

토목공학에서의 자기유변 유체 감쇠기를 이용한 반능동 제어 시스템: 최신 연구 동향

Semiactive Control Systems Using MR Fluid Dampers in Civil Engineering Applications: a State-of-the Art Review

정형조*	박규식**	Billie F. Spencer, Jr.***	이인원****
Jung, Hyung-Jo	Park, Kyu-Sik	Billie F. Spencer, Jr.	Lee, In-Won

ABSTRACT

Semiactive control systems have received considerable attention for protecting structures against natural hazards such as strong earthquakes and high winds, because they not only offer the reliability of passive control systems but also maintain the versatility and adaptability of fully active control systems. Among the many semiactive control devices, magnetorheological (MR) fluid dampers comprise one particularly promising class. In the field of civil engineering, much research and development on MR fluid damper-based control systems has been conducted since B. F. Spencer first introduced this unique semiactive device to civil engineering applications in mid 1990s. In 2001, MR fluid dampers were applied to the full-scale in-service civil engineering structures for the first time. This state-of-the-art paper includes a detailed literature review of control algorithms considering the characteristics of MR fluid dampers. This review provides references to semiactive control systems using MR fluid dampers. The MR fluid damper-based semiactive control systems are shown to have the potential for mitigating the responses of full-scale civil engineering structures under natural hazards.

1. 서 론

토목공학 분야에서, 지진(地震) 및 강풍(強風)과 같은 자연 재해에 의해 발생하는 구조물의 과도한 진동을 제어하는 문제는 매우 중요하다. 최근 들어 반능동 제어(半能動 制御) 시스템이 여러가지 제어 기법들 중에서도 특히 주목을 받고 있다. 이는 반능동 제어 시스템이 수동 제어(受動 制御) 시스템과 같은 높은 신뢰성(信賴性)을 제공할 수 있을 뿐만 아니라 능동 제어(能動 制御) 시스템의 장점인 및 뛰어난 적응성(適應性)도 유지할 수 있는 특성을 보유하고 있기 때문이다. 반능동 제어 시스템의 기본 개념은 그림 1과 같이 표현할 수 있다.⁽¹⁾ 그림에서 볼 수 있듯이 제어 가력기(control actuator)는 능동 제어 시스템의 경우와는 달리 기계적 에너지를 직접 구조물에 가하지 못하기 때문에, 반능동 제어 시스템은 한정 입출력(bounded-input bounded-output) 안정도가 보장된다. Symans and Constantinou⁽²⁾는 구조물의 내진(耐震) 성능 향상을 위해 개발된 반능동 제어 시스템에 대한 기존 연구를 자세히 조사·정리한 논문을 발표하였다.

* 정희원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 연구조교수
** 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정
*** 미국 일리노이주립대학교 토목 및 환경공학과 Nathan M. Newmark 교수
**** 정희원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수

그들은 강성 제어 장치 (stiffness control devices), 전기유변 유체 감쇠기 (electro-rheological (ER) fluid dampers), 자기유변 유체 감쇠기 (magnetorheological (MR) fluid dampers), 마찰 제어 장치 (friction control devices), 유체 점성 감쇠기 (fluid viscous dampers) 및 동조 질량/액체 감쇠기 (tuned mass/liquid dampers) 와 같은 다양한 반능동 제어 장치들이 지진 하중을 받는 토목 구조물의 거동을 향상시킬 수 있음을 기존 연구 결과의 제시·분석을 통해 입증하였다.

