

TMD 기반 적응형 스마트 구조제어시스템의 멀티해저드 적응성 평가

김현수
선문대학교 건축사회환경학부

TMD-Based Adaptive Smart Structural Control System for Multi-Hazard

Hyun-Su Kim

Division of Architecture, Architectural and Civil Engineering, Sunmoon University

요약 본 연구에서는 멀티 해저드를 고려한 빌딩 구조물의 안전성 및 사용성에 대한 평가를 수행하였고 지진 하중 및 풍 하중에 대한 안전성과 사용성이 관련된 구조 성능을 개선하기 위하여 TMD 기반 적응형 스마트 구조 제어 시스템을 제안하였다. TMD 기반 적응형 스마트 구조 제어 시스템은 MR 감쇠기를 이용하여 구성하였다. 멀티 해저드 하중을 작성하기 위하여 미국의 대표 강진 지역 및 강풍 지역을 선택 하여 해당 지역의 특성을 고려한 인공 지진 하중 및 인공 풍 하중을 작성 하였다. 작성된 하중을 사용하여 20층 예제 구조물의 안전성 및 사용성을 검토하였다. 대상 예제 구조물의 안전성 및 사용성을 개선하기 위하여 스마트 TMD를 적용 하였고 성능 개선 정도를 평가하였다. 스마트 TMD는 MR 감쇠기를 이용하여 구성하였다. 수치 해석 결과 예제 구조물은 멀티 해저드에 대하여 안전성 및 사용성 측면에서 모두 설계 기준 값을 벗어났다. 스마트 TMD가 안전성과 연관되는 지진 응답과 사용성과 연관되는 풍 응답을 모두 효과적으로 저감시키는 것을 확인하였다.

Abstract This paper evaluated the safety and serviceability of a building structure considering the multi-hazard and proposed TMD-based adaptive smart control system to improve the structural performance. To make multi-hazard loads, an artificial earthquake and artificial wind loads were generated based on representative regions of strong seismicity and strong wind in U.S.A. The safety and serviceability of a 20-story example building structure were investigated using the generated artificial loads. A smart TMD was employed to improve the safety and serviceability of the example structure and its capacity of structural performance improvement was evaluated. The smart TMD was comprised of a MR (magnetorheological) damper. Numerical analysis showed that the example building structure could not satisfy the design limit of safety and serviceability with respect to multi-hazard. The smart TMD effectively reduced the seismic responses associated with the safety and wind-induced responses associated with serviceability.

Keywords : Seismic Responses, Wind-Induced Responses, Multiple Hazards, MR Damper, Vibration Control Algorithm, Dynamic Response Reduction.

1. 서론

최근 국내외적으로 대형 지진이나 태풍 및 홍수와 같은 대규모 자연재해가 빈번하게 발생하여 인명피해 및

재산피해가 급격히 증가하고 있다. 따라서 근래에 멀티 해저드(다중 재난하중) 상황에서 구조물의 안전성 평가나 설계방법에 대한 연구가 다수 진행되고 있는 상황이다[1,2]. 멀티해저드 해석에 대한 개념이 상당히 광범위

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 April 24, 2017

Revised May 16, 2017

Accepted July 7, 2017

Published July 31, 2017

하고 수행된 관련 연구의 범위도 매우 넓게 펼쳐져 있다. 즉, 어떤 연구는 강한 지진이 발생한 후 발생할 수 있는 화재나 홍수와 같이 동시에 발생하는 재난하중에 대한 연구를 멀티해저드 해석으로 정의하고 있는 반면에 또 다른 연구에서는 구조물에 다른 시간에 서로 연관이 없이 영향을 미치는 재난하중을 다루고 있다. 본 연구에서는 후자의 연구 개념을 도입하여 멀티해저드에 대하여 TMD 기반 적응형 스마트 구조제어시스템의 제어성능을 검토하였다.

멀티해저드에 대한 선행연구를 보면 대부분의 연구가 다중 재난하중의 확률론적 위험도평가에 대한 연구임을 알 수 있다. 즉, 지진하중 및 풍하중과 같은 멀티해저드에 대해 안전성과 사용성을 시간이력해석을 통해 검토한 사례는 아직 많이 보고되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 인공 지진하중과 풍하중을 사용한 시간이력해석을 수행하였다. 멀티해저드를 구성하는 강진지역을 대표하는 지진하중은 미국 LA 지역의 특성을 기반으로 생성하였고 강풍지역을 대표하는 풍하중은 미국 찰스턴 지역의 특성을 기반으로 작성하였다. TMD 기반 적응형 스마트 구조제어시스템(스마트 TMD)를 구성하기 위하여 MR 감쇠기를 사용하였고 Bouc-Wen 모델[3]을 사용하여 모형화하였다. 구조물의 안전성 평가는 ASCE 7-10[4]에 근거하여 최대 층간변위로 판단하였고 사용성 평가는 Tallin 과 Ellingwood의 연구결과[5]에 따라 최대 가속도 응답을 기준으로 평가하였다.

