자기유변댐퍼로 제어되는 비선형 구조물의 멀티플랫폼 해석을 이용한 내진성능평가

Seismic Performance Assessment of a Nonlinear Structure Controlled by Magneto-Rheological Damper Using Multi-Platform Analysis

김승직^{1)*}

Kim, Sung Jig^{1)*}

¹⁾계명대학교 건축공학과

¹⁾Department of Architectural Engineering, Keimyung University

/ A B S T R A C T /

The paper introduces Multi-Platform Analysis (MPA) for the seismic performance of a structure controlled by Magneto-Rheological (MR) dampers and presents analytical assessment of the effect of MR damper when taking into account nonlinear behavior of the structure. This paper introduces the MR Damper Plugin that can facilitate communication between MATLAB/Simulink and a finite element analysis tool in order to account for more complex inelastic behavior of the structure with MR dampers. The MPA method using the developed MR Damper Plugin is validated with experimental results from the real-time hybrid simulation. By utilizing the proposed MPA method, the three-story RC structure controlled by MR dampers is more realistically modeled and its performance under seismic loads is investigated. It is concluded that MR damper designed for a linear structure is not effective in a nonlinear structure and can overestimate the effect of MR damper. This work is expected to overcome difficulties in the analytical assessment of structural control strategies for complex and nonlinear structures by obtaining more reliable results.

Key words: Multi-Platform Analysis, MR Damper, Nonlinear Analysis

1. 서 론

최근 세계 여러 곳에서 Sichuan Earthquake, China (2008, Mw 7.9), Haitian Earthquake (2010, Mw 7.0), Tohoku Earthquake, Japan (2011, Mw 9.0), 및 Christchurch Earthquake, New Zealand (2011, Mw 6.3) 등과 같은 중·대형 지진이 발생하여 구조물의 피해뿐만 아니라 인명 및 경제적 손실이 증가하고 있다. 또한 한반도 영향권 내에서 발생한 홍성 지진 (1978), 백령도 지진(1995), 영월 지진(1996), 경주 지진(1997)과 같은 최근 중·소규모 지진들은 한국도 지진 안전지대가 아니라는 사실을 입증하고 있다. 이러한 지진피해를 줄이기 위하여 수행된 연구 중 수동형 또는 능동형 제진장치를 사용하는 방법은 다양한 동적하중하에서 구조물의 동적 반응을 줄일 수 있는 효과적인 방법 중의 하나로 알려져 왔다. 이 중 자기유변유체(Magneto-Rheological Fluid, 이하MR) 댐퍼와 같은 수동형 및 능동형

진동제어장치의 장점을 결합한 반능동형(Semi-active) 제진장치에 대한 관심과 연구가 증가하고 있다. MR 댐퍼는MR 유체의 특성을 이용하여 제작되는데, 미세하고 자성을 띤 입자를 포함하는 MR유체는 평상시에는 일반적인 점성 유체처럼 자유롭게 유동하지만 자기장이 가해지면 짧은 시간에 입자들이 정렬하여 유체의 유동을 제한하여, 결과적으로 구조물에 제어 능력을 가할 수 있는 유체이다. 반능동형 제진장치인MR 댐퍼는 장치의 특성, 즉 제어력의 크기 및 동조 주파수 등을 실시간으로 변경이 가능하며 특히 MR유체가 큰 항복강도를 가지고 있으며 비교적 낮은 전압에서도 작동이 가능한 장점이 있다. 이러한 장점들로 인해 국·내외에서 활발한 연구가 진행되고 있다[1-3].

Fig. 1에서 보이는 것과 같은MR 댐퍼의 해석적 모델들은 실험적 데이터를 바탕으로 개발되었다. 대표적인 모델은 Hyperbolic Tangent 모델 [4,5], Bouc-Wen 모델[6,7], Viscous plus Dahl 모델[8,9], Algebraic 모델[10,11]등이 있다. 일반적으로 언급된 MR 댐퍼의 해석모델은 Matlab/Simulink를 이용하여 모델링되고 해석되는데, 이는 Matlab/ Simulink가 다양한 하중조건에 따른 댐퍼의 비선형 동적 특성을 평가하는데 적절한 프

*Corresponding author: Kim, Sung Jig

E-mail: sjkim4@kmu.ac.kr

(Received 18 March 2013; Accepted 4 April 2013)

