

다중재난하중을 받는 인접건물의 연결제어에 대한 연구

곽신영¹, 김현수^{2*}

¹한국원자력연구원

²선문대학교 건축사회환경학부

Research on Coupling Control of Adjacent Buildings under Multiple Hazards

Shinyoung Kwag¹, Hyun-Su Kim^{2*}

¹Korea Atomic Research Institute

²Division of Architecture, Architectural & Civil Engineering, Sunmoon University

요약 본 논문에서는 다중재난하중을 받는 인접건물의 동적응답에 대한 연결제어기법의 제어성능을 수치해석적인 방법을 사용하여 검토하였다. 이를 위하여 강진지역인 LA 지역의 지진하중과 강풍지역인 찰스턴 지역의 풍하중을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 인공 지진하중과 풍하중은 ASCE 7-10을 바탕으로 생성하였고 인공지진하중은 SIMQKE를 사용하여 작성하였으며 인공풍하중은 Kaimal Spectrum을 이용하여 작성하였다. 10층 및 20층의 인접구조물을 예제구조물로 사용하였고 비선형 이력댐퍼를 이용하여 연결제어를 하였다. 비선형 이력댐퍼를 간편하게 모형화하기 위하여 주로 MR 감쇠기를 모형화할 때 사용하는 Bouc-Wen 모델을 사용하였다. 비선형 이력댐퍼는 10층에만 설치한 경우와 1층에서 10층까지 모든 층에 설치한 경우에 대해서 고려하였다. 각 층에 사용하는 댐퍼의 개수를 증가시킨 파라미터 스터디를 수행하였고 지진하중 및 풍하중에 대한 최적의 성능을 보이는 설계안을 검토하였다. 수치해석결과 비선형 이력댐퍼를 이용한 연결제어를 통하여 다중재난하중에 대한 인접건물의 동적응답을 효과적으로 저감시킬 수 있었고 각각의 재난하중에 대한 최적설계결과가 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한 연결되는 감쇠기를 과도하게 사용하면 오히려 구조물의 응답을 증가시킬 수 있으므로 주의 깊은 설계과정이 필요함을 알 수 있었다.

Abstract In this study, numerical analyses were used to investigate the performance of a coupling control method for the dynamic responses of adjacent buildings under multiple hazards. Numerical simulations were done using the earthquake loads of regions with strong seismicity in Los Angeles, California, and the wind loads in regions with strong winds in Charleston, North Carolina. The artificial earthquake and wind loads were made using SIMQKE and Kaimal Spectrum based on ASCE 7-10. Ten-story and twenty-story adjacent buildings were selected as example structures, and nonlinear hysteretic dampers were used to connect them. The Bouc-Wen model was used to model the nonlinear hysteretic dampers. The results show that the proposed control method could effectively reduce the dynamic responses, and the optimal control designs were different for each hazard.

Keywords : Multiple Hazards, Coupled Building Control, Nonlinear Hysteretic Damper, Earthquake Excitation, Wind Excitation, Dynamic Response Reduction.

1. 서론

경제 발전과 함께 도시화가 급속히 진행되고 이에 따라 대지를 보다 효과적으로 이용하기 위하여 건물들이

매우 근접하게 건설되고 있다. 이렇게 인접하게 건설된 건물들은 때때로 건축적인 이유로 연결통로로서 스카이라프트로 연결되기도 하고 구조물의 동적응답을 저감시키거나 지진충돌(seismic pounding)을 방지하기 위하여

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2013R1A1A2058312).