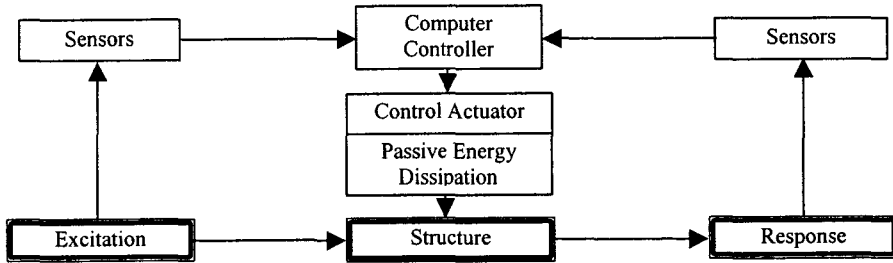


그림 1. 반능동 제어 시스템의 블록 다이어그램⁽¹⁾

여러가지 반능동 제어 장치 중에서, 자기유변 유체 감쇠기 (이하 MR 감쇠기)는 그 장치의 기계적인 단순성 (밸브가 필요 없음), 높은 동적 범위 (MR 감쇠기에 자기장을 가해줌으로써 10배 정도의 힘을 얻을 수 있음), 적은 전력 요구량 (일반적으로 50 Watt 이하), 커다란 감쇠 능력, 외부 환경에 대한 뛰어난 강인성 등을 보유하고 있기 때문에, 기존 반능동 제어 장치들이 갖는 기술적인 어려움의 많은 부분을 해결할 수 있는 매우 유망한 장치이다. 토목공학 분야에서는, 1990년대 중반에 미국의 B. F. Spencer가 최초로 이 분야에 MR 감쇠기를 도입한 이래로, MR 감쇠기를 기반으로 하는 제어 시스템에 대한 많은 연구가 수행되고 있다. 이러한 연구의 결과로, 2001년에 중국 Dongting Lake Bridge (사장교)의 케이블에 풍우(風雨) 진동 (rain-wind-induced vibration)을 저감시키기 위해 소형 MR 감쇠기가 장착되었고, 일본의 과학미래관 (科學未來館) 건물에도 지진에 의한 진동을 감소시키기 위해 30톤 용량의 MR 감쇠기가 설치되었다. 이것은 MR 감쇠기를 이용한 반능동 제어 기술을 실제 토목 구조물에 적용한 세계 최초의 적용 사례이다.

본 논문에는 토목공학 분야에서 현재까지 수행된 MR 감쇠기-기반 제어 알고리즘에 대한 기존 연구가 자세하게 조사되어 있으며, 이러한 내용은 향후 관련 분야를 연구하는데 있어서 참고 자료로 활용될 수 있다.

2. MR 감쇠기를 이용한 반능동 제어 시스템

MR 감쇠기가 본질적으로 비선형(非線型) 특성을 가지고 있기 때문에, 실제 구조물에 적용 가능할 뿐만 아니라 MR 감쇠기의 성능을 충분히 발휘할 수 있는 제어 기법을 개발하는 것은 매우 중요하면서도 어려운 문제이다. 1990년대 중반부터 현재까지, 다양한 비선형 제어 기법이 MR 감쇠기의 특별한 특성을 이용하기 위해 개발되었다. MR 감쇠기가 장착된 구조 시스템을 위한 제어 알고리즘은 크게 모델-기반 제어 (model-based control) 와 지능 제어 기술-기반 제어 (intelligent technology-based control)로 나눌 수 있다.

2.1. 모델-기반 제어 (Model-based control)

2.1.1. 최적제어-기반 알고리즘 (Optimal control-based algorithm)

현재까지, MR 감쇠기를 이용한 제어 문제를 해결하기 위해서는 clipped-optimal control algorithm이 가장 널리 사용되고 있다. Dyke *et al.*⁽³⁾은 MR 감쇠기가 설치된 구조물의 제어를 위해 가속도 피드백

(acceleration feedback)에 기반을 둔 clipped-optimal control algorithm을 제안하였다. 이 방법에서는, 제어력에 대한 피드백 루프 (feedback loop)를 고려한 선형 이차 (linear quadratic (LQ)) 최적 제어기를 통해 필요한 제어력을 계산한 후, 계산된 제어력과 실제 구조물에 입력되는 제어력을 입력으로 하는 clipped algorithm을 통해 MR 감쇠기에 입력될 0 또는 최대값의 두 단계 명령 전압 (command voltage)을 결정하게 된다. 제안된 clipped-optimal control algorithm은 실험을 통해 효율성이 검증되었다.^{(4),(5)} Dyke and Spencer⁽⁶⁾는 여러 개의 MR 감쇠기가 구조물에 설치된 경우에 대해서 clipped-optimal control algorithm을 적용한 후 수치적으로 제어 효과를 확인하였고, Yi *et al.*^{(7),(8)}은 같은 경우에 대해서 실험을 통해 알고리즘의 효율성을 검증하였다.

