

연결 제어 시스템 기반의 멀티해저드 적응형 스마트 제어 기술 성능 평가

Performance Evaluation of Multi-Hazard Adaptive Smart Control Technique Based on Connective Control System

김 현 수*
Kim, Hyun-Su

Abstract

A connected control method for the adjacent buildings has been studied to reduce dynamic responses. In these studies, seismic loads were generally used as an excitation. Recently, multi-hazards loads including earthquake and strong wind loads are employed to investigate control performance of various control systems. Accordingly, strong wind load as well as earthquake load was adopted to evaluate control performance of adaptive smart coupling control system against multi-hazard. To this end, an artificial seismic load in the region of strong seismicity and an artificial wind load in the region of strong winds were generated for control performance evaluation of the coupling control system. Artificial seismic and wind excitations were made by SIMQKE and Kaimal spectrum based on ASCE 7-10. As example buildings, two 20-story and 12-story adjacent buildings were used. An MR (magnetorheological) damper was used as an adaptive smart control device to connect adjacent two buildings. In order to present nonlinear dynamic behavior of MR damper, Bouc-Wen model was employed in this study. After parametric studies on MR damper capacity, optimal command voltages for MR damper on each seismic and wind loads were investigated. Based on numerical analyses, it was shown that the adaptive smart coupling control system proposed in this study can provide very good control performance for Multi-hazards.

Keywords : Smart coupling control system, Multi-hazard, Seismic response reduction, Vibration control, Wind-induced response reduction, Adjacent building

1. 서론

근래에 들어 급격한 도시화 및 이에 따른 지가의 상승으로 고층 건물이 매우 인접하여 건설되는 사례가 증가하고 있다. 인접하여 건설된 고층 건물을 대상으로 하는 구조 공학 분야의 연구는 크게 두 가지로 나누어서 수행되고 있다. 첫 번째 분야는 지진 충돌(Seismic pounding) 현상을 피하여 구조물의 피해를 저감시키기 위한 연구이다^{1,3)}. 이는 인접하여 건설된 건물에 지진 하중이 작용하여 과도한 응답 및 건물의 충돌에 의하여 <Fig. 1>에 나타난 바와 같이 구조물이 파괴되는 현상을 의미한다.



<Fig. 1> Pounding at Mexico EQ. (1985)

인접한 고층 건물에 대한 또 다른 연구 분야는 감쇠기 등의 진동 제어 장치로 인접한 건물들을 연결하여 지진 응답을 저감시키기 위한 내용으로 정리할 수 있다^{4),5)}. 인접한 고층 건물의 연결을 통한 구조물의 동적 응답 제어는 실험 및 해석적 연구가 다수 수행되어 왔고, <Fig. 2>와 같이 실제 구조물에도 적용되어 매우 효과적인 제어 기법으로 평가

* 교신저자, 정회원, 선문대학교 건축사회환경공학부 부교수, 공학박사
Div. of Architecture, Architectural & Civil Engineering,
Sunmoon University
Tel: 041-530-2315 Fax: 041-530-2839
E-mail: hskim72@sunmoon.ac.kr

받고 있다. 본 연구는 인접 건물에 대한 구조 공학 분야의 두 가지 연구 주제 중 후자에 속하는 내용으로 수행되었다.



<Fig. 2> Triton Square complex in Japan

인접한 건물의 진동 제어를 위해서 점탄성감쇠기와 같은 일반적인 수동감쇠기 뿐만 아니라 MR 감쇠기와 같은 스마트감쇠기로 연결하여 제어 성능을 평가한 연구가 다수 발표되고 있다^{6,8)}. 지금까지 국내외에서 수행된 대부분의 연구는 주로 지진 하중을 받는 건물에 대하여 인접 건물 간의 연결 제어를 통하여 지진 응답을 저감시키는 것을 목적으로 수행되어 왔다. 이를 위해 제어의 목표는 지진 하중에 의한 구조물의 피해와 직결되는 최대 층간 변위를 줄이는 것이다.

최근 지진 하중과 같은 단일 재해보다는 대형 지진이나 태풍 및 홍수와 같은 대규모 자연재해가 복합적으로 작용했을 때(멀티해저드) 구조물의 안전성이나 사용성 평가에 대한 여러 연구가 진행되고 있다^{9,10)}. 그러나 인접한 고층 건물에 설치된 적응형 스마트 연결 제어 시스템의 성능 검토가 멀티해저드 하중을 대상으로 수행된 사례는 국내외에서 찾아보기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 지진 및 강풍 하중을 포함하는 멀티해저드에 대하여 연결 제어 시스템 기반 스마트 제어 시스템의 제어 성능을 검토하였다.