2. 해석모델 및 스마트 TMD의 구성

본 연구에서는 도시에 건설된 20층 빌딩구조물을 예제구조물로 선택하였다. 선택한 예제구조물에는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 스마트 TMD를 최상층에 설치하였다. 20층 예제구조물은 각 층별 집중질량(m_i)과 기동강성(k_i) 및 점성감쇠로 표현되는 전단빌딩모델을 사용하여 모형화하였다. 건물의 총 질량(m_n)은 $8.0 \times 10^5 kg$ 으로 모든 층을 동일하게 두었고 각 층의 강성(k_n)은 $1.4 \times 10^9 N/m$ 로 두었다. 또한 예제구조물의 1차모드와 2차모드 감쇠비를 2%로 가정하여 Rayleigh 감쇠로 감쇠행렬을 구성하였다. 본 연구에서 사용한 예제구조물을 이용하여 고유치해석 한 결과 5개 저차모드 고유진동주기는 1.96, 0.65, 0.39, 0.28, 0.22초로 나타났다.

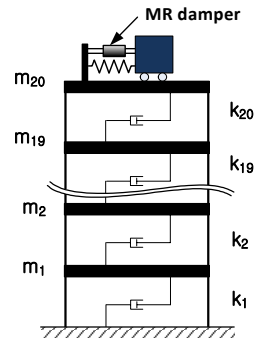


Fig. 1. Example structure with smart TMD

최상층에 설치된 스마트 TMD의 질량은 전체 구조물 질량의 3%로 설정하였다. 스마트 TMD의 강성은 스마트 TMD의 주기가 20층 예제구조물의 1차모드 고유진동주기와 일치하도록 조율하였다. 본 연구에서 사용한 스마트 TMD는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 강성 및 MR 감쇠기로만 구성되어 있고 일반 수동 TMD에서 사용되는 수동 감쇠기는 사용하지 않았다. 스마트 TMD의 제어성능은 일반적으로 MR 감쇠기의 용량에 따라서 큰 영향을 받게 된다. 따라서 본 연구에서는 50kN 용량의 MR 감쇠기 해석모델을 사용하여 용량을 변화시키는 파라미터 해석연구를 수행하였고 지진 및 풍하중에 대해서 가장 효과적으로 제어성능을 나타내는 MR 감쇠기 용량을 검토하였다. 50kN MR 감쇠기의 속도-힘 관계를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 MR 감쇠기로 전달되는 최대전압은 5 volt이고 최소전압은 0 volt이다.

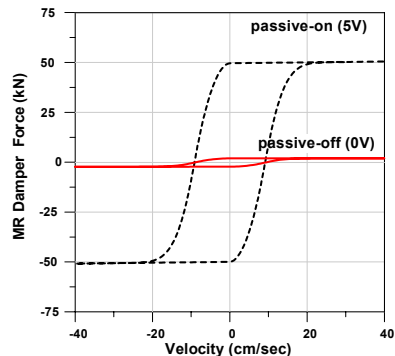


Fig. 2. Velocity-force relationship of 50kN MR damper

본 연구에서는 풍하중 및 지진하중을 받는 스마트 TMD를 효과적으로 준능동 제어알고리즘으로 널리 사용되고 있는 그라운드훅(groundhook)[6] 제어 알고리즘

을 사용하였다. 다양한 버전의 알고리즘 중에서 변위기 반 on-off 그라운드혹 제어알고리즘을 적용하였다. 그라운드혹 제어알고리즘은 비교적 간단한 연산으로 스마트 TMD를 어느 정도 효과적으로 제어할 수 있는 것으로 알려져 있다[7].

