m, 전체 층수 30층으로 가정하여 풍하중을 생성하였다. 각 지역별 풍하중의 크기는 기본 풍속에 의해서 결정된다. LA, Anchorage 및

Charleston 지역의 기본 풍속은 각각 38m/s, 54m/s, 63m/s이다.

ASCE 7-10과 IBC 2012[12]에서는 지진하중에 대한 구조물의 안전성을 평가하기 위한 기준으로 층고에 대한 층간변위비를 1.5%로 제시하고 있다. 이것은 본 연구에서 사용한 예제구조물의 층고가 4m이므로 0.06m로 계산된다. 풍하중에 대해서는 구조물의 안전성보다는 사용성 측면에서의 성능기준이 일반적으로 사용되고 있다. 본 연구에서는 Tallin과 Ellingwood[13]의 연구에서 제시한 심리적 안정과 일상적인 작업을 할 수 있는 기준인 0.04g (0.39m/s²)를 성능평가 기준으로 선택하였다. 지진하중에 대한 평가기준(IM₁, Intensity Measure)과 풍하중에 대한 평가기준(IM₂)은 각각 PGA와 기본풍속(Vs)으로 하였고 이를 사용한 지진과 풍하중에 대한 성능평가 함수(g₁, g₂)를 식 (1)과 (2)에 나타내었다. 식에서 R_e는 지진하중에 의한 최대 층간변위를 의미하고 R_w는 풍하중에 의한 최대 층가속도를 의미한다. 성능평가 함수 g₁과 g₂가 음수일 경우에는 지진하중과 풍하중에 의한 응답이 평가기준을 초과하는 것을 의미한다.

$$g_1(IM_1) = 0.06 - R_e(IM_1) \quad (1)$$

$$g_2(IM_2) = 0.39 - R_w(IM_2) \quad (2)$$

LA, Anchorage 및 Charleston 지역에 대한 예제구조물의 최대층간변위는 각각 0.0717m, 0.0593m와 0.0349m로 나타났다. 세 지역에 대한 인공풍하중으로 인한 최대 층가속도는 각각 0.3132m/s², 0.8600m/s²과 1.5069m/s²으로 계산되었다. 지진하중에 대해서는 LA지역이 설계기준을 초과하고 풍하중에 대해서는 Anchorage와 Charleston 지역이 성능평가기준을 초과하였다. 세 지역의 성능평가함수값을 이용한 지진 및 풍하중의 보간곡선을 Figs. 3과 4에 나타내었다.

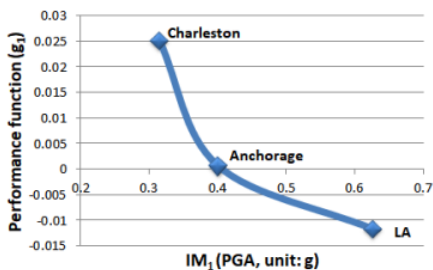


Fig. 3. Performance function1 with interpolated curves under earthquake intensity measure

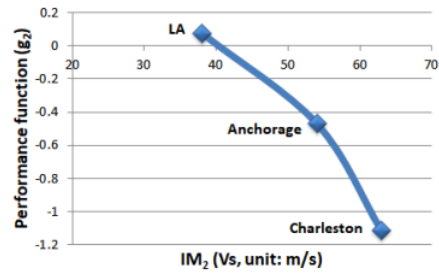


Fig. 4. Performance function2 with interpolated curves under wind intensity measure

위에 나타난 보간곡선을 통하여 지진하중과 풍하중에 대한 성능평가함수(g₁, g₂)가 '0'인 평가기준 IM₁과 IM₂를 구하면 각각 0.405g와 40m/s로 나타났다. 즉, 이 값을 초과하게 되면 성능평가함수값이 음수가 되어 설계기준을 만족시키지 못하는 것을 의미한다. 즉, Fig. 5에서 회색으로 나타낸 부분은 예제구조물이 멀티헤드드에 의해서 설계기준을 만족시키지 못하는 영역을 나타내며 예제구조물이 이 영역에 건설될 때에는 추가적인 구조제어 장치의 설치가 필요하다는 의미이다.