Fig. 1. Analytical model of MR damper

레이아웃을 제공하기 때문이다. 하지만 이러한 모델들을 이용할 때, 구조물은 일반적으로 선형 거동한다고 가정하여 제어시스템을 설계하고 내진성능평가를 수행해왔다. 이는 Matlab/Simulink를 이용하여 구조물의 비선형 거동을 재현하기가 어렵고 실용적이지 않기 때문이다. 또한 구조물의 비선형거동을 고려하기 위한 시도도 단순한 Bilinear 모델로 가정하여 연구를 수행하였다[12]. 이보다 더 신뢰성이 있는 구조물의 해석모델은 Abaqus, Zeus-NL[13] 또는 OpenSees[14]와 같이 비선형 거동을 재현할 수 있는 비선형 유한요소해석 프로그램을 이용하여 구현될 수 있다. 불행하게도 이러한 비선형 유한요소 해석프로그램들은 MR 댐퍼의 복잡한 비선형 동적 거동 및 제어 알고리즘을 모델링하는데 이상적이지 않다. 따라서 비선형 거동을 하는 구조물에 대한 MR 댐퍼의 지진제어방법을 개발하고 검증하는데 어려움이 있다.

위에서 언급된 문제점을 해결하기 위한 방법 중의 하나로서 본 논문에서 제안한 하이브리드 해석방법을 이용한다면, 즉 Matlab/Simulink의 MR 댐퍼 모델과 구조물의 비선형 거동을 보다 쉽게 구현할 수 있는 유한요소해석프로그램을 동시에 사용하여 해석프로그램들의 고유한 해석 능력의 장점들을 취합한다면, 좀 더 현실적으로 구조 해석모델을 만들 수 있어 신뢰성이 있는 해석결과를 얻을 수 있다. 따라서 본 논문에서는 위에서 언급된 하이브리드 해석방법의 개념을 도입하여 Matlab/Simulink의 MR 댐퍼 모델과 유한요소해석프로그램을 연동할 수 있는 해석 도구를 개발 및 검증하였다. 또한 이러한 해석방법을 통하여 일반적으로 선형 구조물을 기반으로 설계 또는 평가되는 MR 댐퍼에 대하여 비선형 거동하는 구조물에 대한 MR 댐퍼 지진제어 영향을 비교·평가하였다.

2. 멀티플랫폼해석 도구개발

2.1 멀티플랫폼해석(Multi-Platform Analysis)

최근 연구 분야에서 개발된 많은 구조해석 프로그램들은 각각 고유의 장

Fig. 2. Schematic of hybrid simulation

점을 가지고 있다. 이러한 여러 해석프로그램들의 고유한 해석 능력의 장점들을 취합하여 활용할 수 있다면, 보다 복잡한 구조물에 대하여 좀 더 현실적인 구조해석모델을 만들 수 있다. 따라서 하나의 해석프로그램을 이용하는 것보다 더 신뢰성이 있는 해석결과를 얻을 수 있다. 이러한 멀티플랫폼 해석(Multi-Platform Analysis)의 개념은 하이브리드 실험(Hybrid Simulation)으로부터 출발하였다. Fig. 2와 같이 하이브리드 실험이란 구조물의 지진 거동을 효율적이며 좀 더 현실적으로 평가하기 위하여 유사동적실험(Pseudo-Dynamic Test)에 부분구조기법(Substructure Technique)을 도입한 실험방법이다. 대상 구조물을 해석 모듈과 실험 모듈로 나누어 매 시간 증분에 각 모듈의 실험 또는 해석을 통하여 얻어진 결과 값을 피드백한 후 동적운동방정식으로 통하여 전체 구조물의 거동을 구하는 방법이다[15-17].

최근 일부 연구에서 이러한 하이브리드 실험기법의 개념을 도입한 멀티플랫폼해석을 이용하여, 일반적인 해석방법으로 정확한 구조물의 거동을 예측하기 힘든 고층건물의 내진성능평가와 지반-구조물의 상호작용 평가를 수행하였다. Ji et al.[18]의 연구에서는 고층건물의 골조는 비선형 해석 프로그램인 Zeus-NL을 이용하여 모델링을 수행하고 코어벽체는 Vector2를 이용하여 모델하여 내진성능평가를 수행하였다. Kwon and Elnashai[19]의 연구에서는 교량의 모델은 Zeus-NL로 지반모델은 OpenSees를 이용하여 지반-교량의 상호작용에 대한 평가를 수행하였다.

2.2 MR Damper Plugin

2.1절에서 언급된 멀티플랫폼 개념을 MR 댐퍼로 제어되는 구조물의 거동평가에 적용하기 위하여, Matlab/Simulink의 MR 댐퍼 모델과 유한요소해석프로그램의 구조모델 사이에 각 시간단계에서 필요한 정보를 주고받게 할 수 있는 도구인 MR Damper Plugin을 개발하였다.