*Corresponding Author : Hyun-Su Kim

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

Received February 29, 2016

Revised March 23, 2016

Accepted May 12, 2016

Published May 31, 2016

감쇠기로 연결되기도 한다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이 구조물을 연결하여 제어하고자하는 연구는 Klein 등의 연구[1]를 시작으로 해서 현재까지 다수의 연구가 진행되어 왔다[2,3,4]. 현재까지 진행된 대부분의 연구는 주로 건물간의 연결제어를 통하여 지진응답을 저감시키는 것을 목적으로 수행되어 왔고 풍하중에 대한 연결제어성을 검토한 사례는 많지 않다. 또한 대부분의 연결제어에 대한 연구는 구조물을 선형감쇠기로 연결한 상태에서 이루어 졌으며 감쇠기의 비선형성을 고려한 연구는 많지 않다. 요즈음 지진하중과 풍하중의 영향을 모두 고려한 다중 재난시 구조물의 안전성에 대한 연구[5,6]가 다수 수행 중에 있다. 이러한 연구의 대부분은 확률론적 방법을 사용하고 있고 시간이력해석을 통한 구조물의 구체적인 동적거동을 분석한 연구는 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 지진하중과 풍하중의 다중재난하중을 받는 인접건물의 연결제어에 대한 성능평가를 수행하였다. 인접한 건물을 연결하는 감쇠기의 비선형성을 고려하기 위하여 MR 감쇠기를 사용하였고 이를 모형화하기 위하여 Bouc-Wen 모델[7]을 사용하였다. 다중재난하중을 설정하기 위해서 미국의 대표적인 강진지역인 LA 지역을 나타내는 인공지진하중을 생성하였고 허리케인의 영향으로 설계 풍하중이 매우 큰 찰스턴 지역을 나타내는 인공풍하중을 생성하였다. 인접한 20층 및 10층 건물을 예제구조물로 선택하여 수치해석을 수행하였고 1층에서 10층까지의 모든 층에 감쇠기가 설치되는 경우와 10층에만 설치되는 경우의 제어성능을 비교·검토하였다. 또한 지진하중과 풍하중에 대하여 각각 최고의 제어성능을 나타내는 연결제어 설계결과를 분석하였다



Fig. 1. Triton Square complex in Tokyo, Japan

2. 예제구조물

본 연구에서는 다중 재난하중에 대한 인접한 건축구조물의 연결제어성능을 검토해보기 위하여 Fig.2에 나타난 10층 및 20층 구조물을 예제구조물로 선택하였다. 예제구조물은 각 층별 집중질량(m_i)과 기둥강성(k_i) 및 점성감쇠로 표현되는 전단빌딩모델을 사용하여 모형화하였다. 건물 A와 B의 층 질량인 $m_{n1}^{(1)}$ 과 $m_{n2}^{(2)}$ 를 동일하게 $8.0 \times 10^5 kg$ 으로 두었고 층 강성인 $k_{n1}^{(1)}$ 과 $k_{n2}^{(2)}$ 를 $1.4 \times 10^9 N/m$ 로 두었다. 또한 건물 A와 B의 1차모드와 2차모드 감쇠비를 2%로 가정하여 Rayleigh 감쇠로 감쇠행렬을 구성하였다. 본 연구에서 사용한 독립된 예제구조물을 이용하여 고유치 해석 한 결과 20층 및 10층 건물의 3개 저차모드 고유진동수는 0.51, 1.52, 2.54 Hz와 1.00, 2.96, 4.86 Hz로 나타났다.

