

토목/건축 분야의 스마트제어 기술 - MR 댐퍼-기반 스마트제어 기술을 중심으로 -



정 형 조*



이 인 원**

1. 서 론

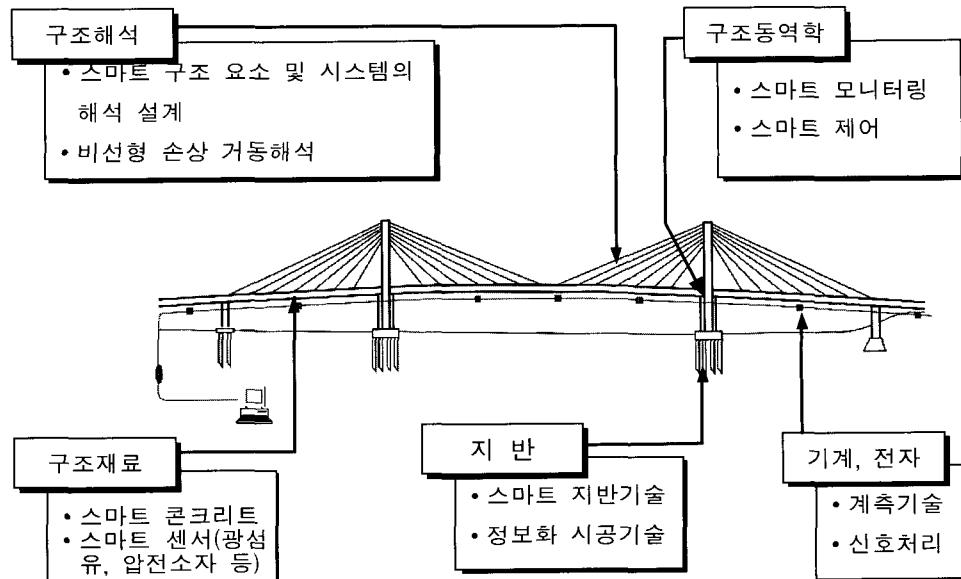
본격적으로 산업화가 시작된 1970년대 이후부터 현재까지, 교량, 터널, 댐 등과 같은 토목 구조물 및 고층 건물, 타워 등과 같은 건축 구조물이 국내에서 활발하게 건설되었다. 최근 들어 다수의 장대교량(서해대교, 영종대교, 광안대교 등)이 건설되었을 뿐만 아니라, 100층이 넘는 초고층 건물(부산 롯데월드(높이 495m))도 건설 중에 있다. 하지만, 이와 같이 30여년이라는 짧은 기간 동안에 이루어진 국내 건설 분야의 팔목할 만한 성장의 이면에는 대형 토목/건축 구조물의 붕괴(성수대교, 삼풍백화점 등) 및 조기철거(당산철교)와 같은 대형 사고 빈발로 인한 국민들의 우려 및 불신 확산이라는 그늘도 함께 자라났다. 이것은 건설 분야가 지난 수십 년 동안 착실히 내실을 쌓으며 발전하지 못하고 단기간의 성과와 실적을 얻는 데에만 치중해서 발생한 결과이다. 우리나라는 건설 강국으로 자부하면서도 대형 토목/건축 구조물의 사용연한동안의 안전성, 사용성, 내구성 등에 대한 체계적이고 적절한 대책 수립 및 연구/개발에 대한 관심과 투자가 매우 부족했고, 오히려 선진 외국의 관련 요소기술을 그대로 도입·적용하는 것을 선호하는 등 바람직하지 못한 풍토가 만연한 상황이었다. 하지만, 위에서 언급한 대형 사고 등을 경험한 이후, 국내에서도 대형 토목/건축 구조물에 대한 충분한 안전성 확보와 사용성 증대 및 유지관리

의 필요성을 뒤늦게나마 깨닫고, 계획, 설계, 시공 및 유지관리 전반에 대한 체계적이고 통합적인 새로운 개념의 건설 기술개발에 대한 관심 및 투자가 증대되고 있는 추세이다.

이미 외국의 경우에는 대형 토목/건축 구조물의 안전성, 사용성 및 경제성을 증대시킬 목적으로 스마트 구조재료, 스마트 센서, 스마트 모니터링, 스마트 제어 등의 요소기술을 포함한 “스마트구조 기술(smart structures technology)”이라는 새로운 개념의 기술이 1990년대 이후 미국, 일본 등을 중심으로 연구/개발되기 시작하였다. 스마트구조 기술을 도입한 구조물을 스마트구조물이라 부르는데, 이러한 구조물은 외부와 내부의 변화에 대한 감지, 평가, 대응 기능 중 전부 또는 일부를 가진 구조물로서, 구조물의 건전도가 지속적으로 파악되고, 과다하중에 대해 능동적으로 대처하며 사용연한 동안 건전성과 사용성이 극대화되도록 설계, 시공 및 유지관리가 이루어지는 특징을 가지게 된다.¹⁾ 토목/건축 구조물을 스마트하게 만들기 위한 스마트구조 기술은 스마트 건설재료(콘크리트의 지능화), 구조물 거동 및 건전도 모니터링을 위한 스마트센서(광섬유센서, 압전소자센서 등), 구조물 건전도 상시 모니터링 시스템 및 비파괴 검사, 사용성능 개선을 위한 진동제어 및 보수/보강, 계측 및 데이터 베이스를 활용한 정보화 시공 등에 대한 핵심요소 기술의 개발과 활용에 대한 연구가 선진국을 중심으로 활발하게 진행되고 있으며, 나아가 다른

* 세종대학교 토목환경공학과 조교수

** 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수

그림 1 스마트구조 기술의 장대교량 적용 예¹⁾

공학 분야에서 연구/개발된 관련 기술의 응용과 기존 건설 기술과의 종합화 및 체계화가 추진되고 있다. 이러한 배경에서, 스마트구조 기술은 대형 토목/건축 구조물의 효율적 설계, 시공 및 유지관리를 위한 가장 핵심적이면서 가장 완성된 형태의 구조공학분야 신기술로 부각되고 있다. 그림 1은 스마트구조 기술의 핵심 요소기술들이 어떻게 실제 대형 토목/건축 구조물에 활용되는지에 대한 예를 개략적으로 보여주고 있다.