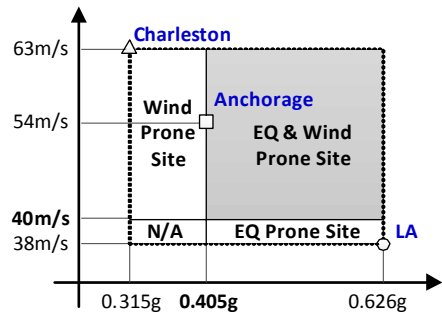


Fig. 5. Risk space site map for example structure

3. 스마트 아웃리저 댐퍼의 최적설계

본 절에서는 MR 감쇠기의 최대 제어용량을 변화시키는 파라미터 연구를 통해서 각 지역별 풍하중 및 지진하중에 대한 응답변화를 Figs. 6-11에서 검토하였다.

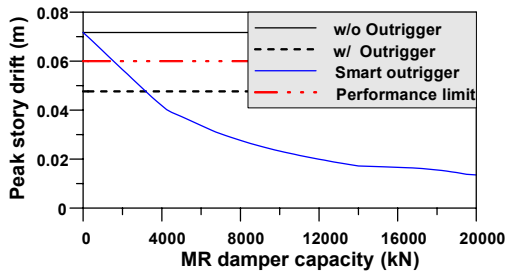


Fig. 6. Peak drift due to LA EQ

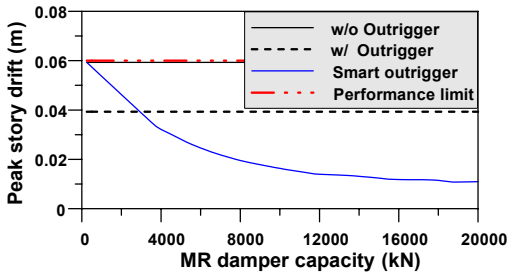


Fig. 7. Peak drift due to Anchorage EQ

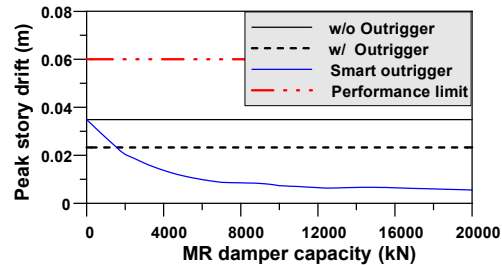


Fig. 8. Peak drift due to Charleston EQ

모든 지역에서 아웃리저를 설치하기 전보다 설치한 후에 층간변위가 감소하였다. LA지역에서는 아웃리저가 없을 때 성능기준(0.06m)을 만족시키지 못하는 0.0717m의 층간변위를 나타내지만 아웃리저가 추가된 후에는 0.0477m로 성능기준을 만족하였다. 스마트 아웃리저댐퍼는 MR 댐퍼의 용량이 증가함에 따라서 제어성능이 증가하는 것을 알 수 있고 3500kN이 지나면서 수동 아웃리저시스템보다 제어성능이 향상되었다. 나머지 지역도 거의 비슷한 경향을 보이며 지진하중이 작은 Charleston 지역에서는 아웃리저가 설치되지 않은 일반 건물도 성능기준을 만족하였다.

MR 댐퍼 제어용량 증가에 따른 풍응답 변화를 보면 초반에는 급격히 줄어들다가 이후 완만한 하향곡선을 나타낸다. 그러나 Fig.9에 나타난 LA 지역같이 평균풍속

이 작은 경우에는 아웃리저시스템이 오히려 가속도를 증가시킬 수도 있음을 알 수 있다. Anchorage와 Charleston 지역에서는 수동 아웃리저시스템을 추가해도 성능기준인 $0.39m/s^2$ 를 만족시키지 못하였다. 일반적으로 아웃리저시스템은 지진하중과 풍하중 의한 동적응답을 저감시키는데 효과적이지만 본 연구에서 사용된 예제에서는 변위응답에 비하여 가속도응답 제어에 좋은 효과를 나타내지 못하였다. 스마트 아웃리저 댐퍼시스템의 경우에는 MR 감쇠기의 용량 증가에 따라 수동 아웃리저시스템에 비하여 우수한 성능을 나타내고 가속도 성능기준을 만족시킬 수 있었다.