3. 멀티해저드 하중

본 연구에서는 멀티해저드 하중을 생성하기 위하여 미국의 LA 및 찰스턴 지역의 특성을 이용하였다. LA는 미국의 대표적인 강진지역으로서 이를 바탕으로 인공지진하중을 작성하였고 미국 동부의 찰스턴은 허리케인의 영향을 자주 받는 대표적인 강풍지역으로 이 지역의 특성을 바탕으로 인공풍하중을 작성하였다. ASCE 7-10[4]의 기준에서 제시하는 LA의 최대지진가속도(PGA; Peak Ground Acceleration)는 0.626g이고 찰스턴의 설계기준풍속(V_s)은 63m/s이다. 멀티해저드 하중 중 지진하중은 ASCE 7-10을 바탕으로 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 LA지역의 설계응답스펙트럼을 작성한 후 해당 응답스펙트럼을 잘 나타내는 인공지진하중을 SIMQKE[8]을 사용하여 생성하였다. 생성된 인공지진하중의 응답스펙트럼을 Fig. 3에 설계응답스펙트럼과 함께 나타내었다.

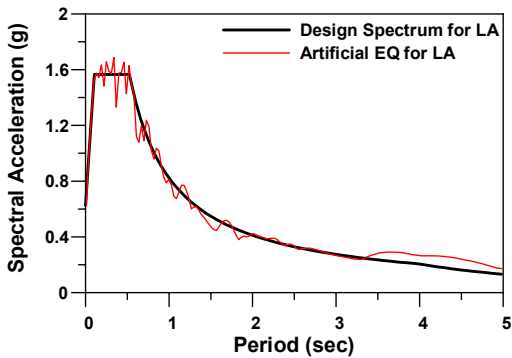


Fig. 3. Design and artificial EQ spectrum

인공지진하중은 0.01초의 시간간격으로 30초 길이로 생성하였고 생성한 인공지진하중의 시간이력그래프를 Fig. 4에 나타내었다.

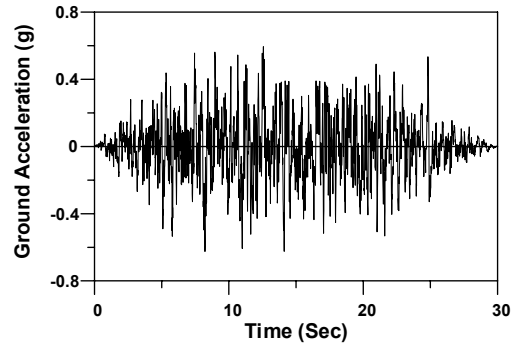


Fig. 4. Ground acceleration of artificial EQ

멀티해저드의 강풍지역 인공풍하중을 생성하기 위한 20층 예제 구조물의 찰스턴지역 평균풍속그래프와 변동풍속의 난류강도를 층별로 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 보는 것처럼 평균풍속은 고층으로 올라갈수록 늘어나고 변동풍속의 난류강도는 고층으로 올라갈수록 작아지는 것을 알 수 있다.

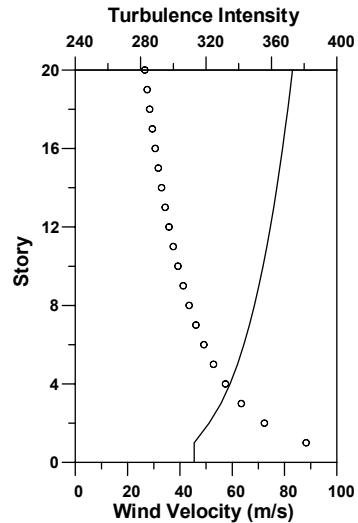


Fig. 5. Average wind velocity and turbulence intensity along the story

인공풍하중을 작성하기 위하여 헤서는 건물의 높이 및 형태 등을 결정하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 예제구조물의 층고를 4m로 하여 전체 건물의 높이를 80m로 두었고 풍하중을 받는 건물의 폭을 16m로 하였다. 인공풍하중을 생성하기 위한 기본풍속으로는 찰스턴 지역의 값인 63m/s로 하였고 노풍도는 C, 중요도계수는 1.0으로 하였다. 널리 사용되고 있는 Kaimal Spectrum을

이용하여 인공풍하중을 생성하였고 인공풍하중은 0.1초 간격으로 300초 동안의 풍하중 시간이력을 작성하였다. 생성된 인공풍하중의 20층 시간이력을 Fig. 6에 나타내었다.