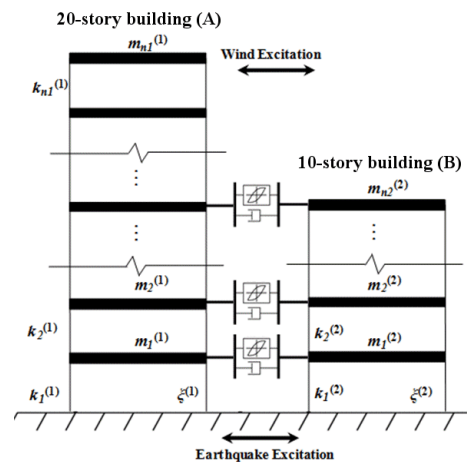


Fig. 2. Example building coupled by MR damper

연결제어를 통한 인접구조물의 응답제어성능을 검토하기 위해서는 지진하중 및 풍하중에 대해 구조물의 안전성이나 사용성을 만족시킬 수 있는 성능기준을 설정하는 것이 필요하다. 지진하중을 받는 구조물의 안전성을 나타내는데 사용되는 여러 가지 지표 중에 층간변위(inter-story drift)가 가장 널리 사용되고 있다. ASCE7-10 및 IBC2012 설계기준에서는 층고의 1.5%를 최대 층간변위로 제시하고 있다. 본 연구에서 사용하는 예제구조물의 층고를 4m로 가정하였으므로 지진하중을 받는 예제구조물의 안전성에 대한 설계기준은 층간변위

0.06m이다. 반면에 일반적으로 풍하중은 건축구조물의 안전성에 영향을 미치지 보다는 사용성에 문제를 유발하는 경우가 많다. 풍하중을 받는 구조물의 사용성에 대한 연구가 다수 수행되어왔는데 본 연구에서는 Tallin과 Ellingwood[8]가 제안한 심리적 안정과 일상적인 작업을 할 수 있는 기준인 0.04 g (0.39 m/s^2)를 설계기준으로 선택하였다.

Fig.2에 나타낸 바와 같이 인접한 건물을 연결하는 감쇠기는 MR 감쇠기를 모형화하는데 주로 사용되는 Bouc-Wen 모델을 사용하여 감쇠기의 비선형성을 고려하였다. 본 연구에서는 Fig. 3에 서 볼 수 있듯이 약 100 kN의 최대감쇠력을 가지는 MR감쇠기를 인접한 예제구조물의 연결에 사용하였다. MR 감쇠기의 감쇠력은 감쇠기로 전달되는 명령전압에 의해서 결정되는데 사용된 MR 감쇠기는 0 volt의 전압이 전달될 때 최소 감쇠력을 나타내고 5 volt의 전압에서 최대 감쇠력을 나타낸다.

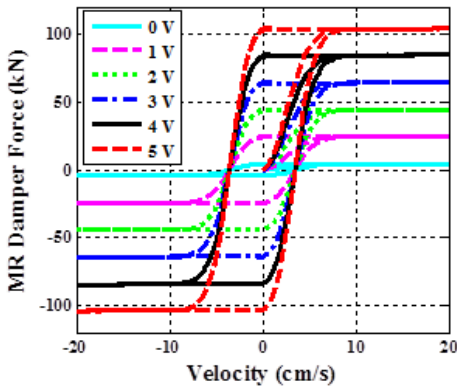


Fig. 3. Nonlinear behavior of the MR damper

3. 다중재난하중

본 논문에서는 다중재난하중에 대한 인접건물의 연결 제어성능을 검토하기 위해서 미국의 지진 및 풍하중지역을 대표하는 도시를 선택하였다. LA는 미국의 대표적인 강진지역이지만 상대적으로 풍하중은 약하게 발생한다. 미국 동부의 Charleston은 허리케인의 영향으로 풍하중은 매우 크게 발생하지만 비교적 작은 지진하중이 발생하는 지역이다. 미국 알래스카의 Anchorage는 지진하중과 풍하중 모두 상대적으로 중간정도의 크기로 발생한다. ASCE 7-10[9]의 기준에서 제시하는 세 도시의 최대

지진가속도(PGA; Peak Ground Acceleration) 및 설계기준풍속(Vs)을 표 1에 나타내었다. 그리고 동일한 내용을 Fig. 4에 그리드 형태로 나타내었다. 그림에서 보듯이 최대 지진하중은 LA지역의 지진하중으로 선택하고 최대 풍하중은 Charleston 지역의 풍하중을 선택한 가상의 다중재난 지역을 설정하고 해당 지역의 인공 풍하중 및 지진하중을 생성하였다.