Fig. 3에서 보이듯이 MR 댐퍼로 제어되는 구조물은 각각 골조와 MR 댐퍼로 분리된 다음, 비선형 거동하는 구조물은 Zeus-NL, OpenSees, Abaqus 등의 구조해석프로그램으로 모델링되고 해석되며 이와 동시에 MR 댐퍼는 Matlab/Simulink로 모델링되어 개발된 MR Damper Plugin을 통하여 코오디네이터 프로그램인 UI-SimCor와 네트워크 통신을 통하여 데이터를 주고 받으며 해석을 수행한다. UI-SimCor는 하이브리드 실

Fig. 3. Multi-platform analysis using MR Dampers Plugin

험을 위하여 미국 일리노이대학(University of Illinois at Urbana-Champaign)에서 개발되어 여러 하이브리드 실험에 적용 및 검증된 프로그램으로서 Zeus-NL, OpenSees, FeedesLab, Abaqus 등의 구조해석프로그램과 각 연구실의 실험모듈의 해석 및 실험 결과를 동시에 통합할 수 있다[16]. 따라서 UI-SimCor는 하이브리드 실험뿐만 아니라 멀티플랫폼 해석에도 적용될 수 있다. MR Dampers Plugin은 Labview 프로토콜을 이용한 네트워크 통신 모듈을 기반으로 UI-SimCor와 데이터를 주고 받을 수 있으며, 또한 Matlab을 기반으로 개발되었기 때문에 일반적으로 Matlab/Simulink을 기반으로 개발되는 MR 댐퍼의 해석모델을 손쉽게 적용할 수 있다.

3. 멀티플랫폼 해석방법 검증

3.1 예제구조물과 입력지진파

개발된 MR Dampers Plugin을 이용한 멀티플랫폼 해석방법을 검증하기 위하여 Fig. 4에서 보이는 2층 철골구조물을 선택하였다. 선택된 구조물은 Kim et al.[20]의 실시간 하이브리드 실험(Real-Time Hybrid Simulation)에 이용된 축소 구조물로서 각 층에 지름 25.4mm의 4개의 기둥으로 구성되어 있으며 각층의 높이는 0.9m이다. 각층의 강성은 279.171 N/mm이며, 질량은 아래의 식(1)에 나타나 있으며 구조물의 일·이차 고유 주기가 1sec와 0.38sec이며 5%의 Rayleigh 감쇠가 사용되었다. 따라서 질량(M), 강성(K) 및 감쇠(C)는 식 (1)과 같다.

Fig. 4. Real-time hybrid simulation[20]

Fig. 5. Arleta Fire Station, Northridge Earthquake (1994)

$$\begin{aligned} M &= \begin{bmatrix} 2.701 & 0 \\ 0 & 2.701 \end{bmatrix} \\ C &= \begin{bmatrix} 3.684 & -1.228 \\ -1.228 & 2.456 \end{bmatrix} \\ K &= \begin{bmatrix} 558.343 & -279.171 \\ -279.171 & 279.171 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 단위는 N, mm이다. MR 댐퍼는 바닥과 1층 슬래브 사이에 위치하여 지진제어를 제공한다. Fig. 4에 보이는 MR 댐퍼는 Lord Corporation에서 제작된 RD-1005-3 댐퍼로서 최대 2.2 kN의 힘을 제공한다. Fig. 5에서 보이듯이 선택된 지반가속도는 Arleta Fire Station에서 기록된 1994년 Northridge 지진 데이터를 사용하였다. Kim et al.[20]의 연구에서는 원래의 0.31g인 최대지반가속도(PGA)를 액추에이터 용량을 고려하여 1/4로 축소하여 지진동 데이터를 이용하였기 때문에 본 논문에서도 같은 감소계수를 사용하였다.

3.2 해석결과

멀티플랫폼 해석을 위하여 구조물은 Zeus-NL을 이용하여 모델링되었고 MR 댐퍼는 Algebraic 모델을 이용하였다. 개발된 MR Dampers Plugin

Fig. 6. Comparison of MR damper response; (a) Passive off, (b) Passive on, (c) Semi-active control, (d) Displacement-force

Table 1. Comparison of Matlab only simulation and Multi-platform analysis

Control Type		Analysis			RTHS**
		Matlab	MPA*	Error(%)	
Passive off	변위	11.628	11.563	-0.56	11.688
	힘	0.149	0.149	-0.03	0.153
Passive on	변위	8.115	8.131	0.20	9.109
	힘	0.807	0.808	0.07	0.830
Semiactive	변위	8.060	8.125	0.80	9.316
	힘	0.800	0.802	0.31	0.713