Johnson *et al.*⁽⁹⁾은 건물에 대한 지진 격리 시스템 (seismic isolation system)에 clipped-optimal control algorithm과 MR 감쇠기를 이용한 반동동 제어 기법을 적용하기 위한 초기 연구를 수행하였고, Ramallo *et al.*⁽¹⁰⁾은 같은 문제에 대표적인 지진 격리 장치인 납-고무 받침 (lead rubber bearing (LRB))을 고려하였다. Yoshioka *et al.*⁽¹¹⁾은 그림 2과 같은 실험을 통해 MR 감쇠기가 장착된 지진 격리 시스템의 효율성을 실험적으로 검증하였다. Ribakov and Gluck⁽¹²⁾은 선택 제어 (selective control) 개념을 MR 감쇠기-기반 제어 시스템에 제안하였다. 그들은 5층 및 8층 건물 모형에 대한 수치 시뮬레이션을 통해 선택 제어가 시스템의 성능을 향상시킬 뿐만 아니라 구조물의 최적 거동을 위해 필요한 제어력을 감소시킴을 보였다.

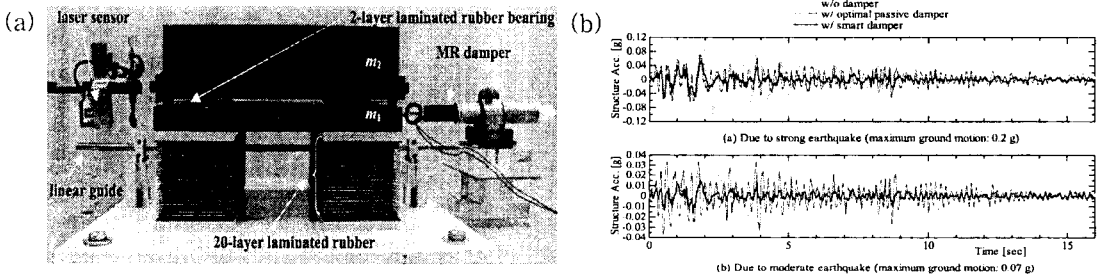


그림 2. MR 감쇠기를 장착한 지진 격리 시스템⁽¹¹⁾; (a) 실험장치 (b) 가속도 응답 결과

Johnson *et al.*^{(13),(14)}과 Baker *et al.*⁽¹⁵⁾은 clipped-optimal control algorithm과 MR 감쇠기를 사용하여 풍우 (風雨)에 의해 케이블에 발생하는 과도한 진동을 감소시키기 위한 해석적인 연구를 수행하였다. 또한, Johnson *et al.*^{(14),(16)}은 케이블의 처짐 효과 (sag effect)를 이 문제에 고려하였다. Christenson *et al.*^{(17),(18)}과 Christenson⁽¹⁹⁾은 실험을 통해 케이블 진동 문제에 대한 MR 감쇠기-기반 반동동 제어 방법의 성능을 검증하였다.

Christenson *et al.*^{(20),(21),(22)}과 Christenson⁽¹⁹⁾은 서로 근접한 고층 건물들을 MR 감쇠기를 이용해 연결함으로써 지진 하중에 의한 진동을 감소시키고 부수적으로 건물간의 충돌을 방지하는 효과를 얻고자 하는 coupled building 문제에 대한 연구를 수행하였다. 그들은 이 문제에 대해서 clipped-optimal control algorithm의 구조물 응답 제어 효과를 확인하였다.

Yoshida *et al.*⁽²³⁾은 축방향 지진 하중을 받는 비정형 건물에 있어서 비틀림-축 응답을 제어하기 위해 clipped-optimal control algorithm을 적용하였다. 그들은 2층 비대칭 건물 모델을 사용해 수행된 실험적 연구로부터, MR 감쇠기를 사용한 반동동 제어기의 성능이 수동 제어 시스템보다 뛰어난 것을 입증하였다.

Jung *et al.*^{(24),(25)}과 Koh *et al.*⁽²⁶⁾은 미국토목학회 (ASCE)의 사장교에 대한 1단계 벤치마크 제어 문제를 이용해서 사장교의 내진 성능 향상을 위한 대용량 MR 감쇠기와 clipped-optimal control algorithm을 조합한 반동동 제어 방법의 효과를 수치 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

Ruangrassamee *et al.*⁽²⁷⁾과 Ruangrassamee and Kawashima⁽²⁸⁾은 연속교 교량 상판간의 충돌을 방지하기 위해 상판과 상판사이에 MR 감쇠기를 설치한 시스템에 대한 연구를 수행하였다. Ekruis *et al.*⁽²⁹⁾은 도로교를 2자유도 시스템으로 단순화 시킨 후에 MR 감쇠기를 고려한 다양하고 자세한 수치 시뮬레이션을 통해서, 도로교의 지진 응답을 감소시키는데 MR 감쇠기가 효과적임을 보였다.