본 연구에서는 지진 하중 및 풍하중을 포함한 멀

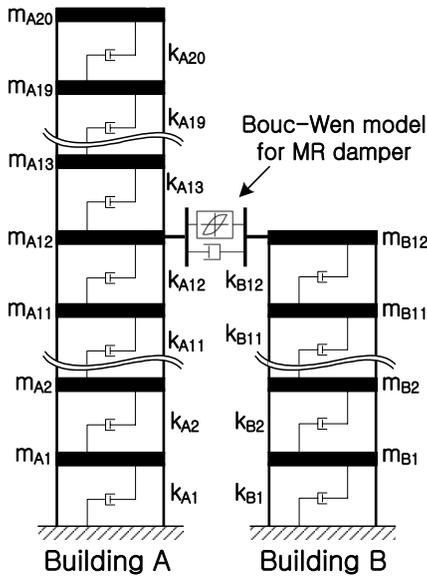
티해저드에 대해 스마트 연결 제어 시스템의 안전성과 사용성을 시간 이력 해석을 통해 검토하였다. 강진 및 강풍 지역을 모두 포함하고 있는 미국의 설계 기준(ASCE 7-10)¹¹⁾을 기반으로 하여 수치 해석 시 활용한 인공 지진 하중 및 인공 풍하중을 생성하였다. 연결 제어 시스템 기반의 멀티해저드 적응형 스마트 제어 시스템을 구성하기 위하여 MR 감쇠기를 사용하였고 Bouc-Wen 모델¹²⁾을 사용하여 모형화하였다. 예제 구조물은 인접한 20층 및 12층 건물을 사용하였다. 구조물의 안전성은 ASCE 7-10에 근거하여 최대 층간 변위로 판단하였고, 사용성은 Tallin & Ellingwood(1985)의 연구 결과¹³⁾에 따라 최대 가속도 응답을 기준으로 평가하였다.

2. 예제 구조물 및 제어 시스템의 특성

본 연구에서는 스마트 연결 제어 시스템의 멀티해저드 하중에 대한 적응성 및 제어 성능을 평가하기 위하여 인접한 2개의 예제 구조물을 작성하였다. 예제 구조물은 <Fig. 3>에 나타난 바와 같이 각각 20층과 12층을 가지는 인접한 구조물을 선택하였다. 각각의 예제 구조물은 층별 집중 질량(m_i)과 기둥 강성(k_i) 및 점성 감쇠로 표현되는 전단 빌딩 모델을 사용하여 모형화하였다. 질량, 강성 및 감쇠와 같은 예제 구조물의 특성치는 선행 연구와 동일하게 사용하였다¹⁴⁾. 20층인 건물 A와 12층인 건물 B의 층 질량 m_{Ai} 와 m_{Bi} 를 동일하게 $8.0 \times 10^5 \text{kg}$ 로 두었고, 층 강성 k_{Ai} 와 k_{Bi} 를 각각 $1.35 \times 10^9 \text{N/m}$ 와 $2.02 \times 10^9 \text{N/m}$ 로 두었다. 또한 건물 A와 B의 1차 모드와 2차 모드 감쇠비를 2%로 가정하여 Rayleigh 감쇠로 감쇠 행렬을 구성하였다. 이렇게 구성된 예제 구조물을 이용하여 고유치 해석을 수행하였고 그 결과, 20층 건물의 5개 저차 모드 고유 진동 주기는 2.00, 0.67, 0.40, 0.29, 0.23초로 나타났고, 12층 건물의 경우 1.00, 0.33, 0.20, 0.15, 0.12초로 계산되었다.

전술한 바와 같이 본 연구에서는 인접한 건물의 스마트 연결 제어를 위하여 MR 감쇠기를 사용하였는데 두 건물을 연결할 MR 감쇠기를 설치하는 것이 중요한 문제 중 하나이다. 일반적으로 인접한 건

물을 연결하여 설치할 감쇠 장치의 최적 위치는 연결되는 두 건물 사이에 동적 거동의 차이가 가장 큰 곳이어야 한다. 일반적인 빌딩 구조물은 캔틸레버와 같은 거동을 하기 때문에 가장 높은 층에서 가장 큰 동적 거동의 차이를 나타낼 것이다. 이는 층수가 다른 인접한 두 건물을 연결할 때 감쇠기 설치의 최적 위치는 낮은 건물의 최상층이라는 선행 연구¹⁴⁾의 결과와 일치하기 때문에 본 연구에서도 <Fig. 3>에 나타낸 바와 같이 12층에 MR 감쇠기를 설치하여 두 건물을 연결하였다.