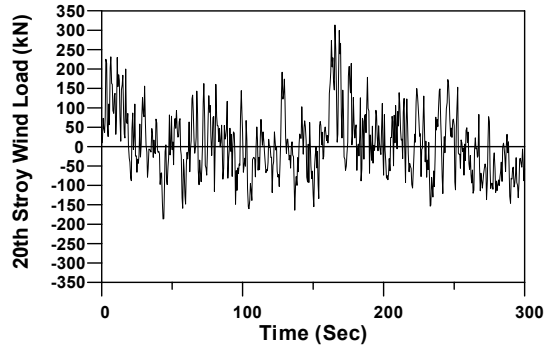


Fig. 6. 20th story wind load time history

4. 멀티해저드 제어성능 평가

본 논문에서는 서로 동적특성이 상이한 지진하중 및 풍하중을 멀티해저드 하중으로 선정하고 이에 대한 스마트 TMD의 제어성능을 검토하였다. 예제구조물의 지진하중이나 풍하중에 대한 안전성 및 사용성을 검토하기 위해서는 성능기준을 설정하는 것이 필요하다. 지진하중을 받는 구조물의 안전성을 검토하기 위하여 사용되는 지표가 많이 있지만 그중에서 본 논문에서는 가장 널리 사용되고 있는 층간변위(inter-story drift)를 사용하였다. 지진하중에 대한 층간변위의 허용기준에 대해서는 ASCE7-10 및 IBC2012 설계기준에서 층고의 1.5%를 최대 층간변위로 제시하고 있다. 전술한 바와 같이 본 연구에서 사용하는 빌딩구조물의 층고는 4m이기 때문에 지진하중에 대한 안전성을 검토하기 위한 기준은 층간변위 0.06m이다. 풍하중은 태풍과 같은 강풍일지라도 건축구조물의 안전성에 영향을 미치기 보다는 사용성에 문제를 야기하는 경우가 많다. 풍하중을 받아서 진동하는 구조물의 사용성에 대한 연구가 다수 수행되어왔다. 본 논문에서는 Tallin과 Ellingwood[5]가 제안한 심리적 안정과 일상적인 작업을 할 수 있는 기준인 0.04g (0.39m/s²)를 설계기준으로 선택하였다.

스마트 TMD에 의한 멀티해저드 제어성능을 평가하기 위하여 MR 감쇠기의 용량을 변화시키면서 예제구조물의 최대층간변위를 검토하여 Fig. 7에 나타내었다. 그

림을 보면 MR 감쇠기의 용량이 커질수록 예제구조물의 최대층간변위가 큰 폭으로 감소하다가 약 6,500kN이후부터는 증가하는 것을 알 수 있다. 그림에서 보듯이 예제구조물을 제어하지 않은 경우에는 0.06m보다 더 큰 최대 층간변위를 나타내므로 설계기준을 만족하지 못한다. 일반적인 수동 TMD를 사용한 경우에는 최대 층간변위를 0.0412까지 줄일 수 있으므로 설계기준을 만족시킬 수 있었고 스마트 TMD를 사용한 경우에는 MR 감쇠기의 용량이 6,500kN인 경우에 0.0289m까지 대폭 줄일 수 있었다. 이것을 수동 TMD의 응답을 약 30% 더 줄일 수 있음을 의미한다.

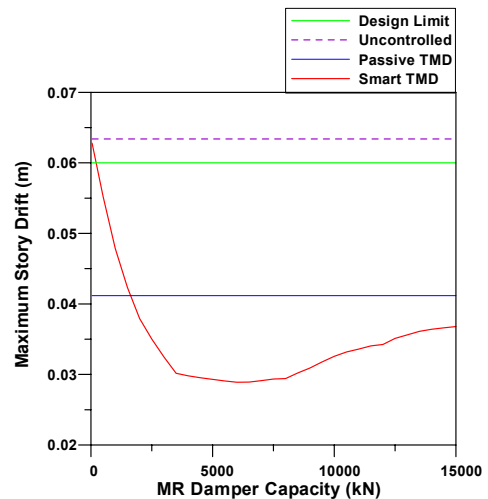


Fig. 7. Maximum story drift due to earthquake

멀티해저드 중 풍하중에 대한 스마트 TMD의 제어성능을 검토하기 위해서 MR 감쇠기의 용량을 변화시키면서 예제구조물의 20층 최대가속도를 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 MR 감쇠기의 용량을 증가시키면 따라서 20층 최대가속도는 100kN까지 급격히 감소하다가 그 이후 다시 증가하였다. 예제구조물을 제어하지 않은 경우의 최대 가속도응답은 0.62m/s²으로 사용성 기준인 0.39m/s²를 크게 초과하였다. 스마트 TMD를 사용한 경우에 MR 감쇠기 용량이 약 100kN 일 때 0.30m/s²으로 설계기준을 효과적으로 만족시켰다. 20층 최대 가속도응답의 경우에는 수동 TMD를 사용한 경우에도 0.32m/s²를 나타냄으로써 매우 효과적으로 제어할 수 있음을 확인하였다. 최대 층간변위는 스마트 TMD의 제어성능이 수동 TMD에 비하여 월등히 뛰어났으나 최대 가속도응답에 있어서는 큰 차이를 나타내지 않았다.