Dyke⁽³⁰⁾는 고층 건물의 지진응답을 감소시키기 위해 clipped-optimal control algorithm을 적용하였다. 또한, Yun *et al.*⁽³¹⁾은 바람에 의한 고층 건물의 과도한 진동을 저감시키기 위해 같은 방식의 반능동 제어 기법을 사용하였다.

Clipped-optimal control algorithm 이외에도, MR 감쇠기를 이용한 반능동 제어 시스템에 대한 많은 다른 최적제어-기반 알고리즘이 연구되었다. Xu *et al.*⁽³²⁾은 clipped-optimal displacement control algorithm을 제안하였다. 그들은 4층 건물 모델을 해석하여 그들의 알고리즘을 검증하였다. Qu and Xu⁽³³⁾는 순간 준-최적 능동 제어 (instantaneous sub-optimal active control) 원리에 기반을 둔 반능동 준-최적 변위 제어 알고리즘을 개발하였고, 지진하중을 받는 고층 건물의 지진 응답을 제어하는데 그 알고리즘을 적용하였다. Ren and Xu⁽³⁴⁾는 1층 및 4층 건물 모델의 지진 응답을 감소시키기 위한 state-jump control algorithm을 제시하였다. Zhou and Chang⁽³⁵⁾과 Chang and Zhou⁽³⁶⁾는 MR 감쇠기로 LQR (linear quadratic regulator) algorithm에서 계산된 목표 제어력을 만들기 위해, MR 감쇠기에 필요한 입력 전압을 감쇠기의 역-신경망 모델 (inverse-neural network model)을 통해 추정하는 기법을 제안하였다. 그들은 3층 건물 모델을 사용하여 그들의 알고리즘을 해석적으로 검증하였다. Ni *et al.*⁽³⁷⁾은 MR 감쇠기를 사용한 근접한 건물 구조물의 지진 응답을 제어하기 위한 추계론적 최적 제어 기법을 실험적으로 연구하였다. Cho *et al.*⁽³⁸⁾은 MR 감쇠기가 부착된 6층 건물 모델에 모드 제어 알고리즘을 적용하였다.

2.1.2. Lyapunov 함수-기반 제어 (Lyapunov function-based control)

Dyke and Spencer⁽³⁹⁾와 Jansen and Dyke^{(40),(41)}는 Lyapunov 안정도 이론에 기반을 둔 제어 (control based on Lyapunov stability theory), 이산화된 뱅뱅 제어 (decentralized bang-bang control) 및 최대 에너지 소산 (maximum energy dissipation)과 같은 다양한 Lyapunov 함수-기반 제어 알고리즘이 지진 응답을 감소시키는 데 효율적임을 수치적으로 입증하였다. Yi *et al.*⁽⁸⁾은 Lyapunov 안정도 이론에 기반을 둔 제어의 효과를 실험적으로 검증하였다.

Sahasrabudhe and Nagarajaiah⁽⁴²⁾는 near-fault 형태의 지진 하중을 받는 미끄럼 베어링 (sliding bearing) 이 장착된 건물에 대한 MR 감쇠기의 제어 효과에 대한 연구를 수행하였다. 그들은 1/5로 축소된 2층 건물 모델에 MR 감쇠기를 부착하고 실시간 적용이 가능한 Lyapunov 제어기를 이용하여 반능동 제어 효과를 확인하기 위한 실험을 수행하였다. Wang and Gordaninejad⁽⁴³⁾도 MR 감쇠기가 장착된 교량의 Lyapunov 함수를 기반으로 하는 제어 방법에 대한 연구를 수행하였다.

2.1.3. 강인 제어 (Robust control)

Moon *et al.*^{(44),(45)}은 미국토목학회 (ASCE)의 지진 하중을 받는 사장교에 대한 1단계 벤치마크 제어 문제에 clipped-sliding mode control algorithm과 MR 감쇠기의 조합을 적용하여 제어 효과를 개선시키고 강인성을 증대시켰다. 또한 Li and Samali⁽⁴⁶⁾는 지진하중을 받는 UTS 5층 벤치마크 건물 모델의 진동을 제어하기 위해 같은 조합을 사용하였다.