지난 10여년 동안 선진국에서 스마트구조 기술에 대한 관심 및 투자가 증대되었던 반면에, 국내에서는 관련 요소기술에 대한 매우 기초적인 연구가 학계 중심으로 일부 진행되었을 뿐 실제 대형 구조물에의 응용을 위한 체계적인 연구는 진행되지 못하고 있었다. 향후 건설 분야에서 스마트구조 기술이 차지할 위상을 감안한다면, 다학제간의 연구를 통해 관련 핵심 요소 기술을 효과적으로 개발하고 통합화하는 작업이 매우 시급하다. 이러한 필요성을 통해 2002년 7월에 과학기술부·한국과학재단 지정 우수연구센터인『스마트 사회기반시설 연구센터』가 설립되었고, 현재 스마트구조 기술에 대한 독자적인 기술력 확보를 위해 노력하고 있다.

본 기사에서는 스마트구조 기술의 여러 핵심 요소기술 중에서도 구조물의 성능을 향상시키고 개선하기 위한 기술인 ‘스마트제어 기술’에 대한 내용을 살펴보고자 하는데, 특히 최근 토목/건축 분야에서 매우 유망한 스마트제어 기술로 주목받고 있는 ‘MR 램퍼(Magneto-

rheological fluid damper)-기반 제어 시스템’에 대한 기존 실험적 연구 및 응용 사례 중심으로 기술하고자 한다.

2. MR 텨퍼-기반 스마트제어 기술

토목/건축 공학 분야에서, 지진 및 강풍과 같은 자연 재해에 의해 발생하는 구조물의 과도한 진동을 저감시키는 문제는 매우 중요한 연구주제이다. 최근 들어, 다양한 스마트재료(압전 재료(piezoelectric materials), 형상기억합금(shape memory alloy), ER 유체(electro-rheological fluid), MR 유체(magneto-rheological fluid) 등)를 이용한 제어 기술(이하, 스마트제어 기술)이 주목을 받고 있는데, 현재까지 구조물의 진동 저감을 위해 실제 대형 토목/건축 구조물에 적용된 사례가 있는 스마트 재료는 MR 유체가 유일하다. MR 유체란 어떤 유체(물, silicon oil 등) 내에 미세하고 자성을 띤 입자를 포함시킴으로써, 평소에는 일반적인 점성 유체처럼 자유롭게 유동하다가 자기장이 가해지면 매우 짧은 시간에 입자들이 정렬을 해서 유체의 유동을 제한하고 결과적으로 항복 강도(yield strength)를 발생시키는 제어 가능한 유체(controllable fluid)를 말한다(그림 2 참조).

MR 유체를 이용하여 감쇠력을 적절히 조절할 수 있도록 만들어진 램퍼를 MR 램퍼라고 한다. MR 램퍼-기반 스마트제어 시스템의 기본 개념은 그림 3과 같이 표현할 수 있다. 그림 3에서, 제어 가력기(control actuator)인 MR 램퍼는 일반적인 능동제어 시스템의 경우와는

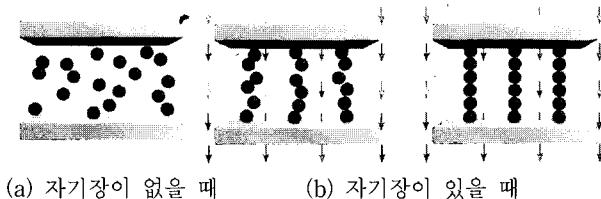


그림 2 MR 유체의 거동 메커니즘
(<http://www.rheonetic.com/>)

달리 기계적 에너지를 직접 구조물에 가하지 못하기 때문에, 스마트제어 시스템은 한정 입출력(bounded-input bounded-output) 안정도가 보장된다. MR 댐퍼는 또한 장치의 기계적인 단순성(밸브가 필요 없음), 높은 동적 범위(MR 댐퍼에 자기장을 가해줌으로써 10배 정도의 힘을 얻을 수 있음), 적은 전력 요구량(일반적으로 50 Watt 이하), 커다란 감쇠 능력, 외부 환경에 대한 뛰어난 강인성 등의 훌륭한 특징을 보유하고 있다. 따라서, MR 댐퍼-기반 스마트제어 시스템은 수동 제어 시스템과 마찬가지로 높은 신뢰성을 제공할 수 있을 뿐만 아니라, 능동제어 시스템의 장점인 뛰어난 적응성도 유지할 수 있는 특성을 보유하고 있기 때문에, 향후 매우 유망한 스마트제어 장치로 인정받고 있다.

토목/건축 분야에서는, 1990년대 중반에 미국 Spencer 교수 연구팀에 의해 MR 댐퍼가 도입된 이후로, MR 댐퍼를 기반으로 하는 스마트제어 시스템에 대한 많은 연구가 수행되고 있다. 토목/건축 구조물에 적용하기 적합한 용량의 MR 댐퍼에 대한 설계 및 제작에 대한 연구도 수행되어, 그림 4(b), (c)와 같은 대용량 내진용 MR 댐퍼도 개발되었다.