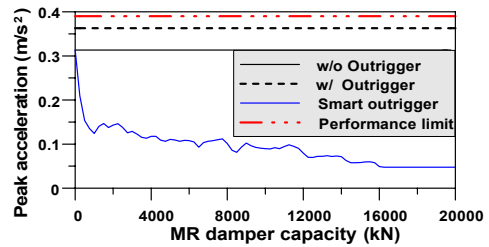


Fig. 9. Peak acceleration due to LA Wind

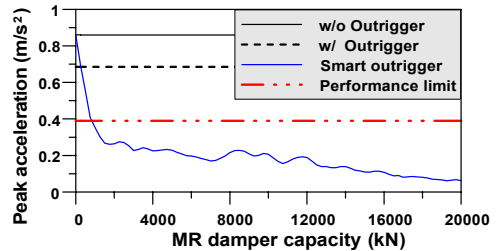


Fig. 10. Peak acceleration due to Anchorage Wind

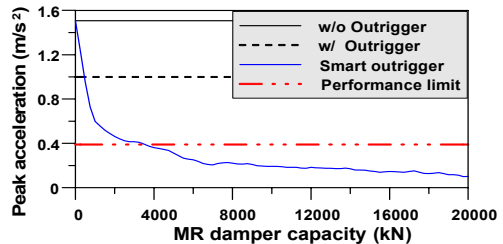


Fig. 11. Peak acceleration due to Charleston Wind

MR 댐퍼 용량증가에 따라서 스마트 아웃리저 댐퍼시스템의 제어성능이 증가하므로 적절한 값을 선택하는 것이 중요하다. 이를 위한 평가기준으로 일반적인 아웃리저시스템보다 성능이 좋아지는 MR 댐퍼 용량과 성능기

준을 만족시킬 수 있는 용량을 각 지역별로 정리하여 Table 1과 2에 나타내었다. 수동 아웃리저시스템을 기준으로 했을 때에는 풍응답보다 지진응답을 제어하기 위하여 더 큰 용량의 MR 댐퍼가 필요하였지만 설계기준을 만족시키기 위해서는 풍응답제어가 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 따라서 Charleston 지역 풍응답 만족기준을 조금 초과하는 5000kN 용량의 MR 댐퍼를 사용하였다.

Table 1. MR damper capacity better than traditional outrigger system

	Earthquake	Wind
Charleston	2000 kN	750 kN
Anchorage	3000 kN	750 kN
LA	3500 kN	0 kN

Table 2. MR damper capacity better than performance limit

	Earthquake	Wind
Charleston	0 kN	4000 kN
Anchorage	0 kN	1250 kN
LA	2000 kN	0 kN

4. 스마트 아웃리저시스템 제어성능 평가

5000kN 용량의 MR 감쇠기를 이용한 스마트 아웃리저 댐퍼시스템의 제어성능을 LA 지역의 지진하중과 Charleston 지역의 풍하중에 대해서 평가하였다. 이때 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압은 최대(5V)로 일정하게 가하는 passive-on 상태로 하였다. 지진하중에 대한 변위시간이력과 풍하중에 대한 가속도시간이력곡선을 Figs. 12와 13에 나타내었다. 지진하중의 경우에는 아웃리저가 설치되지 않은 건물이 설계기준을 만족시키지 못하였고 아웃리저를 설치하면 매우 효과적으로 층간변위를 줄일 수 있었다. 스마트 아웃리저 댐퍼의 경우에는 일반 아웃리저보다 매우 우수한 층간변위 제어성능을 나타내었으며 특히 20초대 이후에서 매우 큰 응답저감을 나타내었다. Fig. 13에 나타낸 풍하중에 의한 가속도 시간이력그래프를 보면 아웃리저가 없는 일반구조물은 큰 가속도가 발생하여 성능평가기준을 만족하지 못하였다. 일반적인 수동 아웃리저시스템의 추가로 가속도가 저감되

기는 하지만 여전히 성능기준은 만족시키지 못하였다. 스마트 아웃리저 댐퍼시스템은 가속도 응답저감에 있어서 일반적인 아웃리저 시스템에 비하여 탁월한 성능을 나타내었다.