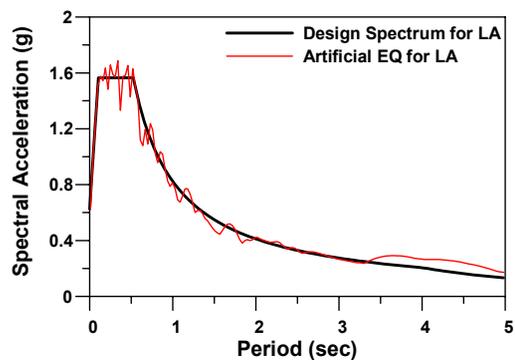


<Fig. 3> Two adjacent example buildings

스마트 연결 제어 시스템의 핵심 장치인 MR 감쇠기를 모형화하기 위해서 통용되고 있는 Bouc-Wen 모델을 사용하였고 이를 <Fig. 3>의 두 건물 사이에 나타내었다. MR 감쇠기에 전달되는 명령 전압과 상대 속도 등에 의해 결정되는 감쇠력은 비선형성이 강하므로 Bouc-Wen 모델로 이를 정확하게 표현하기 위해서는 모델을 구성하는 매개 변수의 적절한 값을 선택하는 것이 필요하다. 보다 실제적인 MR 감쇠기의 거동을 모사하기 위해서 Ok et al.(2007)의 연구¹⁴⁾에서 사용한 1,000kN 용량의 MR 감쇠기를 모사하는 변수값을 사용하였고 여기에 스케일 팩터를 곱하여 최적의 MR 감쇠기 용량을 찾는 파라미터 연구를 수행하였다.

3. 멀티해저드 하중의 생성

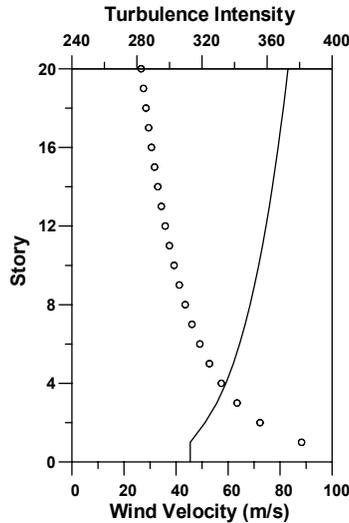
본 연구에서는 인접한 빌딩 구조물의 스마트 연결 제어에 있어서 지진 하중과 풍하중을 포함하는 멀티해저드를 대상으로 안전성 및 사용성을 검증하고자 한다. 이를 위해서 인공 풍하중 및 인공 지진 하중 시간 이력을 생성하였다. 이때 강진 및 강풍 지역을 모두 포함하고 있는 미국의 설계 기준 (ASCE 7-10)을 기반으로 멀티해저드 하중을 생성하였다. 강진 및 강풍을 대표하는 미국의 도시로 LA와 찰스턴 지역을 선택하였다. LA는 대표적인 강진 지역으로서 이를 바탕으로 인공 지진 하중을 작성하였으며, 미국 동부의 찰스턴은 허리케인의 영향을 자주 받는 대표적인 강풍 지역으로 이 지역의 특성을 바탕으로 인공 풍하중을 작성하였다. ASCE 7-10에 나타난 LA 지역의 유효 최대 지진 가속도(EPA; Effective Peak Ground Acceleration)는 0.626g이고, 찰스턴의 설계 기준 풍속(Vs)은 63m/s이다. 멀티해저드 하중 중 지진 하중은 <Fig. 4>에 나타낸 바와 같이 LA 지역의 설계 응답 스펙트럼을 작성한 후 해당 응답 스펙트럼을 잘 나타내는 인공 지진 하중을 SIMQKE¹⁵⁾를 사용하여 생성하였다. 생성된 인공 지진 하중의 응답 스펙트럼을 <Fig. 4>에 설계 응답 스펙트럼과 함께 나타내었다. 인공 지진 하중은 0.01초의 시간 간격으로 30초이다.



<Fig. 4> Design and artificial EQ. spectrum

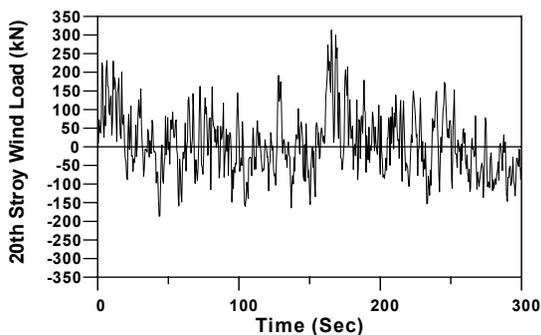
멀티해저드의 강풍 지역 인공 풍하중을 생성하기 위한 20층 예제 구조물의 찰스턴 지역 평균 풍속 그래프와 변동 풍속의 난류 강도를 층별로 <Fig. 5>에 나타내었다. 그림에서 보는 것처럼 고층으로 올라갈

수록 평균 풍속은 늘어나고, 변동 풍속의 난류 강도는 작아지는 것을 알 수 있다.