다음 장에는 토목/건축 분야에서 현재까지 수행된 MR 댐퍼-기반 스마트제어 시스템에 대한 실험적 연구에 대해서 실증 대상 구조물 중심으로 분류된 내용이 기술되어 있고, 3장에는 바람이나 지진으로 인한 구조물의 진동을 저감시키기 위해 MR 댐퍼를 실제 토목/건축 구조물에 적용한 용용 사례에 대한 내용이 설명되어 있다.

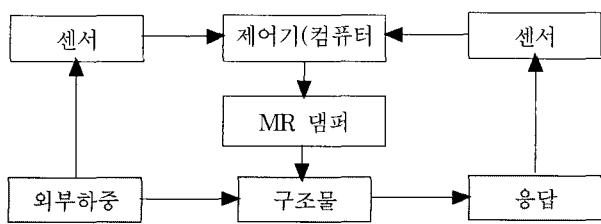


그림 3 MR 댐퍼-기반 스마트제어 시스템의 블록 다이아그램

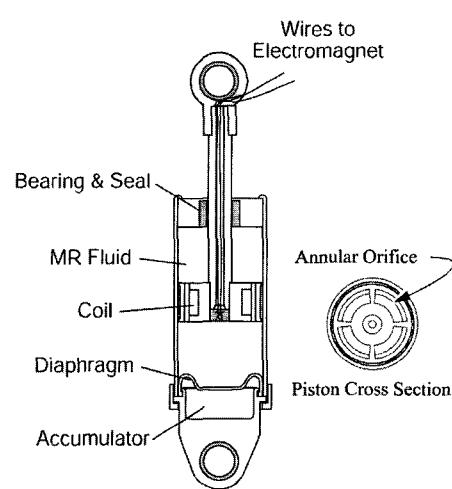
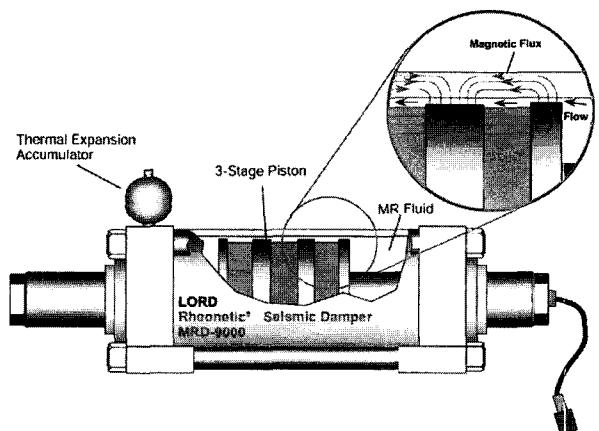
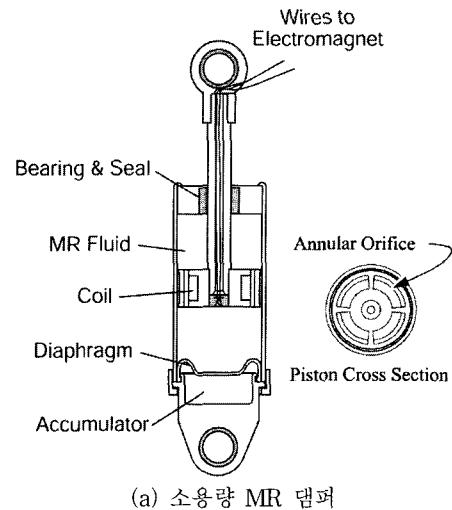


그림 4 MR 댐퍼의 개략도²⁾

3. MR 댐퍼-기반 스마트제어 기술에 대한 실험적 연구

1990년대 중반 이래로, MR 댐퍼-기반 스마트제어 기술에 대한 매우 다양한 연구가 수행되었다. MR 댐

퍼는 본질적으로 비선형(非線型) 특성을 가지고 있기 때문에, MR 댐퍼의 성능을 충분히 발휘하게 하고 또한 실제 구조물에 적용 할 수 있도록 개발하는 것은 매우 중요하면서도 어려운 문제이다. 지금까지 많은 이론적 연구를 통해 MR 댐퍼를 이용한 다양한 제어 시스템이 제안되고 성능이 수치적으로 검증되었지만, 이러한 결과가 확실히 인정을 받기 위해서는 실험적 검증 단계가 반드시 필요하다. 따라서, 본 기사에서는 수치 해석적 검증에서 한 단계 더 나아가서 실험적으로 MR 댐퍼-기반 스마트제어 시스템의 성능을 보여준 기존 연구에 대한 내용만을 설명하였다. 이론적 연구에 대한 내용을 살펴보고 싶다면 참고문헌 [2]를 참고하기 바란다. 국내의 관련 기술 연구동향을 살펴보면, MR 댐퍼를 이용한 제어 시스템에 대한 이론적 연구는 학계를 중심으로 어느 정도 진행되고 있지만 실험적 연구는 현재까지 전무한 상태이다.

3.1 미국 Spencer 교수 연구팀의 초기 연구

미국 Univ. of Illinois의 Spencer 교수(당시 Univ. of Notre Dame 소속) 연구팀은 1990년대 중반 MR 댐퍼 기술을 토목/건축 분야에 도입하고 여러가지 선도적인 연구를 수행하였다. 먼저, 현재까지 MR 댐퍼-기반 스마트제어 시스템의 제어 알고리듬으로 가장 널리 쓰이고 있는 가속도 피드백(acceleration feedback)에 기반을 둔 clipped-optimal control algorithm을 제안하였고, 이를 3층 축소건물모형을 이용하여 이론적·실험적으로 검증하였다.^{4)~6)} 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 댐퍼에 입력될 0 또는 최대값의 두 단계 명령 전압(command voltage)을 결정하게 된다.