Table 1. Design levels of earthquake and wind at different sites

	EQ (PGA)	Wind (Vs)
LA	0.626g	38 m/s
Anchorage	0.400g	54 m/s
Charleston	0.314g	63 m/s

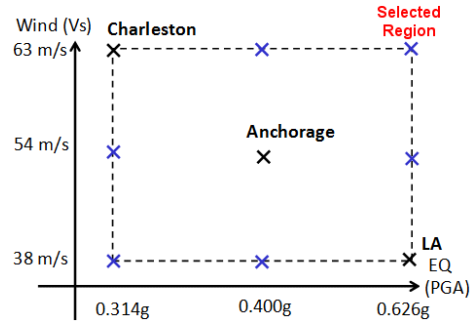


Fig. 4. Grid for multiple hazards of EQ and wind

지진하중은 ASCE 7-10을 바탕으로 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 설계응답스펙트럼을 작성한 후 해당 응답스펙트럼에 부합하는 인공지진하중을 SIMQKE[10]을 사용하여 생성하였고 이때 지반 종류는 D로 선택하였다. 생성된 인공지진하중의 응답스펙트럼을 Fig. 5에 설계응답스펙트럼과 함께 나타내었다. 인공풍하중을 생성하기 위한 20층 구조물의 도시별 평균풍속그래프를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 보듯이 가장 큰 Charleston 지역의 풍속을 사용하였고 Kaimal Spectrum을 이용하여 인공풍하중을 작성하였다. 인공풍하중 작성 시 기본 풍속은 Table 1에 나타낸 바와 같이 각 도시별로 ASCE 7-10에서 제시한 값을 이용하였고, 노풍도는 C로 하였고 0.1초 간격으로 1000초 동안의 풍하중 시간이력을 작성하였다. 각 층에 집중하중 형태로 인공풍하중 데이터를 생성하였고 연결제어시스템의 성능을 풍방향 성분만을 고려하여 평가하였다.

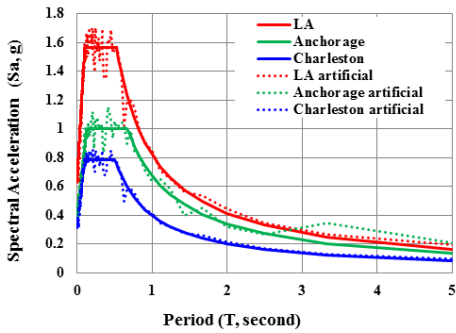


Fig. 5. Design spectrum and compatible ground motions

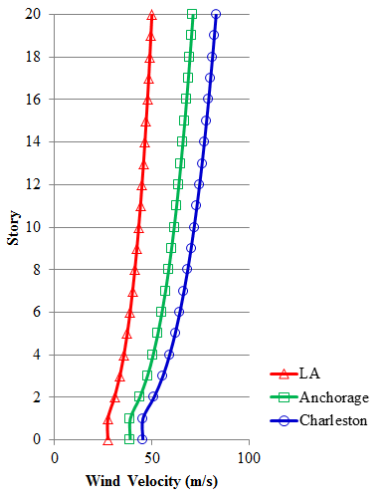
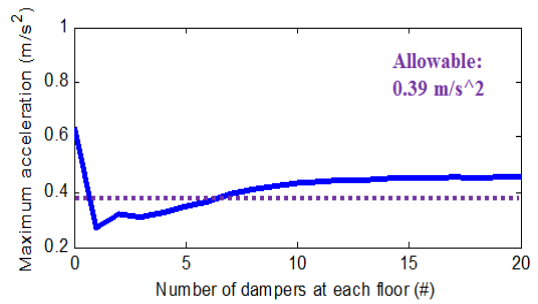