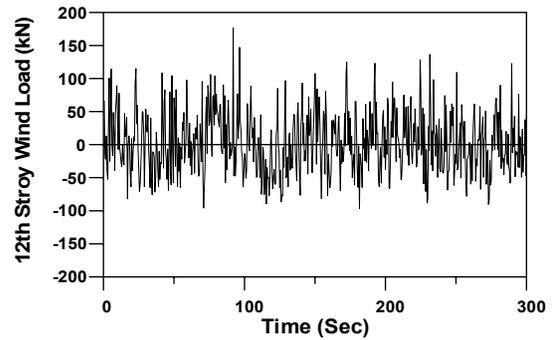


〈Fig. 5〉 Average wind velocity and turbulence intensity along the story

인공 풍하중을 작성하기 위해서는 건물의 높이 및 형태 등을 결정하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 20층과 12층 예제 구조물의 층고를 모두 4m로 하여 전체 건물의 높이를 각각 80m 및 48m로 두었다. 두 건물 모두 건물의 폭에 대한 높이를 나타내는 세장비를 5로 설정하였고, 이에 따라 20층 건물의 폭은 16m, 12층 건물의 폭은 9.6m로 계산되었다. 인공 풍하중을 생성하기 위한 기본 풍속은 찰스턴 지역의 값인 63m/s로 하였고, 노풍도는 C, 중요도 계수는 1.0으로 하였다.



〈Fig. 6〉 Top story wind load time history of 20-story building



〈Fig. 7〉 Top story wind load time history of 12-story building

널리 사용되고 있는 Kaimal spectrum을 이용하여 인공 풍하중을 생성하였고 0.01초 간격으로 300초 동안의 풍하중 시간 이력을 작성하였다. 생성된 인공 풍하중의 시간 이력 중 20층 건물 및 12층 건물의 최상층 시간 이력을 〈Fig. 6〉과 〈Fig. 7〉에 나타내었다.

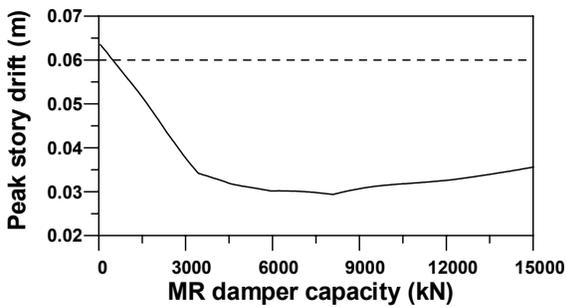
4. 스마트 연결 제어 시스템의 멀티해저드 적용성 평가

본 연구에서는 인접한 빌딩 구조물의 스마트 연결 제어에 있어서 멀티해저드 적용성을 평가한다. 이를 위해서 앞서 작성한 인공 풍하중 및 인공 지진 하중을 사용하여 시간 이력 해석을 수행하였다. 예제 구조물의 지진 하중이나 풍하중에 대한 안전성 및 사용성을 검토하기 위해서는 성능 기준을 설정하는 것이 필요하다. 지진 하중에 대한 층간 변위 (Inter-story drift)의 허용 기준에 대해서는 ASCE7-10 및 IBC2012 설계 기준에서 층고의 1.5%를 최대 층간 변위로 제시하고 있다. 빌딩 구조물의 층고는 4m이기 때문에 지진 하중에 대한 안전성을 검토하기 위한 기준은 층간 변위 0.06m이다. 풍하중은 태풍과 같은 강풍일지라도 건축 구조물의 안전성에 영향을 미치지보다는 사용성에 문제를 야기하는 경우가 많다. 본 논문에서는 Tallin & Ellingwood(1985)가 제안한 심리적 안정과 일상적인 작업을 할 수 있는 기준인 $0.04g(0.39m/s^2)$ 을 설계 기준으로 선택하였다¹³⁾.

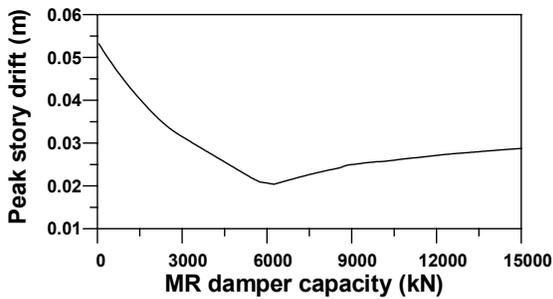
스마트 연결 시스템의 핵심 장치인 MR 감쇠기의 용량을 결정하기 위해서 지진 및 풍하중을 사용하

여 매개 변수 연구를 수행하였다.