3.2 건물에 대한 축소모형 실험

미국 Washington Univ.의 Dyke 교수는 Spencer 교수 연구팀의 초기 연구과정에 주도적으로 참여하였고, 그 후에도 독자적으로 다수의 이론적·실험적 연구를 진행하였다. Yi et al.^{7),8)}은 6층 축소건물모형의 1층과 2층에 각각 MR 댐퍼를 설치하고, clipped optimal control algorithm 및 Lyapunov 안정도 이론에 기반을 둔 제어

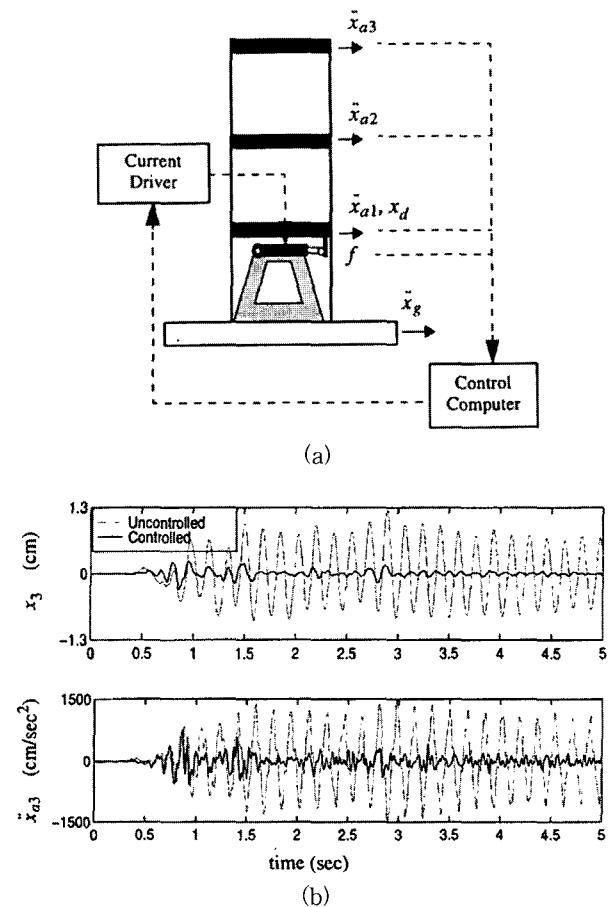


그림 5 3층 축소건물모형을 이용한 Spencer 교수 연구팀의 초기 연구 결과

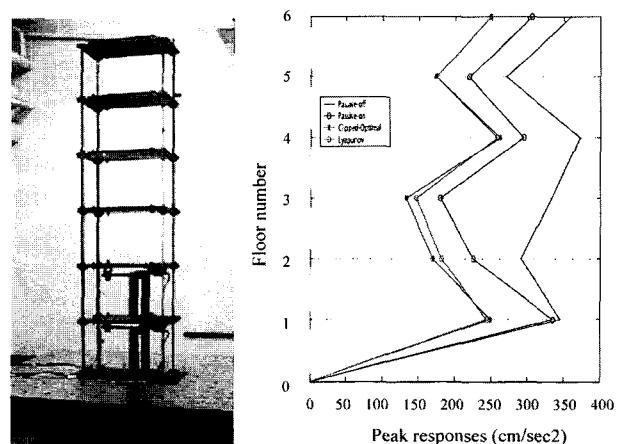


그림 6 6층 축소건물모형의 내진 성능 검증 실험

의 효과를 실험적으로 검증하였다(그림 6참조). 또한, Yoshida et al.⁹⁾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 댐

퍼를 사용한 스마트제어 시스템의 성능이 수동제어 시스템보다 뛰어남을 입증하였다.

건물에 대한 또 다른 형태의 실험적 연구로는, 인접한 두 개의 건물을 MR 댐퍼를 이용해 연결하는 내용이다. Christenson¹⁰⁾과 Christenson et al.¹¹⁾은 서로 근접한 고층 건물들을 MR 댐퍼를 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. Ni et al.¹²⁾은 MR 댐퍼를 사용한 근접한 건물 구조물의 지진 응답을 제어하기 위한 추계론적 최적 제어 기법을 실험적으로 연구하였다. 그들은 이를 위해 12층과 8층으로 구성되고 1 : 15로 축소된 건물모형을 제작하였고, 모든 시험에서 스마트제어 시스템이 수동제어 시스템보다 구조물의 응답을 더 많이 저감시킴을 확인하였다(그림 7 참조).