Zhang and Roschke⁽⁴⁷⁾는 4층 건물 모델의 바람에 의한 응답을 감소시키기 위해 MR 감쇠기를 장착하고 가속도 피드백에 기반을 둔 LQG/LTR 제어 기법을 사용하였다. 그들은 강풍을 받는 구조물의 경우, 제안된 제어기법을 이용하여 최고 바닥 가속도를 현저히 감소시키는 것을 수치적으로 입증하였다.

2.2. 지능 제어 기술-기반 제어 (Intelligent technology-based control)

Ni *et al.*^{(48),(49)}은 stay cable의 과도한 진동을 감소시키기 위해 두가지 형태의 신경망-기반 제어기 (neural network-based control)를 제안하였다. 그들은 신경망 제어기 (neuro controller)가 MR 감쇠기를 사용한 stay cable의 반능동 진동 제어 문제에 효과적으로 응용될 수 있다는 것을 수치적으로 입증하였다.

Zhou and Chang⁽⁵⁰⁾과 Zhou *et al.*⁽⁵¹⁾은 비선형 3층 건물 모형을 고려하여 MR 감쇠기를 갖는 반능동 제어 시스템에 대한 퍼지 논리-기반 제어 기법 (fuzzy logic-based control strategy)의 초기 연구를 수행하였다. Liu *et al.*^{(52),(53)}은 MR 감쇠기가 부착된 2경간 축소 교량 모델에 퍼지 논리에 기반을 둔 페루프 제어 알고리즘을 적용하였다. 그들은 교량 모델의 진동 감소에 대한 반능동 MR 감쇠기 제어 시스템의 효과를 실험을 통해 검증하였다. Loh and Wu⁽⁵⁴⁾는 뱅뱅 제어 알고리즘과 퍼지 논리 제어 개념을 결합한 알고리즘을 가지고 MR 감쇠기가 설치된 1자유도 격리 시스템의 지진 응답을 감소시키는 연구를 수행하였다.

Schurter and Roschke^{(55),(56)}는 1자유도와 4자유도 건물 모델에 있어서 지진으로 유도된 진동의 감소를 위하여 뉴로-퍼지 (neuro-fuzzy) 기법을 이용한 새로운 접근방법을 제안하였고, 이를 수치적, 실험적으로 검증하였다.

3. 결 론

본 연구에서는 지진이나 강풍과 같은 자연 재해에 의해 발생하는 토목 구조물의 과도한 진동을 저감시키기 위해 개발된 MR 감쇠기-기반 반능동 제어 시스템의 최근 연구 동향을 조사하였다. MR 감쇠기가 장착된 토목 구조물을 제어하기 위해 개발된 알고리즘에 대한 기존 연구 결과를 통해, MR 감쇠기-기반 반능동 제어 시스템이 토목 구조물의 자연 재해에 대한 방재 수단으로 사용될 수 있음을 확인하였다. 본 논문의 내용은 향후 MR 감쇠기를 이용한 반능동 제어 시스템에 대한 연구의 참고 자료로 활용될 수 있을 것이다.

본 논문은 MR 감쇠기가 설치된 구조물을 제어하기 위한 알고리즘에 대한 연구 동향만을 언급하고 있다. MR 감쇠기의 동적 모델이나 토목분야에서 MR 감쇠기의 실제 적용 사례에 대한 최근 연구 동향은 참고문헌 [57]에 수록되어 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 우수연구센터인 한국과학기술원 스마트 사회기반시설 연구센터 (Smart Infra-Structure Technology Center)의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Soong, T.T. and Spencer Jr., B.F. (2002), "Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice", *Engineering Structures*, Vol. 24, 243-259.
2. Symans, M.D. and Constantinou, M.C. (1999), "Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review", *Engineering Structures*, Vol. 21, 469-487.
3. Dyke, S.J., Spencer, Jr., B.F., Sain, M.K. and Carlson, J.D. (1996a), "Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction", *Smart Materials and Structures*, Vol. 5, 565-575.
4. Dyke, S.J., Spencer, Jr., B.F., Sain, M.K. and Carlson, J.D. (1996b), "Experimental verification of semi-active structural control strategies using acceleration feedback", *Proceedings of the 3rd International Conference on Motion and Vibration Control*, Chiba, Japan, Vol. III, 291-296.
5. Dyke, S.J., Spencer, Jr., B.F., Sain, M.K. and Carlson, J.D. (1998), "An experimental study of MR

dampers for seismic protection", *Smart Materials and Structures: Special Issue on Smart Materials and Structures Technology: Application to Large Civil Infrastructure*, Vol. 7, 693-703.