우선 MR 감쇠기의 용량을 변화시키면서 20층과 12층 예제 구조물의 최대 층간 변위를 검토하여 <Fig. 8>과 <Fig. 9>에 나타내었다. 그림을 보면 MR 감쇠기의 용량이 커질수록 예제 구조물의 최대 층간 변위가 큰 폭으로 감소하다가 20층 건물은 약 3,000kN, 12층 건물은 약 6,000kN 이후부터 감소폭이 둔화되거나 오히려 증가하는 것을 알 수 있다. 예제 구조물에서 지진 하중에 대한 허용 최대 층간 변위는 0.06m이므로 비제어 시 이 값을 초과하는 20층 구조물을 대상으로 최적의 MR 감쇠기 용량을 결정하는 것이 바람직하다. 따라서 본 연구에서는 3,000kN 용량의 MR 감쇠기를 선택하여 인접한 두 건물의 스마트 연결 제어 시스템을 구성하였다.



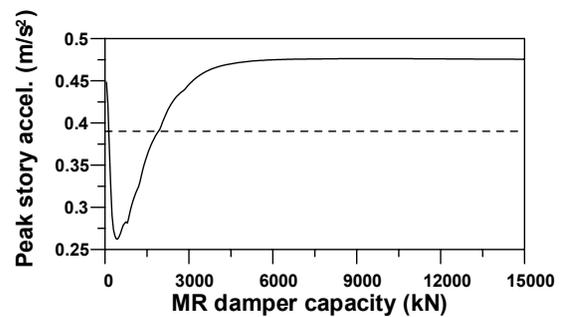
<Fig. 8> Peak story drift of 20-story building



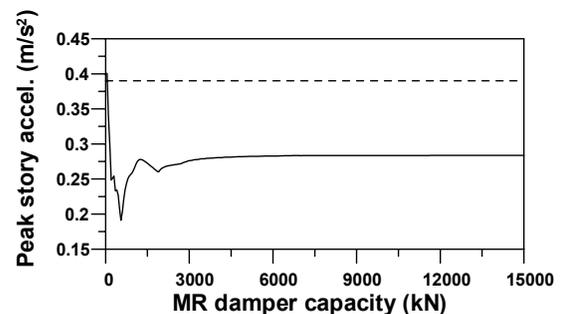
<Fig. 9> Peak story drift of 12-story building

찰스턴 지역의 특성을 나타내는 인공 풍하중에 대한 20층 및 12층 예제 구조물의 MR 감쇠기 용량에 따른 응답 변화를 <Fig. 10>과 <Fig. 11>에 나타내었다. 풍하중에 대해서는 최대 층간 변위와 같은 안전성을 나타내는 응답보다 사용성을 나타내는 순간 최대 가속도 응답이 더 중요하므로 최대층 가속

도를 검토하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 20층과 12층 건물 모두 MR 감쇠기 용량이 약 500kN으로 증가할 때까지는 가속도 응답이 급격히 감소하다가 그 이상이 되면 오히려 증가하는 것을 알 수 있다. 두 건물 모두 추가적인 제어 시스템이 설치되지 않은 비제어 시 가속도 설계 기준인 0.39m/s^2 를 만족시키지 못한다. 이때 연결 제어 시스템을 적용해서 추가적인 응답 제어를 한다고 했을 때 지진 하중을 최적 제어하기 위한 3,000kN 용량의 수동 감쇠 장치를 사용한다면 <Fig. 10>에 나타낸 바와 같이 20층 건물의 가속도는 설계 기준을 크게 초과하는 것을 알 수 있다. 따라서 지진 하중이 가해졌을 때에는 3,000kN으로, 풍하중이 가해졌을 때에는 500kN으로 감쇠기 용량을 조절할 수 있는 스마트 연결 제어 시스템이 필요하게 된다.