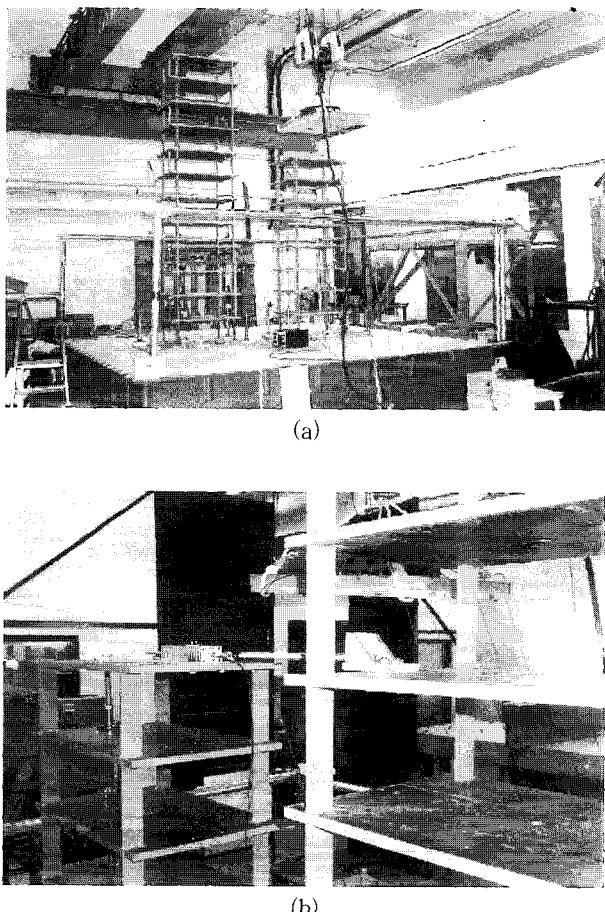


그림 7 인접한 두 건물에 MR 댐퍼를 연결한 시스템에 대한 실험

3.3 기초격리된 건물에 대한 축소모형 실험

Johnson et al.¹³⁾은 건물에 대한 지진 격리 시스템(seismic isolation system)에 clipped-optimal control algorithm과 MR 댐퍼를 이용한 스마트제어 기법을 적용하기 위한 초기 연구를 수행하였고, Ramallo et al.¹⁴⁾은 같은 문제에 대표적인 지진 격리 장치인 납-고무 받침(lead rubber bearing(LRB))을 고려하였다. Yoshioka et al.¹⁵⁾는 그림 8과 같은 실험을 통해 MR 댐퍼가 장착된 지진 격리 시스템의 효용성을 실험적으로 검증하였다. 그림 8(b)에서 볼 수 있듯이, 스마트 제어의 성능이 최적으로 고려된 수동형 댐퍼의 성능보다 우수하였다.