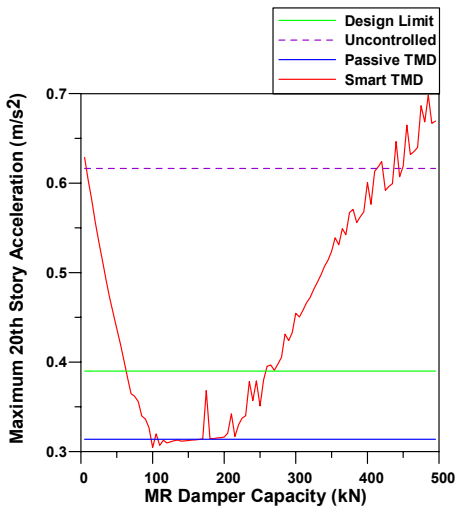


Fig. 8. Maximum acceleration due to wind

스마트 TMD의 MR 감쇠기의 용량이 6,500kN인 경우에 대하여 가장 큰 층간변위가 발생하는 1층의 층간변위 시간이력과 20층 절대변위 시간이력을 Figs. 9와 10에 나타내었다.

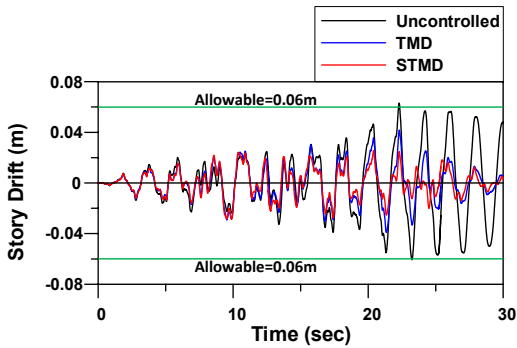


Fig. 9. Story drift time histories at 1st story

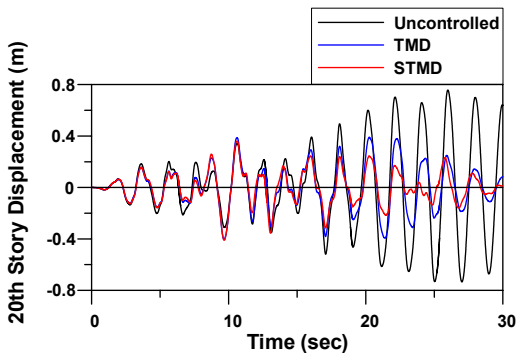


Fig. 10. 20th story displacement time histories

스마트 TMD는 1층 층간변위와 20층 절대변위를 매우 효과적으로 제어할 수 있었다. 스마트 TMD는 수동 TMD에 비하여 우수한 지진응답 제어성능을 나타내었고 약 20초 이후에서 나타나는 응답이 과도한 부분에 있어서 제어성능의 차이가 더 커지는 것을 확인할 수 있었다. 풍하중에 대해서는 100kN의 MR 감쇠기로 구성된 스마트 TMD와 수동 TMD 모두 가속도응답을 효과적으로 제어하여 설계 기준값 이하로 저하시키는 것을 확인할 수 있었다. 그림에서 볼 수 있듯이 스마트 TMD의 가속도 제어성능이 수동 TMD에 비해서는 우수하지만 그 차이는 별로 크지 않았다.

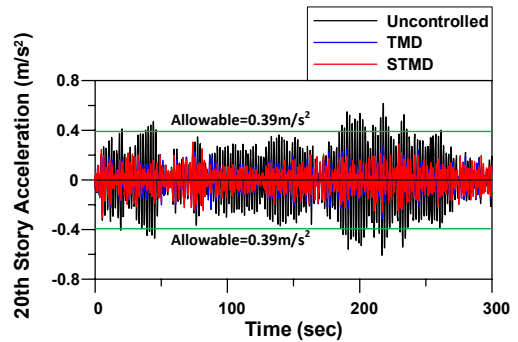


Fig. 11. 20th story acceleration time histories

풍하중이 가해지는 예제구조물에서 초기 30초 동안의 MR 감쇠기 변위와 감쇠력간의 관계를 Fig. 12에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 일반적인 감쇠기의 이력 곡선과 다른 이유는 그라운드훅 제어알고리즘을 사용하여 스마트 TMD를 제어하였기 때문이다.