* MPA: Multi-Platform Analysis

** RTHS: Real-Time Hybrid Simulation

을 이용한 멀티플랫폼 해석 방법을 검증하기 위하여 구조물 및 MR 댐퍼를 Matlab만을 이용하여 모델링하여 해석(Fig. 6의 Pure Matlab Simulation)을 수행하였다. 개발된 MR Damper Plugin을 이용한 멀티플랫폼 해석 방법을 검증하는 것이 목적이므로 구조물은 선형거동한다고 가정하였다. 또한 사용한 MR 댐퍼의 해석모델을 검증하기 위하여 Kim et al.[20] 이 수행한 실험결과와도 비교·검토하였다. 제어방법은 Passive off, Passive On, 및 Semi-active 제어를 이용하여 해석을 수행하였으며 각각의 해석결과는 Table 1에 비교되었으며 Fig. 6에 변위이력과 MR 댐퍼의 변위 및 힘의 관계를 나타내었다.

Fig. 7. Selected RC structures

Fig. 6에서 나타나 있듯이 멀티플랫폼 해석결과와 순수 Matlab만을 이용한 결과가 거의 차이가 없음을 알 수 있다. Passive off, Passive On, 및 Semi-active 제어 방법에 따른 Matlab만을 이용한 해석에 대한 멀티플랫폼 해석 방법의 변위 오류는 각각 -0.56%, 0.20%, 및 0.80% 이고 MR 댐퍼 힘의 오류는 각각 -0.03%, 0.07% 및 0.31%로 그 오류가 무시할 정도로 작다. 또한 Fig. 6 (d)에서 보이듯이 MR 댐퍼의 힘-변위 이력이 상당한 비선형 거동을 보임에도 불구하고 실제 실험결과와 해석 결과의 차이가 무시할 정도로 작다. 따라서 MR 댐퍼로 제어되는 구조물의 거동을 평가하는데 있어 본 논문에서 제안하는 멀티플랫폼 해석방법이 신뢰할 수 있는 결과를 제시함을 알 수 있다.

4. 비선형 구조물에서의 적용

4.1 예제구조물

본 논문에서는 비선형 구조물에 대한 MR 댐퍼의 지진감쇠효과를 평가하기 위하여 Fig. 7에서 보이는 3층 철근콘크리트 모멘트 골조를 이용하였다. 각 층의 높이는 3.7m이고 경간은 5.5m이다. 이 건물은 비내진 상세 구조물의 실험적 연구를 위하여 설계되었다[21]. 따라서 지진 및 풍하중을 고려하지 않고 중력하중만을 고려하여 ACI318-89 코드에 의해 설계 되었다.

Fig. 8. MR damper model in Simulink

콘크리트의 압축강도는 33.6MPa이며 철근의 항복강도는 336MPa이다. 해석대상 골조는 Fig. 7(a)에서 회색으로 표현된 부분이며 구조물 상세에 대한 정보는 참고문헌에서 찾을 수 있다. Fig. 7에서 보이는 철근 콘크리트 골조는 비선형 유한요소해석 프로그램인 Zeus-NL을 이용하여 해석을 수행하였다. 기둥과 보의 각각 6개 및 7개의 요소들로 나누었으며 질량은 보-기둥 접합부에 위치해 있다고 가정하였다. 모드해석을 통하여 얻어진 이 구조물의 주기는 각각 0.898, 0.305, 그리고 0.200 sec이다. 이 연구에서 적용한 한계상태는 Kwon and Elnashai[22]에서 적용한 한계상태를 이용하였다. 사용상태 (Serviceability)에 대하여는 층간변위비율이 0.57%, 피해 제어 상태(Damage control)의 층간변위비율은 1.2%, 그리고 파괴 방지 상태(Collapse prevention)은 2.3%로 설정하였다.

MR 댐퍼는 1층과 2층에 각각 설치되었다고 가정하였고 이 논문에서 이용한 MR 댐퍼의 모델은 Hyperbolic Tangent (HT) 모델이다. HT 모델은 Fig. 1(a)에서 보이듯이 관성질량요소에 연결되어 있는 두 세트의 스프링-대쉬팟 (Spring-Dashpot) 요소들로 구성되어 있다. 관성질량요소는 쿨롬 마찰력(Coulomb Friction)으로 움직임을 저항한다. MR 댐퍼의 실험을 통해 개발된 해석모델을 이용하여 본 해석에 적용하였다. 본 논문에서 적용한 MR 댐퍼의 Simulink 모델은 Fig. 8에 나타나 있다. Fig. 8에서 노란색 Block은 네트워크 통신을 통하여 UI-SimCor에서 보내진 데이터들이고 파란색 Block은 UI-SimCor로 보내지는 데이터이다. Fig. 8에 나타나 있듯이 Semi-active 제어설계는 Linear Quadratic Gaussian(LQG) 알고리즘과 Bang-Bang 제어를 이용하였다. 다양한 구조물의 진동을 감쇠시키는데 효과적이라고 알려져 있는 LQG방법[12]을 기반으로 주제어기로 설계하였고 원하는 댐퍼 힘을 구현하기 위하여 Bang-Bang방법[23]을 부제어기로 사용하였다.