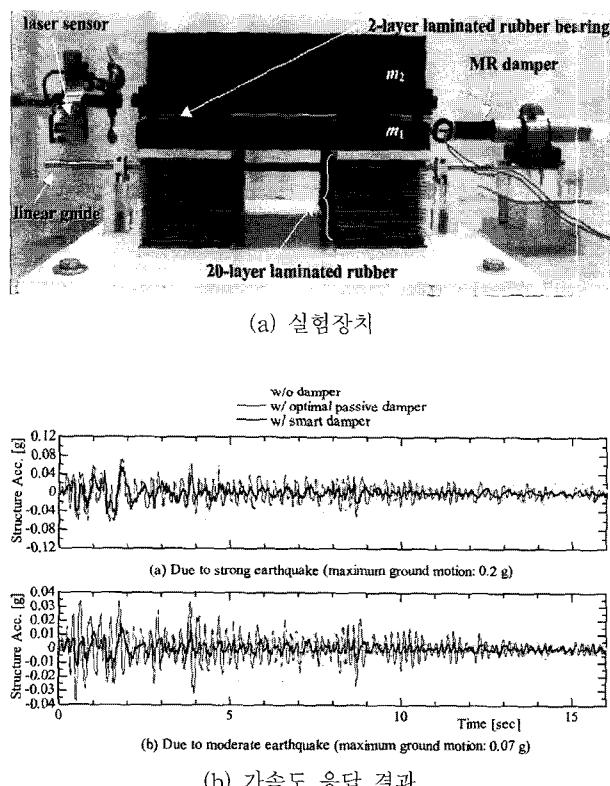


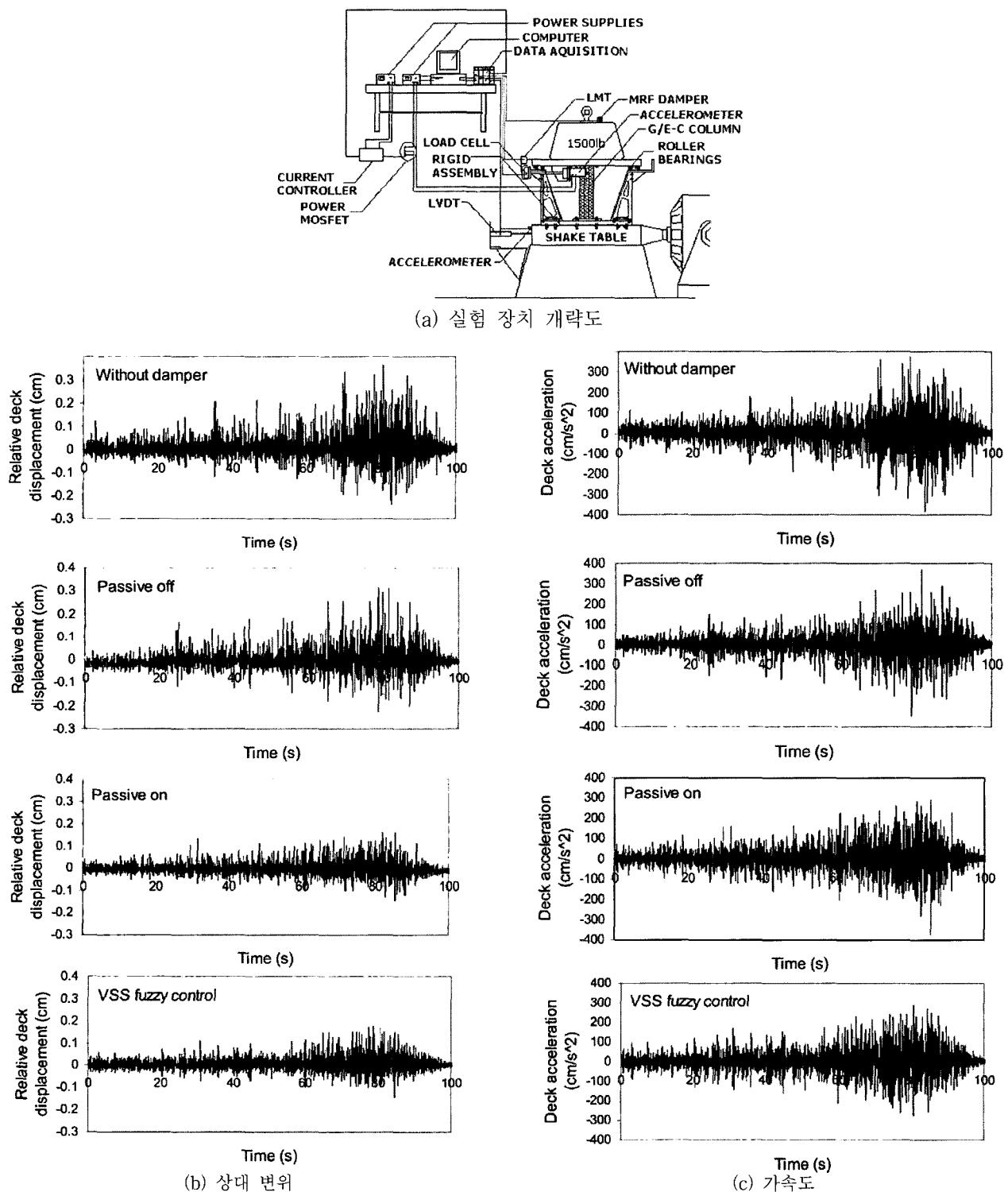
그림 8 MR 댐퍼를 장착한 지진 격리 시스템

Sahasrabudhe and Nagarajaiah¹⁶⁾는 near-fault 형태의 지진 하중을 받는 미끄럼 베어링(sliding bearing)이 장착된 건물에 대한 MR 댐퍼의 제어 효과에 대한 연구를 수행하였다. 그들은 1/5로 축소된 2층 건물 모델에 MR 댐퍼를 부착하고 실시간 적용이 가능한 Lyapunov 제어기를 이용하여 MR 댐퍼를 이용한 스마트제어 시스템의 성능을 확인하기 위한 실험을 수행하였다.

3.4 교량에 대한 축소모형 실험

Wang and Gordaninejad^{17),18)}와 Liu et al.^{19),20)}은 MR 댐퍼가 부착된 2경간 축소 교량 모델 (1:12)에 Lyapunov 기반 제어 알고리듬과 퍼지 논리에 기반을 둔 페루프 제어 알고리듬을 각각 적용하여 진동대 실험을 수행하

였다. 그들은 교량 모델의 진동 감소에 대한 MR 댐퍼-기반 스마트제어 시스템의 효과를 실험을 통해 검증하였다(그림 9(a) 참조). 특히, Liu et al.은 제안된 스마트 제어 시스템이 수동제어 시스템보다 파워는 훨씬 적게 사용하면서도 상판의 상대변위는 크게 감소시키고 있음을 실험을 통해 검증하였다(그림 9(b) 참조).



3.5 케이블에 대한 축소모형실험

Johnson et al.²¹⁾은 clipped-optimal control algorithm과 MR 댐퍼를 사용하여 풍우(風雨)에 의해 케이블에 발생하는 과도한 진동을 감소시키기 위한 해석적인 연구를 수행하였다. 또한, Johnson et al.²²⁾은 케이블의 처짐 효과(sag effect)를 이 문제에 고려하여 보다 실제적인 문제에 대한 이론적 연구를 수행하였다. 이러한 기존 연구를 바탕으로, Christenson et al.²³⁾과 Christenson¹⁰⁾은 케이블에 대한 축소모형을 제작하고, 다양한 실험을 통해 케이블 진동 문제에 대한 MR 댐퍼-기반 스마트 제어 방법의 성능을 검증하였다(그림 10 참조). 그림 10(b)에서 볼 수 있듯이, 실험 결과와 수치해석 결과가 매우 비슷하고, 또한 스마트제어의 성능이 수동제어의 성능 보다 우수하였다.



(a) 실험장치

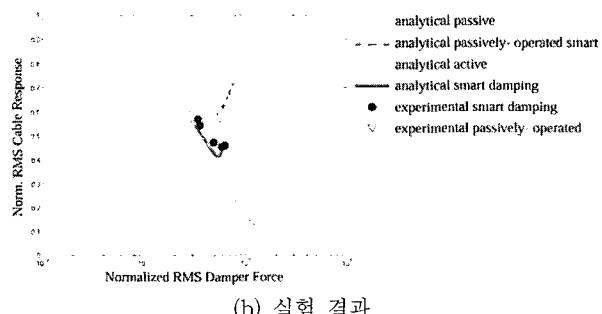


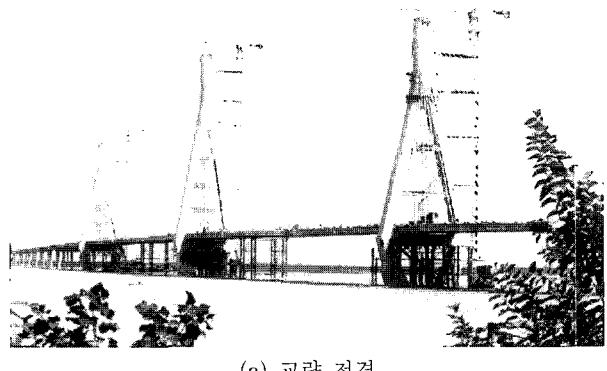
그림 10 MR 댐퍼가 설치된 케이블 축소모형 실험

4. 실제 응용 사례

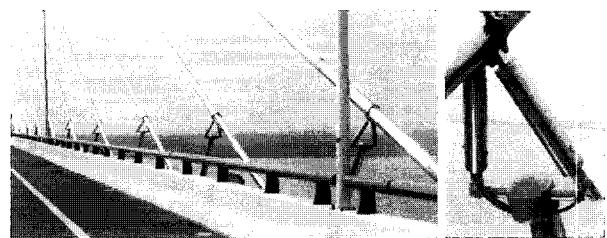
이번 장에서는 MR 댐퍼-기반 스마트제어 기술이 토목/건축 구조물에 실제로 적용된 사례를 살펴보도록