Fig. 6. Average wind velocity for 20-story building

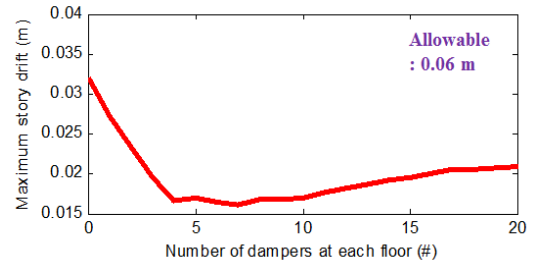
4. 파라미터 연구

인접건물의 연결제어성능을 검토해보기 위하여 우선 인접한 예제구조물의 1층에서 10층까지의 모든 층에 감쇠기를 설치하는 경우를 고려해 보았다. 이때 설치되는 모든 MR 감쇠기에는 최대 감쇠력을 발휘할 수 있는 5 volt가 가해지고 각 층에 설치되는 MR 감쇠기의 증가에 따른 구조물 응답의 변화를 검토하였다. 지진하중에 대한 구조물의 안전성을 나타내는 지표로 선택한 층간변위 설계기준(0.06m)과 풍하중에 대한 사용성 지표인 가속도 설계기준(0.39 m/s^2)을 그래프에 동시에 나타내었다.

강풍지역인 Charleston에서의 풍응답과 지진응답을 Fig. 7에 나타내었고 강진지역인 LA에서의 풍응답과 지진응답을 Fig. 8에 나타내었다. Charleston 지역의 응답을 보면 예제구조물의 연결제어에 사용되는 MR 감쇠

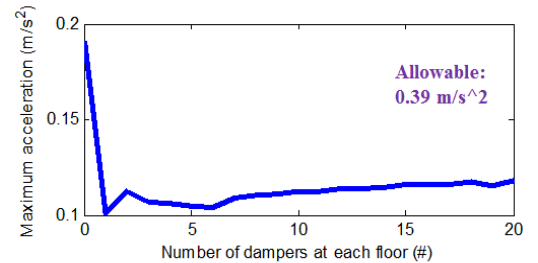


(a) maximum acceleration due to wind

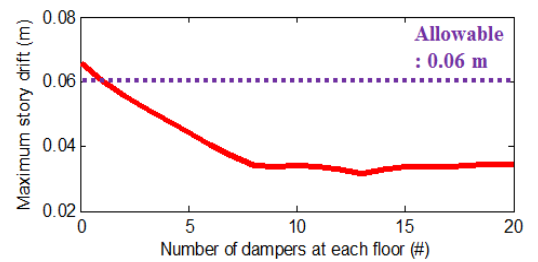


(b) maximum story drift due to earthquake

Fig. 7. Performance comparison in Charleston(Uniformly Installed at All Floors)



(a) maximum acceleration due to wind



(b) maximum story drift due to earthquake

Fig. 8. Performance comparison in LA(Uniformly Installed at All Floors)

기의 개수를 늘리면 어느 정도까지는 동적응답이 감소하다가 특정한 개수 이후에는 오히려 응답이 늘어나는 것을 알 수 있다. 풍하중에 의한 최대 가속도응답의 경우에

는 층당 1개씩 설치할 때까지는 응답이 급격히 줄다가 그 이후에는 감쇠기를 추가 설치할수록 오히려 응답이 증가한다. 지진하중에 의한 최대 층간변위의 경우에는 층당 4개씩 설치할 때까지는 응답이 급격히 줄다가 그 이후로 응답이 비슷한 양상을 보인다. 그 후 층당 10개 이상을 설치할 경우에 최대 층간변위가 오히려 증가한다. Charleston 지역은 강풍지역이기 때문에 최대 가속도 설계기준인 0.39 m/s^2 을 초과하는 구간이 발생하지만 지진하중에 의한 최대 층간변위는 전 구간에 걸쳐서 설계기준인 0.06m 를 만족시키는 것을 알 수 있다. LA 지역의 풍하중에 의한 최대 가속도 응답의 경우에는 사용하는 댐퍼의 개수에 따른 응답변화의 경향이 Charleston의 경우와 매우 유사하다. 그러나 LA지역이 강풍지역이 아니기 때문에 응답의 절대치는 Charleston에 비해서 매우 작게 나타나므로 모든 구간에 걸쳐서 설계기준을 만족시킨다. LA 지역의 지진하중에 의한 최대 층간변위의 경우에는 층당 설치되는 감쇠기의 수가 8개까지는 응답이 감소하다가 그 이상은 감쇠기를 증가시켜도 응답성능의 개선이 거의 이루어지지 않는다. LA 지역은 강진 지역이기 때문에 연결제어를 사용하지 않은 경우에는 예제구조물이 지진하중에 의한 층간변위 설계기준을 만족시키지 못한다. 따라서 층당 2개 이상의 감쇠기를 설치해야 층간변위 설계기준을 만족시킬 수 있다. Figs. 7과 8을 보면 예제 인접구조물의 전 층을 다 연결시켰을 때 재난하중으로 고려하고 있는 Charleston의 풍하중과 LA의 지진하중에 대한 최적의 성능을 나타내는 댐퍼 개수가 상이함을 알 수 있다. 또한 무조건 연결하는 댐퍼를 많이 사용한다고 해서 설계기준을 만족시키는 것이 아님을 확인할 수 있다.