4.2 지반운동의 선정

지반운동을 선정하기 위하여 선택된 구조물이 미국 캘리포니아 온타리오시 (117.651°W, 34.063°N)에 위치하고 지반분류는 NEHRP C로 가정하였다. 지진 가속도 데이터는 50년에 초과확률 2% (재현 주기 2475년)인 지진에 대하여 미국 지질조사국(USGS)에서 제공하는 2008 NSHMP

Fig. 9. Selected spectral attenuation relationship, Conditional mean spectra and response spectra of selected ground motion

Table 2. Selected ground motion

Event	Station	Fault Distance (km)	PGA (g)	Scale Factor	Reference Name
Loma Prieta (1989, Mw 6.9)	Golden Gate Bridge - Long.	79.8	0.23	1.03	GGBL
	Golden Gate Bridge - Trans.	79.8	0.12	1.83	GGBT
	Hollister - South & Pine	27.9	0.37	0.65	HSP
	Palo Alto - SLAC Lab	30.9	0.19	1.35	SLC
Northridge (1994, Mw 6.7)	Sylmar - Olive View Med FF	5.3	0.60	0.58	SYL

PSHA Interactive Deaggregation 사이트 (<https://geohazards.usgs.gov/deagint/2008/>)를 이용하여 확률론적 지진 분석(Probabilistic Seismic Hazard Analysis, 이하 PSHA)을 통하여 선정하였다. 분석된 PSHA 결과를 통하여 선택된 지진감쇠관계(Attenuation relationship)식[24-26]을 이용하여 조건평균스펙트럼(Conditional Mean Spectra)[27]를 구하였다 (Fig. 9). 조건평균스펙트럼은 목표 스펙트럼(Target spectra)의 불확실성을 줄이기 위해 가속도 스펙트럼(Sa), 지진 규모, 단층까지의 거리등의 함수인 표준편차(ϵ)의 개념을 도입한 방법이다. 이 ϵ 는 주어진 지진규모와 단층까지의 거리에 대한 $\ln Sa$ 의 기대평균값과 주어진 $\ln Sa$ 값의 차이에 의한 표준편차로 정의된다. 즉,

$$\epsilon(T) = \frac{\ln Sa(T) - \mu_{\ln Sa}(M, R, T)}{\sigma_{\ln Sa}(T)} \quad (2)$$

여기서, $\mu_{\ln Sa}(M, R, T)$ 와 $\sigma_{\ln Sa}(T)$ 는 주어진 주기에서의 $\ln Sa$ 의 각각 기대 평균값과 표준편차이다. 또한 T는 관심 주기이다. 본 연구에서는 구조물의 관심주기는 1차 모드의 주기로 설정하였다. 따라서 구한 조건평균 스펙트럼을 목표스펙트럼(target spectra)로 설정하여 PEER 지진데이터센터

(http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database)에서 지반운동 기록을 선택하였다. 목표스펙트럼에 맞추기 위하여 보정계수를 곱하여 원래의 지진 데이터를 증감시켰다. 목표스펙트럼과 선택된 5개의 지진가속도 데이터의 응답스펙트럼이 Fig. 9에 나타나 있다. 사용된 보정계수를 포함하여 선택된 지반운동 기록의 자세한 정보는 Table 2에 나타나 있다.

4.3 해석방법

MR 댐퍼로 제어되는 구조물의 지진영향평가 또는 MR 댐퍼 제어기 설계를 할 때 일반적으로 구조물은 선형으로 거동한다고 가정한다. 이러한 가정에 평가된 MR 댐퍼의 효과 및 설계된 제어기가 실제 구조물이 비선형 거동할 때 유효한지를 검증하기 위하여 선택된 예제 구조물의 선형거동하는 경우와 비선형 거동하는 경우를 고려하여 멀티플랫폼 해석을 수행하였다. 4.1 절에서 언급된 대상구조물과 1층 및 2층에 각각 설치된 MR 댐퍼에 대하여 Fig. 3에 제시되었듯이 멀티플랫폼 해석방법을 이용하여 해석을 수행하였다. Fig. 3에서 보이듯이 각각 구조물과 2개의 MR 댐퍼로 분리된 다음, 선형 또는 비선형 거동하는 구조물은 Zeus-NL을 이용하여 모델링되어 해석되며 이와 동시에 MR 댐퍼는 Maltlab/Simulink로 모델링되어 개발된 2개의 MR Damper Plugin을 통하여 해석을 수행하였다. 선형거동의 경

우 콘크리트의 재료 모델은 콘크리트의 압축강도 33.6MPa를 고려한 탄성계수를 가지는 선형탄성모델을 적용하였고 철근의 경우 또한 선형탄성모델을 적용하였다.