6. Dyke, S.J. and Spencer, Jr., B.F. (1996), "Seismic response control using multiple MR dampers", *Proceedings of the 2nd International Workshop on Structural Control*, Hong Kong, 163-173.

7. Yi, F., Dyke, S.J., Frech, S. and Carlson, J.D. (1998), "Investigation of magnetorheological dampers for earthquake hazard mitigation", *Proceedings of the 2nd World Conference on Structural Control*, Kyoto, Japan, Vol. 1, 349-358.

8. Yi, F., Dyke, S.J., Caicedo, J.M. and Carlson, J.D. (2001), "Experimental verification of multi-input seismic control strategies for smart dampers", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 127(11), 1152-1164.

9. Johnson, E.A., Ramallo, J.C., Spencer, Jr., B.F. and Sain, M.K. (1998), "Intelligent base isolation systems", *Proceedings of the Second World Conference on Structural Control (2WCSC)*, Kyoto, Japan, Vol. 1, 367-376.

10. Ramallo, J.C., Johnson, E.A., Spencer, Jr., B.F. and Sain, M.K. (2000), "'Smart' base isolation systems", *Proceedings of the Advanced Technology in Structural Engineering, Structures Congress*, Philadelphia, Pennsylvania, USA, CD-ROM.

11. Yoshioka, H., Ramallo, J.C. and Spencer, Jr., B.F. (2002), "'Smart' base isolation strategies employing magnetorheological dampers", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 128(5), 540-551.

12. Ribakov, Y. and Gluck, J. (2002), "Selective controlled base isolation system with magnetorheological dampers", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, 1301-1324.

13. Johnson, E.A., Baker, G.A., Spencer, Jr., B.F. and Fujino, Y. (2000a), "Mitigating stay cable oscillation using semiactive damping", *Smart Structures and Materials 2000: Smart Systems for Bridges, Structures and Highways* (S.C. Liu ed.), Newport Beach, California, USA, Vol. 3988, 207-216.

14. Johnson, E.A., Christenson, R.E. and Spencer, Jr., B.F. (2000b), "Semiactive damping of cables with sag", *Proceedings of the International Conference on Advances in Structural Dynamics (ASD2000)* (J.M. Ko and Y.L. Xu eds.), Hong Kong, 327-334.

15. Baker, G.A., Johnson, E.A., Spencer, Jr., B.F. and Fujino, Y. (1999), "Modeling and semiactive damping of stay cables", *Proceedings of the 13th ASCE Engineering Mechanics Conference*, Baltimore, Maryland, USA, CD-ROM.

16. Johnson, E.A., Christenson, R.E. and Spencer, Jr., B.F. (2001), "Smart stay cable damping - effects of sag and inclination (invited)", *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR'01)*, Newport Beach, California, USA, CD-ROM.

17. Christenson, R.E., Spencer, Jr., B.F. and Johnson, E.A. (2001), "Experimental verification of semiactive damping of stay cables", *Proceedings of the 2001 American Control Conference*, Arlington, Virginia, USA, 5058-5063.

18. Christenson, R.E., Spencer, Jr., B.F. and Johnson, E.A. (2002), "Experimental studies on the smart damping of stay cables", *Proceedings of the 2002 Structures Congress*, Denver, Colorado, USA, CD-ROM.

19. Christenson, R.E. (2001), "Semiactive control of civil structures for natural hazard mitigation: analytical and experimental studies," *Ph.D dissertation*, University of Notre Dame, Indiana, USA.

20. Christenson, R.E. and Spencer, Jr., B.F. (1999a), "Coupled building control using 'smart' dampers", *Proceedings of the 13th ASCE Engineering Mechanics Conference*, Baltimore, Maryland, USA, CD-ROM.

21. Christenson, R.E., Spencer, Jr., B.F. and Johnson, E.A. (1999b), "Coupled building control using active and smart damping strategies", *Optimization and Control in Civil and Structural Engineering* (B.H.V. Topping and B. Kumar eds.), Civil-Comp Press, 187-195.

22. Christenson, R.E., Spencer, Jr., B.F. and Johnson, E.A. (2000), "Coupled building control using 'smart' damping strategies", *Proceedings of the Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways, the 7th SPIE Annual International Smart Structures and NDE Symposia*, Newport Beach, CA, USA.