인접한 예제구조물의 전 층이 아닌 10층에만 MR 감쇠기를 설치하는 경우에 대하여 구조물의 응답을 비교한 결과를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다.

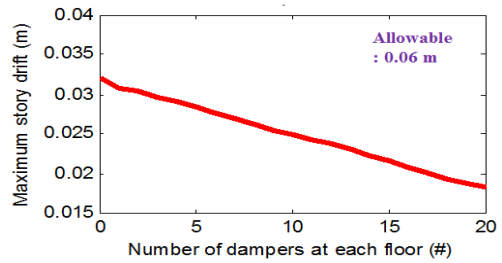
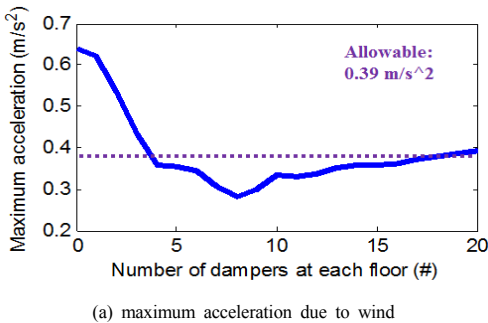


Fig. 9. Performance comparison in Charleston(Only Installed at 10th Floor)

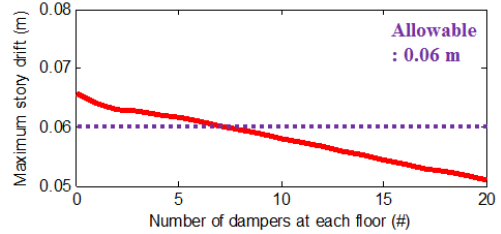
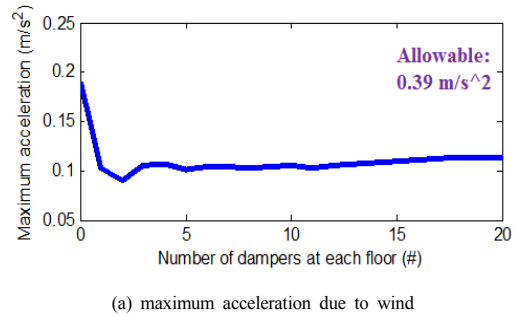


Fig. 10. Performance comparison in LA(Only Installed at 10th Floor)

Figs. 9와 10에서 보듯이 전 층에 감쇠기를 설치하는 경우보다는 더 많은 감쇠기를 사용해야지만 동적응답을 효과적으로 제어할 수 있다. Charleston의 풍하중에 대해서는 4개의 감쇠기를 사용해야 최대 가속도응답의 설계기준을 만족시킬 수 있고 8개의 감쇠기를 사용할 때 최적의 제어성능을 발휘하였다. 지진하중에 대해서는 Charleston과 LA 지역 모두에서 감쇠기를 많이 사용할수록 최대 층간변위를 더 많이 줄일 수 있었다. Charleston의 풍하중과 LA의 지진하중을 고려한 다중 재난하중에 대해서 예제구조물의 10층만 연결한 경우에는 풍하중에 대해서는 4개 지진하중에 대해서는 8개의 감쇠기를 사용해야 설계기준을 만족할 수 있었다. 이 경우 풍하중에 대한 최대 가속도 응답은 8개의 감쇠기를

사용할 때 가장 효과적으로 줄일 수가 있었고 지진하중에 대한 최적의 값은 찾을 수 없었다.