하겠다. 1990년대 중반 이후 많은 연구를 통해 MR 댐퍼의 효용성이 이론적·실험적으로 입증되었고, 이러한 기존 연구를 기반으로 2001년에 MR 댐퍼가 교량과 건물에 바람 제진용과 내진용으로 각각 적용되었다. 중국 후난성의 Dongting Lake 교량에 적용된 제진용 소형 MR 댐퍼와 일본의 과학미래관에 내진용으로 적용된 대용량 MR 댐퍼가 토목/건축 분야의 세계 최초 적용 사례이다.

중국의 Dongting Lake 교량은 그림 11(a)에서 보는 바와 같이 사장교 형태이며, 케이블의 진동을 줄이기 위해 각 케이블마다 2개의 MR 댐퍼를 설치하였다. 총 156개의 케이블에 312개의 MR 댐퍼가 설치되었다(그림 11(c) 참조). 그림 12는 MR 댐퍼를 설치한 케이블에서 풍우진동이 현저하게 감소하고 있음을 보여주고 있다. 이러한 세계 최초의 실제 적용 프로젝트를 위해, 해석적인 시험 및 실험실 규모의 실험뿐만 아니라 자세한 현장 시험이 수차례 수행되었다. 이러한 프로젝트의 기술적인 지원은 중국의 Central South University(Z. Q. Chen), Hong Kong Polytechnic University(J.M. Ko and Y. Q. Ni) 및 미국의 B.F. Spencer, Jr.가 공동으로 수행하였다. 최초로 적용된 MR 댐퍼-기반 스마트제어 시스템의 성능에 고무되어, 중국에서는 2003년 10월에 Binzhou Yellow River 교량에 제진용 소형 MR 댐퍼가 추가로 설치 완료될 예정이다. 또한, 세계에서 가장 긴 사장교로 현재 홍콩에서 시공중인 Stonecutter 교량의 케이블



(a) 교량 전경



(b) MR 댐퍼 적용

그림 11 중국 후난성의 Dongting Lake 교량

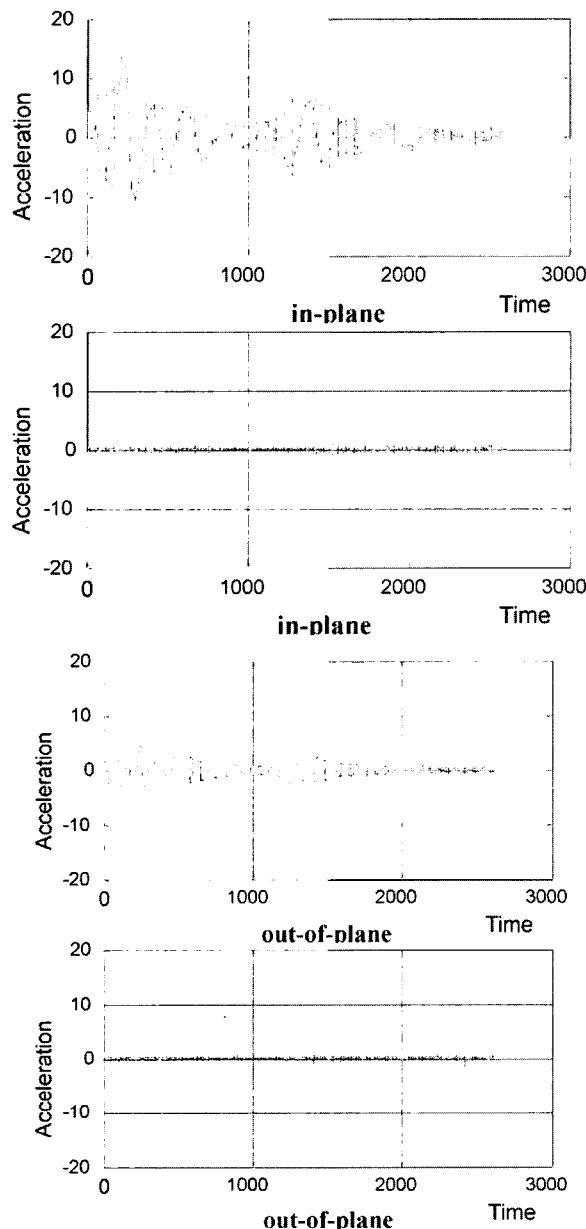
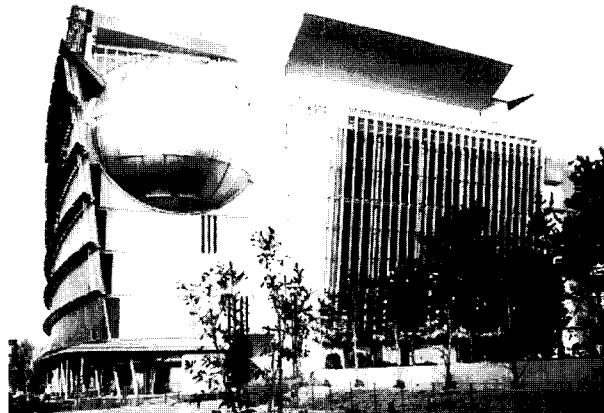