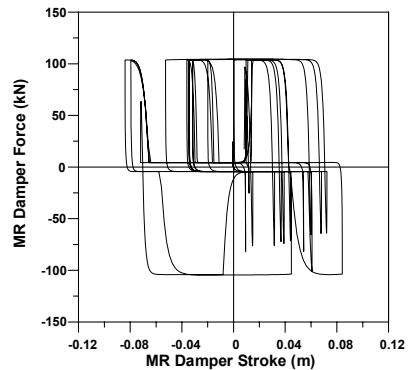


Fig. 12. MR force-displacement relationship of groundhook algorithm

앞에서 검토한 바와 같이 스마트 TMD는 지진과 풍 하중의 멀티해저드에 대해서 모두 효과적으로 제어성능을 나타낼 수 있었다. 그러나 멀티해저드로 고려하고 있는 Charleston의 풍하중과 LA의 지진하중에 대한 최적의 성능을 나타내는 MR 감쇠기의 감쇠력이 상이함을 알 수 있다. 따라서 멀티해저드 하중의 종류에 따라서 MR 감쇠기의 감쇠력을 효과적으로 조절할 수 있는 제어알고리즘의 개발이 필요하다고 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 멀티해저드 하중에 대한 TMD 기반 적응형 스마트 구조제어시스템의 제어성능을 검토해 보았다. 강진지역과 강풍지역의 특성을 바탕으로 인공지진 및 풍하중을 작성하여 수치해석을 수행하였고 안전성 및 사용성을 평가하였다. 스마트 TMD를 구성하는 MR 감쇠기의 용량을 변화시키는 파라미터 연구를 수행하였다. 해석결과 스마트 TMD는 지진 및 풍하중으로 구성된 멀티해저드에 대해서 안전성 및 사용성에 대한 설계기준을 충분히 만족시킬 수 있는 우수한 제어성능을 나타내는 것을 확인하였다. 지진하중 및 풍하중에 대해서 최적의 제어성능을 나타내는 MR 감쇠기의 용량이 다르므로 현재 구조물이 받고 있는 멀티해저드 하중의 특성을 실시간으로 파악하여 최적의 MR 감쇠력으로 조절할 수 있는 제어알고리즘 개발에 대한 연구가 추후 이루어질 계획이다.

References

- [1] D. Duthinh, E., Simiu, "Safety of structures in strong winds and earthquakes: multihazard considerations," ASCE Journal of structural engineering, vol. 136, no. 3, pp. 330-333, 2009.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000108](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000108)
- [2] C. Crosti, D. Duthinh, E. Simiu, "Risk consistency and synergy in multihazard design," ASCE Journal of Structural Engineering, vol. 137, no. 8, pp. 844-849, 2010.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000335](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000335)
- [3] R. H. Sues, S. T. Mau, Y. K. Wen, "System identification of degrading hysteretic restoring forces", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, vol. 114, no. 5, pp. 833-846, 1988.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1988\)114:5\(833\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1988)114:5(833))

- [4] ASCE, Minimum design loads for buildings and other structures, ASCE/SEI 7-05/-10, Reston, VA, US.
- [5] A. Tallin, B. Ellingwood, "Wind induced lateral-torsional motion of buildings," ASCE 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))
- [6] J. H. Koo, Using magneto-rheological dampers in semiactive tuned vibration absorbers to control structural vibrations, Ph. D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, 2003.
- [7] H. S. Kim, J. W. Kang, "Seismic response control of spatial arch structures using multiple smart TMD," Journal of Korean Association for Spatial Structures, vol. 16, no. 1, pp. 43-51, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.9712/KASS.2016.16.1.043>
- [8] D. A. Gasparini, E. H. Vanmarcke, "Simulated earthquake motions compatible with prescribed response spectra", Civil Engineering Research Report R76-4, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA, 1976.

김 현 수(Hyun-Su Kim)

[정회원]



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

<관심분야>

구조해석, 진동제어, 최적설계