<Fig. 10> Peak acceleration of 20-story building

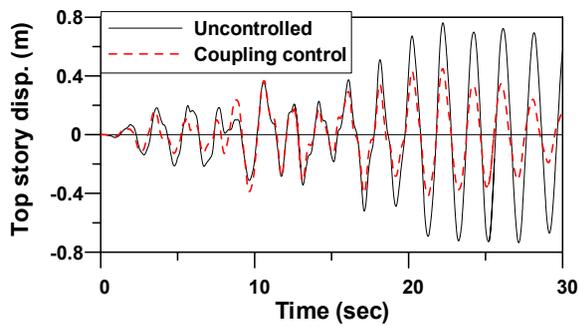


<Fig. 11> Peak acceleration of 12-story building

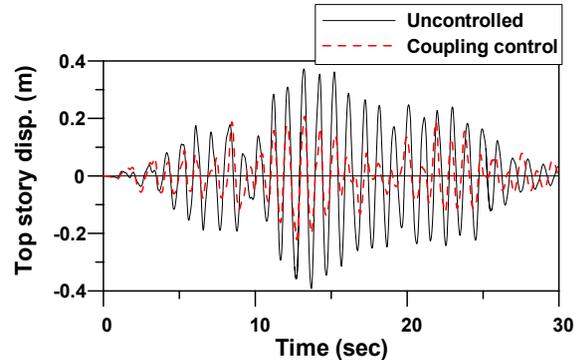
본 연구에서는 전술한 바와 같이 1,000kN 용량의 MR 감쇠기 모델을 사용하였으므로 지진 하중을 위한 최적 감쇠기 용량인 3,000kN을 제공하기 위해서 3개의 MR 감쇠기를 사용하였다. 사용한 MR 감쇠기 모델은 5V의 명령 전압을 가했을 때 최대 감쇠력을 발휘하며, 0.66V의 명령 전압을 가했을 때 풍

하중에 대한 최적 감쇠력인 500kN을 발휘하게 된다.

지진 하중을 위한 최적 감쇠 용량인 3,000kN 용량의 MR 감쇠기로 구성된 스마트 연결 제어 시스템의 제어 성능을 검증하기 위하여 제어하지 않은 건물의 응답과 비교하였다. 20층과 12층 건물의 최상층 변위 시간 이력을 비교하여 <Fig. 12>와 <Fig. 13>에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 20층 건물은 25초대를 전후로 최대 응답이 나타나는데 스마트 연결 제어 시스템으로 0.76m의 최대 변위를 0.45m로 대폭 줄일 수 있었다. 12층 건물은 약 14초대에서 최대 변위 응답이 나타나는데 비제어 시 0.39m에서 스마트 연결 제어 시스템으로 0.22m까지 대폭 줄일 수 있었다.



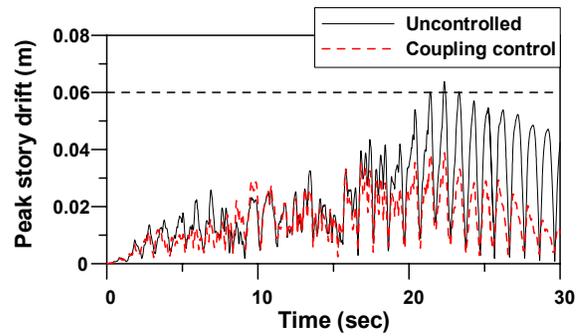
<Fig. 12> Roof displacement time histories of 20-story building due to seismic load



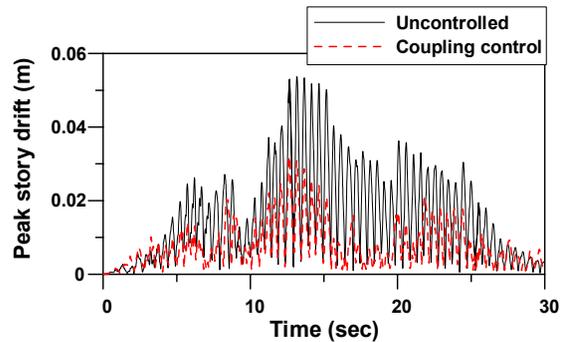
<Fig. 13> Roof displacement time histories of 12-story building due to seismic load

앞서 살펴본 최상층 변위 응답과 최대 층간 변위는 어느 정도 비례하지만 구조물의 안전성과 직접적으로 연관이 있는 응답은 최대 층간 변위이므로 이에 대한 20층과 12층 건물의 시간 이력을 <Fig. 14>와 <Fig. 15>에 나타내었다. 20층 건물의 최대 층간 변위는 0.064로 설계 기준을 초과하였다. 이 응답은

스마트 연결 제어 시스템을 적용하면 0.039m로 대폭 줄어들어 안전성이 크게 향상되었다. 12층 건물의 경우에는 최대 층간 변위가 비제어 시 0.054m로 설계 기준에 근접하던 상태에서 스마트 연결 제어 시스템 적용 시 0.032m로 크게 저감되었다.