4.4 해석결과와 비교

Fig. 10과 Table 3는 선형 구조모델과 비선형 구조모델에 대하여 각각의 지반가속도에 대하여 댐퍼가 없는 경우(Uncontrolled)와 3가지 다른 MR 제어 방법(Passive Off, Passive On, Semi-active)을 사용한 경우의 층간변위비율결과를 나타낸다. 여기서 댐퍼가 없는 경우는 비선형 모델을 이용하여 수행한 해석 결과이다. Fig. 10에서 보이는 바와 같이 구조물의 층간변위에 대한 감소효과가 가장 큰 경우는 Passive on의 경우로 댐퍼가 설치 안 된 경우와 비교하여 2층에서의 층간변위를 선형구조물의 경우 약 58%에서 80%까지, 비선형의 구조물의 경우 약 16%에서 33%까지 저감시켰다. 가장 주목할 만한 경우는 Loma Prieta 지진의 GGBL 지진 가속도에 대하여 댐퍼가 없는 경우에는 층간변위비율이 3.32%로 붕괴 방지한계(2.3%)보다 상당히 크나, MR 댐퍼의 설치 후에는 Passive on의 경우에 층간변위비율이 선형구조물의 경우 0.64%로 층간변위를 80%를 저감시켰으며 비선형구조물의 경우 2.21%로 층간변위를 33%나 저감 시키며 파괴 방지한계보다 작은 값을 가진다. 하지만 선형구조물의 경우 80%를 저감시키는 것으로 나타났으나 현실적인 거동을 고려한 비선형 구조물의 경우 33%를 저감시키는 것으로 나타나 선형 구조물로 고려하였을 때 약 40%이상 과대평가하는 것으로 나타났다.

댐퍼가 설치되지 않은 경우와 비교하여 Semi-active 제어 경우에는 비선형 구조물의 경우 약 1.6%에서 16%까지 층간변위비율을 줄였다. 또한

Fig. 10. Comparison of interstory drift ratios

Table 3. Comparison of maximum interstory drift ratios for each control method

Record	Unctl*	Control Type	Linear		Nonlinear	
			IDR**	Rd***	IDR	Rd
GGBL	3.32	Passive off	1.52	-54.28	3.00	-9.65
		Passive on	0.64	-80.82	2.21	-33.38
		Semi-active	1.46	-56.03	2.96	-10.68
GGBT	2.05	Passive off	1.41	-31.15	1.93	-5.66
		Passive on	0.69	-66.41	1.55	-24.17
		Semi-active	1.26	-38.28	1.78	-12.99
HSP	1.88	Passive off	1.63	-13.46	1.80	-4.42
		Passive on	0.79	-58.22	1.46	-22.25
		Semi-active	1.56	-17.14	1.66	-11.92
SLC	1.81	Passive off	1.58	-12.41	1.78	-1.55
		Passive on	0.71	-60.44	1.51	-16.62
		Semi-active	1.46	-19.34	1.78	-1.61
SYL	2.65	Passive off	1.34	-49.24	2.48	-6.42
		Passive on	0.70	-73.64	1.88	-28.89
		Semi-active	1.27	-51.89	2.25	-15.18