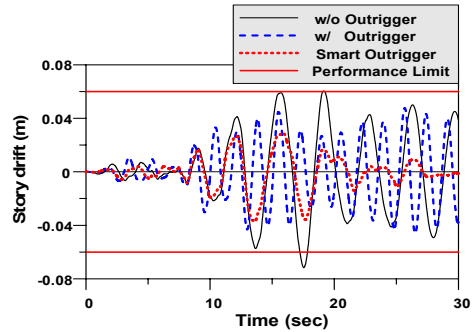


Fig. 12. Story drift time histories

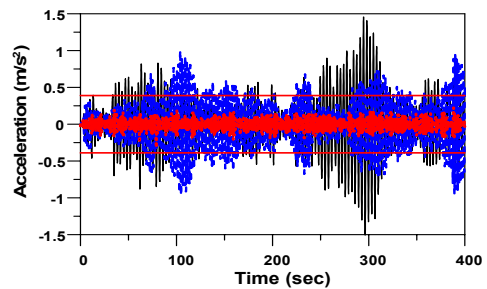


Fig. 13. Story acceleration time histories

지진하중에 의한 층간변위의 제어는 명령전압을 최대로 하여 감쇠력을 가장 크게 하는 것이 유리하지만 풍하중에 의한 가속도제어는 실시간으로 적절한 명령전압을 가하는 것이 필요하다. 이를 위하여 다목적 유전자알고리즘을 사용하여 퍼지논리제어기를 개발하였다[8]. 이때 변위응답과 가속도응답을 동시에 저감시키기 위하여 두 개의 목적함수를 설정하였다. 목적함수는 일반적인 수동 아웃리저시스템 대비 스마트 아웃리저 댐퍼시스템의 변위응답(J1) 및 가속도응답(J2)으로 하였다. 이렇게 얻은 최적해집합을 Fig. 14에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 최적화된 FLC로 제어한 최적해집합의 J1과 J2는 모두 0.640 및 0.253보다 작은 값을 나타낸다. 이에 비하여 passive-on 상태로 제어한 시스템의 J1과 J2는 각각 0.791 및 0.313이었다. MOGA로 최적화된 FLC를 사용하면 변위응답과 가속도응답에 대해서 스마트 아웃리저 댐퍼시스템이 모두 매우 우수한 제어성능을 나타내는 것을 알 수 있다.