23. Yoshida, O., Dyke, S.J., Giacosa, L.M. and Truman, K.Z. (2002), "Torsional response control of asymmetric buildings using smart dampers," *Proceedings of the 15th ASCE Engineering Mechanics*

Conference, New York, NY, USA, CD-ROM.

24. Jung, H.-J., Spencer Jr., B.F. and Lee, I.-W. (2001), "Benchmark control problem of seismically excited cable-stayed bridges using smart damping strategies", *Proceedings of the IABSE Conference on Cable-Supported Bridges - Challenging Technical Limits*, Seoul, Korea, Serial 84, 256-257 (Full paper in CD-ROM).

25. Jung, H.-J., Spencer, Jr., B.F. and Lee, I.-W. (2002), "Seismic protection of cable-stayed bridges using magnetorheological dampers," *Proceedings of the Seventh U. S. National Conference on Earthquake Engineering*, Boston, Massachusetts, USA, CD-ROM.

26. Koh, H.M., Park, W., Park, K.S., Ok, S.Y. and Hahm, D. (2001), "Performance evaluation and cost effectiveness of semi-active vibration control system for cable-stayed bridges under earthquake excitation", *Proceedings of the IABSE Conference IABSE Conference on Cable-Supported Bridges - Challenging Technical Limits*, Seoul, Korea, Serial 84, 258-259 (Full paper in CD-ROM).

27. Ruangrassamee, A., Jung, H.-J., Kawashima, K. and Spencer, Jr., B.F. (2001), "Semi-active control of a nonlinear coupled bridge system by the clipped optimal control algorithm", *Proceedings of the US-Japan Workshop on Smart Structures for Improved Seismic Performance in Urban Region*, Seattle, Washington, USA, 183-198.

28. Ruangrassamee, A. and Kawashima, K. (2001), "Semi-active control of bridges by using MR dampers", *Proceedings of the US-Japan Workshop on Smart Structures for Improved Seismic Performance in Urban Region*, Seattle, Washington, USA, 199-212.

29. Erkus, B., Abe, M. and Fujino, Y., (2002), "Investigation of semi-active control for seismic protection of elevated highway bridges", *Engineering Structures*, Vol. 24, 281-293.

30. Dyke, S.J. (1998), "Seismic protection of a benchmark building using magnetorheological dampers", *Proceedings of the 2nd World Conference on Structural Control*, Kyoto, Japan, Vol. 2, 1455-1462.

31. Yun, C.-B., Gu, J.-I., Kim, S.B. and Kim, Y.-S. (2001), "Semi-active control of wind-induced vibration of tall building using magneto-rheological damper, *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR'01)*, Newport Beach, California, USA, CD-ROM.

32. Xu, Y.L., Qu, W.L. and Ko, J.M. (2000), "Seismic response control of frame structures using magnetorheological/electrorheological dampers", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 29, 557-575.

33. Qu, W.L. and Xu, Y.L. (2001), "Semi-active control of seismic response of tall buildings with podium structure using ER/MR dampers", *The Structural Design of Tall Buildings*, Vol. 10, 179-192.

34. Ren, X. and Xu, Z. (2001), "Semi-active structural control for seismic response using MR dampers", *Proceedings of the Eighth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, Singapore, Paper No. 1300, CD-ROM.

35. Zhou, L. and Chang, C.C. (2000), "A recurrent neural network emulator for the inverse dynamics of an MR damper", *Proceedings of the International Conference on Advances in Structural Dynamics (ASD2000)* (J.M. Ko and Y.L. Xu eds.), Hong Kong, 365-372.

36. Chang, C.-C. and Zhou, L. (2002), "Neural network emulation of inverse dynamics for a MR damper", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 128(2), 231-239.

37. Ni, Y.Q., Liu, H.J. and Ko, J.M. (2002), "Experimental investigation on seismic response control of adjacent buildings using semi-active MR dampers", *Smart Structures and Materials 2002: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways* (S.C. Liu and D.J. Pines eds.), SPIE Vol. 4696.

38. Cho, S.-W., Kim, B.-W., Jung, H.-J. and Lee, I.-W. (2002), "Implementation of modal control for seismically excited structures using MR damper," *Proceedings of the International Conference on Advances and New Challenges in Earthquake Engineering Research*, Hong Kong.