* Unctl: Uncontrolled case

** IDR: Interstory Drift Ratio

*** Rd: Reduction ratio of IDR compared to uncontrolled case

Fig. 11. Displacement and Force of the MR damper at the first floor, record: SYL

Fig. 12. Effect of semi-active control method for linear and nonlinear analysis

Northridge 지진의 SYL의 경우 1층에서의 층간변위비율이 댐퍼가 설치되지 않은 경우에는 붕괴 방지 한계를 넘어섰으나 Semi-active 제어를 한 경우에는 층간변위가 저감되어 붕괴 한계를 넘어서지 않았다. 따라서 MR 댐퍼는 비내진 설계된 구조물의 보강방법으로 가능성을 시사한다고 볼 수 있다. 하지만, 제어기 설계시 Semi-active 제어의 상당한 효과가 기대되었으나 그렇지 못했다. 그 이유는 Semi-active의 제어기를 설계할 때 구조물이 선형 거동한다고 가정하였기 때문이라 판단된다. Fig.10과 Table 3에서 나타나 있듯이 선형구조물의 경우 Semi-active제어 방법을 적용하였을 때 17%에서 56%까지 층간변위를 줄여 상당한 감쇠효과를 나타내고 있다. 또한 1층에 설치된 MR 댐퍼의 힘-변위관계를 나타낸 Fig.11에 있어서 보이듯이 선형의 경우와 비교하여 비선형의 경우, 댐퍼의 에너지 소산이 상대적으로 낮음을 알 수 있다. 따라서 비선형 거동하는 구조물을 적용한 멀티플랫폼 해석에서는 설계된 제어기가 기대치에 미치지 못했다.

Fig. 12는 댐퍼가 설치되지 않은 경우와 비교하여 Semi-active 제어 방법을 적용하였을 때 선형 구조물과 비선형 구조물의 층간변위비율의 저감 효과를 나타낸다. Fig. 12에서 명확하게 나타났듯이 비선형 구조물에 비교하여 선형구조물의 경우에 이용된 모든 지반가속도에 대하여 상당한 감쇠효과를 나타낸다. 선형구조물의 경우 최대 56%의 감쇠효과를 가지는 것으로 나타났으나 비선형 구조물의 경우 최대 15%의 감쇠효과를 가지는 것으로 나타났다. 따라서 비선형 구조물의 거동이 보다 더 현실적인 구조물의 거

동을 나타낸다고 판단할 때, MR 댐퍼로 제어되는 구조물을 평가할 때 구조물의 거동을 선형으로 가정하는 것은 MR 댐퍼의 효과를 과대평가한다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 여러 구조해석 프로그램들의 장점들을 연동하여 수행할 수 있는 멀티플랫폼 해석방법을 도입하여, MR 댐퍼로 제어되는 비선형 구조물의 지진응답해석을 통하여 MR 댐퍼의 감쇠효과를 평가하였다. MR 댐퍼를 이용한 멀티플랫폼 해석을 위하여 본 연구에서 MR Damper Plugin을 개발하여 일반적으로 Matlab/Simulink을 기반으로 개발되는 MR 댐퍼의 해석모델을 비선형 구조해석 프로그램과 쉽게 연동하여 지진응답평가를 수행할 수 있도록 하였다. 개발된 프로그램을 이용한 멀티플랫폼 해석방법은 기존에 수행된 실험결과와 비교하여 검증되었으며, 검증된 방법을 이용하여 MR 댐퍼 적용시 일반적으로 가정되는 선형 거동하는 구조물과 실제 비선형 거동하는 구조물에 대하여 해석을 수행하여 MR 댐퍼의 영향평가를 수행하였다. 해석결과 MR 댐퍼가 설치되지 않은 경우와 비교하여 MR 댐퍼가 적용된 경우 전체적으로 층간변위의 상당한 저감효과를 보였다. 또한 몇몇의 경우에는 구조물의 성능한계상태를 바꿀 수 있는 상당한 효과를 나타냈다. 하지만 MR 댐퍼를 적용한 선형 및 비선형 구조물의 거동을 비교하였을 때, 보다 더 현실적인 구조물의 거동을 나타낼 수 있는 비선형 구조물의 경우보다 선형 구조물의 경우가 상당한 감쇠효과를 보여 MR 댐퍼의 효과를 과대평가하는 것으로 나타났다. 따라서 MR 댐퍼의 제어 설계 및 지진영향평가를 수행할 때 구조물의 비선형거동을 고려하여 MR 댐퍼의 효과를 현실적이며 신뢰성이 있게 평가할 필요가 있다. 또한 본 논문에서 도입한 멀티플랫폼 해석방법은 비선형 거동하는 구조물의 지진거동뿐만 아니라 좀 더 현실적인 지진제어에 방법을 개발하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 2012년도 계명대학교 비사(신진)연구기금으로 이루어졌으며 또한 연구에 도움을 준 코네티컷 대학의 Dr. Christenson, Mr. Lovejoy와 토론토 대학의 Dr. Kwon에게 감사한다.