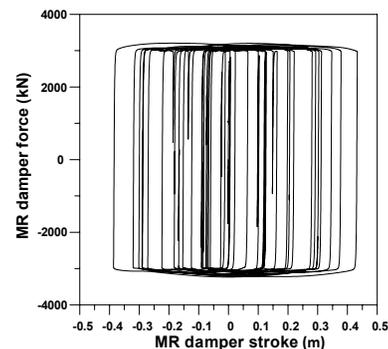


<Fig. 14> Peak story drift time histories of 20-story building due to seismic load



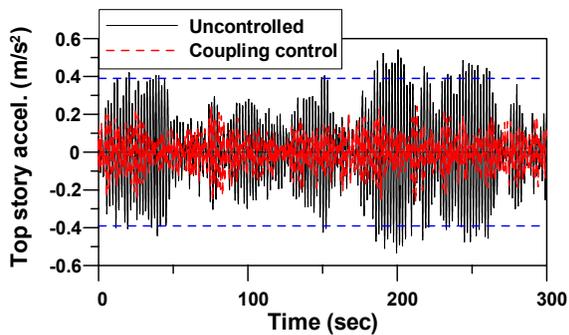
<Fig. 15> Peak story drift time histories of 12-story building due to seismic load

스마트 연결 제어 시스템에 사용된 MR 감쇠기의 힘-변위 곡선을 <Fig. 16>에 나타내어 이력 곡선을 검토하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 최대 약 3,000kN의 감쇠 용량을 나타내고 약 0.4 이내의 변위로 적절하게 거동하는 것을 알 수 있다.

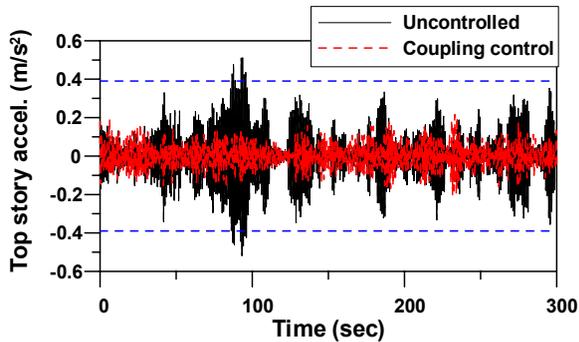


<Fig. 16> MR damper force-stroke relationship due to seismic load (5V)

본 연구에서 구성된 스마트 연결 제어 시스템의 MR 감쇠기에 0.66V를 가하여 500kN의 감쇠력을 발휘하도록 한 후 풍하중에 대한 제어 성능을 검토하였다. 응답이 가장 크게 발생하는 최상층에 대해서 20층과 12층 건물의 가속도 시간 이력을 <Fig. 17>과 <Fig. 18>에 나타내었다. 그림에서 확인할 수 있듯이 20층과 12층 건물 모두 제어하지 않을 경우 설계 기준인 0.39m/s^2 을 초과하였다. 비제어 시 20층과 12층 건물의 최대 가속도 응답은 각각 0.54m/s^2 와 0.52m/s^2 로 설계 기준을 크게 상회하였다. 이 응답들은 스마트 연결 제어 시스템을 적용했을 때 0.26m/s^2 과 0.22m/s^2 로 크게 저감되었다.



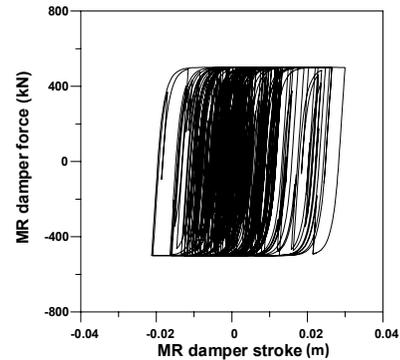
<Fig. 17> Roof acceleration time histories of 20-story building due to wind load



<Fig. 18> Roof acceleration time histories of 12-story building due to wind load

풍하중을 효과적으로 제어하기 위한 스마트 연결 제어 시스템은 지진 하중을 위해 구성된 동일한 시스템에 명령 전압만 5V에서 0.66V로 줄여서 가하였다. 이러한 상태에서의 MR 감쇠기 힘-변위 곡선을 <Fig. 19>에 나타내어 이력 곡선을 검토하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 최대 약 500kN의 감쇠 용량을 나타내고 약 0.03m 이내의 변위로 적절하게 거동하

는 것을 알 수 있다. 이렇게 구성된 스마트 연결 제어 시스템의 지진 하중과 풍하중에 대한 특성 변화는 지반에 가속도계를 설치하여 평상시에는 0.66V의 명령 전압을 보내다가 지진이 발생하여 지반 가속도가 특정한 값 이상일 때에는 5V의 명령 전압을 보냄으로서 간단히 적용할 수 있다.