5. 결론

본 논문에서는 다중재난하중을 받는 인접한 두 건물의 연결제어 성능에 대해서 검토하였다. 예제구조물로는 10층 및 20층 건물을 사용하였으며 두 건물을 100kN MR 감쇠기로 연결하였다. 수치해석결과 두 건물을 1층에서 10층까지 모든 층을 연결한 경우에는 지진 및 풍하중에 대한 최적의 연결댐퍼 개수를 찾을 수 있었고 이는 서로 다르게 나타났다. 또한 이 경우 연결댐퍼를 과도하게 사용할 때에는 구조물의 비정형성이 증가하게 되어 응답이 오히려 증가하는 것을 알 수 있었다. 예제구조물을 10층만 연결하는 경우에는 풍하중에 대해서는 최적의 연결제어 설계안을 얻을 수 있었지만 지진하중에 대해서는 감쇠기를 증가할수록 응답이 지속적으로 줄어드는 효과를 보였다. 본 연구를 통하여 다중재난하중을 받는 인접건물에 대해서 연결제어의 효과가 있음을 확인할 수 있다. 또한 지진 및 풍하중에 대한 최적의 설계결과 및 설계기준을 만족시킬 수 있는 설계결과가 다르게 나타나므로 보다 상세한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] R.E. Klein, C. Cusano, J. Stukel, "Investigation of a method to stabilize wind induced oscillations in large structures," Proceedings of ASME Winter Annual Meeting, New York, Paper No. 72-WA/AUT-H, 1972.
- [2] D.G. Lee, H.S. Kim, H. Ko, "Evaluation of Coupling-Control Effect of a Sky-Bridge for Adjacent Tall Buildings", The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 21., pp.311- 328, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/tal.592>
- [3] R.E. Christenson, B.F. Spencer, Jr., E.A. Johnson, K. Seto, "Coupled building control considering the effects of building/connector configuration", Journal of Structural Engineering, Vol. 132, No. 6, pp. 853-863, 2006.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2006\)132:6\(853\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:6(853))
- [4] H.S. Kim, "Multi-objective optimal design using genetic algorithm for semi-active fuzzy control of adjacent buildings", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 17, No. 1 pp. 219-224, 2016.
- [5] R. Bell, T. Glade, "Multi-Hazard Analysis in Natural Risk Assessments", International Conference on Computer Simulation Risk Analyses and Hazard

Mitigation. pp. 197-206, 2004.

- [6] M.S. Kappes, M. Keiler, K. Elverfeldt, T. Glade, "Challenges of analyzing multi-hazard risk: a review", Natural Hazards, Vol. 64, pp. 1925-1958, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-012-0294-2>
- [7] 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: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1988\)114:5\(833\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1988)114:5(833))
- [8] A. Tallin, B. Ellingwood, "Wind induced lateral-torsional motion of buildings", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 111, No. 10, pp. 2197-213, 1985.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1985\)111:10\(2197\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111:10(2197))
- [9] ASCE 7-10, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers.
- [10] 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.

박 신 영(Shinyoung Kwag)

[정회원]



- 2010년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2013년 8월 ~ 현재 : North Carolina State University (PhD Candidate)
- 2010년 7월 ~ 현재 : 한국원자력연구원 선임연구원

<관심분야>

확률론적 리스크 평가, 구조신뢰성, 구조해석, 최적설계

김 현 수(Hyun-Su Kim)

[정회원]



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

<관심분야>

구조해석, 진동제어, 최적설계