/ REFERENCES /

1. Dyke SJ, Spencer BF, Sain MK, Carlson JD. An experimental study of MR dampers for seismic protection. *Smart Materials and Structures*. 1998;7:693-703.
2. Johnson EA, Ramallo JC, Spencer BF, Sain MK. Intelligent base isolation systems. *Proc. 2nd World Conf. on Structural Control (Kyoto)*. 1998;1:367-376.
3. Jiang Z, Christenson R. A comparison of 200 kN magnetorheological damper models for use in real-time hybrid simulation pretesting. *Smart Materials and Structures*. 2011;20(6).
4. Gavin HP. Multi-duct ER dampers. *Journal of Intelligent Material*

- System and Structures, 2001;12:353–366.
5. Bass BJ, Christenson RE. System identification of a 200 kN magneto-rheological fluid damper for structural control in large-scale smart structures. Proc. American Control Conf, New York City, 2007; 2690–2695.
6. Wen YK. Method of random vibration of hysteretic systems. ASCE Journal of Engineering Mechanics Division, 1976; 102: 249–263.
7. Spencer BF, Dyke SJ, Sain MK, Carlson, JD. Phenomenological model of a magnetorheological damper. ASCE Journal of Engineering Mechanics Division, 1997;123:230–238.
8. Dahl PR. Solid friction damping of mechanical vibrations. AIAA Journal, 1976;14:1675–1682.
9. Aguirre N, Ikhouane F, Rodellar J, Christenson RE. Modeling and identification of large scale magnetorheological dampers. 4th European Conf. on Structural Control, c2008.
10. Song X, Ahmadian M, Southward S. Modeling magnetorheological dampers with application of nonparametric approach. Journal of Intelligent Material System and Structures, 2005;16:421–432.
11. Ruangrassamee A, Srisamai W, Lukkunaprasit P. Response mitigation of the base isolated benchmark building by semi-active control with the viscous-plus-variable-friction damping force algorithm. Journal of Structural Control and Health Monitoring, 2006;13: 809–822.
12. Ohtori Y, Christenson RE, Spencer BF, Dyke SJ. Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings. Journal of Engineering Mechanics, 2004;130:366–385.
13. Elnashai AS, Papanikolaou V, and Lee D. Zeus NL – A System for Inelastic Analysis of Structures. Mid-America Earthquake Center, University of Illinois at Urbana-Champaign, CD-Release 04–01, c2004.
14. McKenna F, Fenves GL. The OpenSees command language manual, version 1.2, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California at Berkeley, c2001.
15. Dermitzakis SN, Mahin SA. Development of Substructuring Techniques for On-line Computer Controlled Seismic Performance Testing. Report UCB/EERC–85/04, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley. c1985.
16. Kwon OS, Nakata N, Elnashai AS, Spencer BF. A Framework for Multi-site Distributed Simulation and Application to Complex Structural Systems. Journal of Earthquake Engineering, 2005;9(5): 741–753.
17. Kim SJ, Holub C, Elnashai AS. Experimental investigation of the behavior of RC bridge piers subjected to horizontal and vertical earthquake motion. Engineering Structures, 2011;33(7):2221–2235.
18. Ji J, Kwon O, Elnashai A, Kuchma D. Chapter 15. Multi-resolution distributed FEA simulation of a 54-story RC building. Computational Structural Dynamics and Earthquake Engineering. Ed. M. Papadra – kakis, D. C. Charmpis, N. D Lagaros, and Y. Tsompanakis, CRC Press, 2009;2.
19. Kwon O, Elnashai AS. Seismic Analysis of Meloland Road Overcrossing Using Multiplatform Simulation Software Including SSI. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2008;134(4):651–660.
20. Kim SJ, Christenson RE, Wojtkiewicz SF, Johnson EA. Real-Time Hybrid Simulation using the Convolution Integral Method. Smart Materials and Structures, 2011;20(2).
21. Bracci JM, Reinhorn AM, Mander JB. Seismic resistance of reinforced concrete frame structures designed only for gravity loads: part I—design and properties of a one-third scale model structure. Technical report NCEER–92–0027, c1992.
22. Kwon O, Elnashai AS. The effect of material and ground motion uncertainty on the seismic vulnerability curves of RC structure. Engineering Structures, 2006;28:289–303.
23. Christenson RE, Emmons AT. Semiactive structural control of a nonlinear building model: considering reliability ASCE Proc. Structures Congr. (New York). c2005.
24. Chiou BS, Youngs R. An NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. Earthquake Spectra, 2008;24:173–215.
25. Boore DM, Atkinson GM. Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%–Damped PSA at Spectral Periods between 0.01 s and 10.0 s. Earthquake Spectra, 2008;24:99–138.
26. Campbell KW, Bozorgnia Y. NGA Ground Motion Model for the Geometric Mean Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and 5% Damped Linear Elastic Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 s. Earthquake Spectra, 2008;24:139–171.
27. Baker J. Conditional Mean Spectrum: Tool for Ground-Motion Selection. Journal of Structural Engineering, 2011;137(6):322–331.