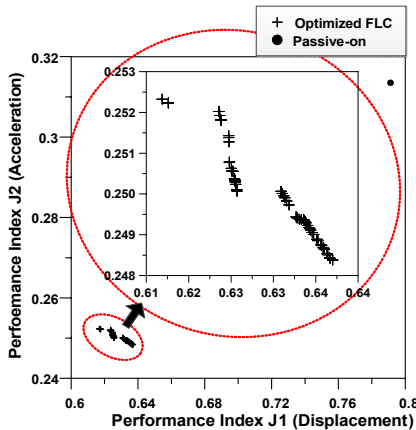


Fig. 14. MOGA-optimized FLCs

5. 결론

본 연구에서는 아웃리거 시스템은 지진하중에 의한 고층건물의 층간변위를 매우 효과적으로 제어할 수 있었지만 풍하중에 대해서는 적절하게 설계되지 않으면 오히려 가속도응답을 증가시킬 수도 있었다. 스마트 아웃리거 댐퍼시스템은 사용된 MR 댐퍼의 용량이 증가할수록 지진하중과 풍하중의 멀티해저드에 대해서 모두 효과적으로 제어성을 나타내었다. 지진하중에 의한 층간변위를 제어하기 위해서는 최대 명령진압을 지속적으로 가하는 방법이 효과적이었다. 이에 비하여 풍하중에 대해서는 MOGA로 최적화된 FLC를 사용하면 passive-on으로 제어한 경우에 비하여 가속도응답과 변위응답 모두 큰 폭으로 저감시킬 수 있었다. 본 연구에서는 한 개의 30층 예계구조물만을 대상으로 수치해석을 수행하였고 결과를 분석하였다. 따라서 본 연구의 결과를 일반화시키기에는 무리가 따른다. 아웃리거시스템은 주로 초고층건물을 대상으로 적용되기 때문에 보다 다양한 층수를 가진 구조물에 대한 분석이 반드시 필요하며 이는 추후 연구를 통해 이루어질 계획이다.

References

[1] Y.K., Wen, Y.J. Kang, "Minimum building life-cycle cost design criteria. I: Methodology," *ASCE Journal of Structural Engineering*, vol. 127, no. 3, pp. 330-337, 2001.

DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:3\(330\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:3(330))

- [2] Y. Li, A. Ahuja, J. Padgett, "Review of methods to assess, design for, and mitigate multiple hazards," *ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 26, no. 1, pp. 104 - 117, 2012.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000279](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000279)
- [3] M.M. Ali, K.S. Moon, "Structural developments in tall buildings: Current trends and future prospects", *Architectural Science Review*, vol. 50, no. 3, pp. 205-223, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.3763/asre.2007.5027>
- [4] W.M.G. Ho, "The evolution of outrigger system in tall buildings," *International Journal of High-Rise Buildings*, vol. 5, no. 1, pp. 21-30, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.21022/IJHRB.2016.5.1.21>
- [5] R.J. Smith, M.R. Willford, "The damped outrigger concept for tall buildings," *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 16, no. 4, pp. 501-517, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1002/tal.413>
- [6] D.Y. Kim, "Application of outrigger dampers to songdo NEATT", *Spring Conference of The Korea Institute of Building Construction*, vol. 10, no. 1, pp. 69-74, 2010.
- [7] B.F. Spencer, Jr., S.J. Dyke, M.K. Sain, J.D. Carlson, "Phenomenological model of magnetorheological dampers," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, vol. 123, no. 3, pp. 230-238, 1997.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1997\)123:3\(230\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:3(230))
- [8] M.D. Symans, S.W. Kelly, "Fuzzy logic control of bridge structures using intelligent semi-active seismic isolation," *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, vol. 28, pp. 37-60, 1999.
DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199901\)28:1<37::AID-EQE803>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199901)28:1<37::AID-EQE803>3.0.CO;2-Z)
- [9] K. Deb, A. Pratap, S. Agrwal, T. Meyarivan, "A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II", *IEEE Transaction on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, pp. 181-197, 2002.
DOI: <https://doi.org/10.1109/4235.996017>
- [10] ASCE, Minimum design loads for buildings and other structures (ASCE/SEI 7-10), American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2010.
- [11] Y. Zhou, T. Kijewski, A. Kareem, "Aerodynamic Loads on Tall Buildings: An Interactive Database," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, vol. 129, no. 3, pp. 394-404, 2003.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:3\(394\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:3(394))
- [12] IBC 2012, International Building Code, International Code Council, Country Club Hills, IL, 2012.
- [13] A. Tallin, B. Ellingwood, "Wind induced lateral-torsional motion of buildings," *Journal of Structural Engineering*, vol. 111, no. 10, pp. 2197-2213, 1985.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1985\)111:10\(2197\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111:10(2197))

김 현 수(Hyun-Su Kim)

[정회원]



- 2002년 8월 : 성균관대학교 건축공학
학과 (공학박사)
- 2004년 12월 : Texas A&M
University, Department of Civil
Engineering (박사후 연구원)
- 2008년 3월 ~ 현재 : 선문대학교
건축사회환경학부 부교수

<관심분야>

구조해석, 진동제어, 최적설계