39. Dyke, S.J. and Spencer, Jr., B.F. (1997), "A comparison of semi-active control strategies for the MR damper", *Proceedings of the IASTED International Conference on Intelligent Information Systems*, The Bahamas.

40. Jansen, L.M. and Dyke, S.J. (1999), "Investigation of nonlinear control strategies for the

implementation of multiple magnetorheological dampers", *Proceedings of the 1999 ASCE Engineering Mechanics Conference*, Baltimore, Maryland, USA.

41. Jansen, L.M. and Dyke, S.J. (2000), "Semi-active control strategies for the MR damper: a comparative study", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 126(8), 795-803.

42. Sahasrabudhe, S. and Nagarajaiah, S. (2001), "Semiactive control of sliding isolated buildings with MR dampers", *Proceedings of 2001 Mechanics and Materials Conference*, San Diego, California, USA.

43. Wang, X. and Gordaninejad, F. (2001), Lyapunov-based control of a bridge using magneto-rheological fluid dampers, *Proceedings of the 8th International Conference on ER/MR Fluids*.

44. Moon, S.J., Bergman, L.A. and Voulgaris, P.G. (2002), "Sliding mode control of a cable-stayed bridge subjected to seismic excitation", *Proceedings of the 3rd World Conference on Structural Control*, Como, Italy.

45. Moon, S.J., Bergman, L.A. and Voulgaris, P.G. (2002), "Sliding mode control of a cable-stayed bridge subjected to seismic excitation", *Proceedings of the 7th US National Conference on Earthquake Engineering*, Boston, Massachusetts, USA, CD-ROM.

46. Li, J. and Samali, B. (2001), "Sliding mode control of five story benchmark model with magnetorheological (MR) damper", *Proceedings of the eighth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, Singapore, Paper No. 1534, CD-ROM.

47. Zhang, J. and Roschke, P.N. (1999), "Active control of a tall structure excited by wind", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 83, 209-223.

48. Ni, Y.Q., Cao, D.Q., Ko, J.M., and Chen, Y. (2000), "Neuro-control of inclined sagged cables using semi-active MR dampers", *Proceedings of the International Conference on Advances in Structural Dynamics (ASD2000)* (J.M. Ko and Y.L. Xu eds.), Hong Kong, Vol. II, 1373-1380.

49. Ni, Y.Q., Chen, Y., Ko, J.M. and Cao, D.Q. (2002), "Neuro-control of cable vibration using semi-active magneto-rheological dampers", *Engineering Structures*, Vol. 24, 295-307.

50. Zhou, L. and Chang, C.C. (2000), "Adaptive fuzzy control for a structure-MR damper system", *Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways, SPIE's 7th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, Newport Beach, California, USA.

51. Zhou, L., Chang, C.C. and Spencer, Jr., B.F. (2002), "Intelligent technology-based control of motion and vibration using MR dampers", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol. 1, No. 1, 100-110.

52. Liu, Y., Gordaninejad, F., Evrensel, C. A., and Wang, X. (2000), Semi-active control of a bridge using controllable magneto-rheological dampers, *Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways, Proceedings of SPIE Conference on Smart Materials and Structures* (S.C. Liu ed), Newport Beach, California, USA, Vol. 3988, 199-206.

53. Liu, Y., Gordaninejad, F., Evrensel, C. A. and Hitchcock, G. (2001), Experimental study on fuzzy logic vibration control of a bridge using fail-safe magnetorheological fluid dampers, *Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways, Proceedings of SPIE Conference on Smart Materials and Structures* (S.C. Liu ed), Newport Beach, California, USA, Vol. 4330, 281-288.

54. Loh, C.H. and Wu, L.Y. (2002), "Application of MR dampers to base isolated system using semi-active control strategy", *Proceedings of the Ninth International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, Taipei, Taiwan, 543-548.

55. Schurter, K. and Roschke, P.N. (2001a), "Neuro-fuzzy control of structures using acceleration feedback", *Smart Materials and Structures*, Vol. 10, 770-779.

56. Schurter, K. and Roschke, P. N. (2001b), "Neuro-fuzzy control of structures using magnetorheological dampers", *Proceedings of the 2001 American Control Conference*, Washington, D.C., USA.

57. Jung, H.-J., Spencer, Jr., B.F. and Lee, I.-W. (2002), "State-of-the-art of MR damper-based control systems in civil engineering applications", *Proceedings of the US-Korea Workshop on Smart Structural Systems*, Busan, Korea.