<Fig. 19> MR damper force-stroke relationship due to wind load (0.66V)

5. 결론

본 연구에서는 연결 제어 시스템 기반의 멀티해저드 적응형 스마트 제어 시스템을 구축하고 제어 성능을 평가하였다. 이를 위하여 강진 및 강풍 지역을 대표하는 인공 지진 및 인공 풍하중을 생성하여 시간 이력 해석을 수행하였다. 예제 구조물로는 인접한 20층 및 12층 빌딩 구조물을 선택하였고 MR 감쇠기를 이용하여 연결하였다. 해석 결과, 지진 하중 및 풍하중을 효과적으로 제어할 수 있는 스마트 연결 제어 시스템의 제어력 용량이 크게 차이 나서 일반적인 수동 연결 제어 시스템으로는 멀티해저드에 대한 적응성이 부족함을 알 수 있었다. 이에 비하여 스마트 연결 제어 시스템은 동일한 장치를 활용하고도 풍하중 및 지진 하중의 해저드 종류에 따라서 명령 전압만을 변경시켜줌으로써 각 하중에 매우 효과적인 제어 성능을 나타내었다. 본 연구를 통해서 스마트 연결 제어 시스템의 멀티해저드에 대한 적응성이 매우 우수한 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 각 해저드에 대해 일정한 명령 전압을 사용하였는데 추후 효과적인 제어 알고리즘을 개발하여 적용하는 것이 필요하다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임을 밝히며 이에 감사드립니다. (NRF-2016R1D1A1A09919159)

References

1. Kumar, P., & Karuna, S., "Effect of seismic pounding between adjacent buildings and mitigation measures", *International Journal of Research in Engineering and Technology*, Vol.4, No.7, pp.208~216, 2015
 2. Raheem, S. E. A., "Seismic Pounding between Adjacent Building Structures", *Electronic Journal of Structural Engineering*, Vol.6, pp.66~74, 2006
 3. Jankowski, R., "Pounding force response spectrum under earthquake excitation", *Engineering Structures*, Vol.28, No.8, pp.1149~1161, 2006
 4. Lee, D. G., Kim, H. S., & Ko, H., "Evaluation of Coupling-Control Effect of a Sky-Bridge for Adjacent Tall Buildings", *Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol.21, No.5, pp.311~328, 2012
 5. Christenson, R. E., Spencer, B. F., Johnson, E. A., & Seto, K., "Coupled Building Control Considering the Effects of Building/Connector Configuration", *Journal of Structural Engineering*, Vol.132, No.6, pp.853~863, 2006
 6. Kim, H. S., "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
 7. Uz, M. E., & Hadi, M. N. S., "Optimal design of semi active control for adjacent buildings connected by MR damper based on integrated fuzzy logic and multi-objective genetic algorithm", *Engineering Structures*, Vol.69, No.15, pp.135~148, 2014
 8. Shahidzadeh, M. S., Tarzi, H., & Dorfeshan, M., "Takagi-Sugeno Fuzzy Control of Adjacent Structures using MR Dampers", *Journal of Applied Sciences*, Vol.11, No.15, pp.2816~2822, 2011
 9. Duthinh, D., & Simiu, E., "Safety of Structures in Strong Winds and Earthquakes: Multihazard Considerations", *Journal of Structural Engineering*, Vol.136, No.3, pp.330~333, 2010
 10. Crosti, C., Duthinh, D., & Simiu, E., "Risk Consistency and Synergy in Multihazard Design", *Journal of Structural Engineering*, Vol.137, No.8, pp.844~849, 2011
 11. ASCE, Minimum design loads for buildings and other structures, ASCE/SEI 7-05/-10, Reston, VA, US.
 12. Sues, R. H., Mau, S. T., & Wen, Y. K., "System Identification of Degrading Hysteretic Restoring Forces", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.114, No.5, pp.833~846, 1988
 13. Tallin, A., & Ellingwood, B., "Wind Induced Lateral-Torsional Motion of Buildings", *Journal of Structural Engineering*, Vol.111, No.10, pp.2197~2213, 1985
 14. Ok, S. Y., Kim, D. S., Koh, H. M., & Park, K. S., "GA-Based Optimal Design for Vibration Control of Adjacent Structures with Linear Viscous Damping System", *Journal of Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.11, No.1, pp.11~19, 2007
 15. Gasparini, D. A., & Vanmarcke, E. H. (1976). Simulated earthquake motions compatible with prescribed response spectra(Research Report No. R76-4). USA: Massachusetts Institute of Technology
- Received : October 19, 2018
 - Revised : October 24, 2018
 - Accepted : October 24, 2018