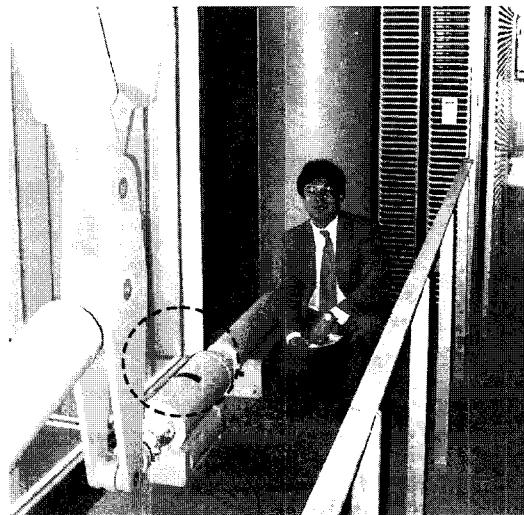
그림 12 Dongting Lake 교량에서 케이블의 가속도 시간응답

진동제어를 위해서도 MR 댐퍼를 적용하기 위해서 타당성 연구가 수행 중이다.²⁴⁾

일본의 과학미래관은 지진에 대비하기 위해서 30톤 규모의 MR 댐퍼 2개를 각각 3층과 5층에 설치하였다. 이 건물이 세계 최초로 MR 댐퍼를 실제 건축물에 적용한 사례이다. 적용된 대용량 MR 댐퍼는 미국 Lord Corporation의 MR 유체를 이용하였고, 일본의 Sanwa Tekki Corporation에서 직접 설계/제작되었다. 최근에는, 일본에서 거주용 건축물에 최고의 내진 성능을 제공하기 위하여 적층고무받침, 납 댐퍼, 접성 댐퍼와 함께 40톤 규모의 MR 댐퍼(Sanwa Tekki Corporation 설계 및 제작)를 적용한 사례도 보고되었다.²⁵⁾



(a) 건물 전경



(b) MR 댐퍼의 설치

그림 13 일본의 과학미래관

5. 결 론

본 기사에서는 지진이나 강풍과 같은 자연 재해에 의해 발생하는 대형 토목/건축 구조물의 과도한 진동을 저감시키기 위해 연구/개발되고 특히 최근 들어 대형 구조물에 실제로 적용되기 시작한 대표적인 스마트 제어 기술인 MR 댐퍼-기반 제어 시스템에 대하여 설명하였다. 최근 10여년 동안 많은 연구자들이 수행한 다양한 이론적·실험적 연구 중에서, 대표적인 실험적 연구만을 간략하게 기술하였고, 제어 시스템을 실제 토목/건축 구조물에 응용한 사례도 소개하였다. 이러한 기존 연구 및 응용 사례 검토를 통해, MR 댐퍼-기반 스마트제어 시스템이 토목/건축 구조물의 자연 재해에 대한 방재 수단으로 매우 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다. 본 기사에서는 다뤄지지 않았지만, MR 댐퍼-기반 스마트제어 기술은 지진, 강풍과 같은 자연 재

해뿐만 아니라 과도한 차량하중이나 군중하중에 대해서도 뛰어난 성능을 보인다.

현재 미국과 일본을 중심으로 MR 댐퍼를 포함한 다양한 스마트제어 기술이 대형 토목/건축 구조물의 성능 향상을 위해 연구/개발되고 있는 추세이고, 가까운 미래에 실제 구조물에 더욱 활발하게 적용될 것으로 예상된다. 국내에서도 이에 대한 보다 적극적인 연구/개발을 통해 향후 토목/건축 분야의 핵심 요소기술이 될 스마트제어 기술에 대한 독자적인 기술력을 확보하는 것이 매우 중요하다. 이는 국내 관련 학계의 국제적인 위상 제고와 산업계의 국제 경쟁력 확보에 커다란 기여를 할 것이다.

감사의 글

본 기사는 과학기술부·한국과학재단 지정 우수연구센터인 『스마트 사회기반시설 연구센터』의 지원 및 미국 University of Illinois at Urbana-Champaign의 Billie F. Spencer, Jr. 교수와 Hong Kong Polytechnic University의 Yi Qing Ni 교수의 도움으로 작성되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 스마트 사회기반시설 연구센터, “1차년도 상세연구 보고서”, 스마트 사회기반시설 연구센터, Vol. 1, 한국과학기술원, 2003
2. Jung, H.-J., Spencer, Jr., B.F. and Lee, I.-W., “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, 2002
3. Yang, G., “Large-scale magnetorheological fluid damper for vibration mitigation: modeling, testing and control”, *Ph.D. Dissertation*, University of Notre Dame, Indiana, USA, 2001
4. Dyke, S. J., Spencer, Jr., B. F., Sain, M. K. and Carlson, J. D., “Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction”, *Smart Materials and Structures*, Vol. 5, 1996, pp. 565~575
5. Dyke, S. J., Spencer, Jr., B. F., Sain, M. K. and Carlson, J. D., “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, 1996, pp.291~296
6. Dyke, S. J., Spencer, Jr., B. F., Sain, M. K. and Carlson, J. D., “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, 1998, pp.693~703
7. Dyke, S. J. and Spencer, Jr., B. F., “Seismic response control using multiple MR dampers”, *Proceedings of the 2nd International Workshop on Structural Control*, Hong Kong, 1996, pp.163~173
8. Yi, F., Dyke, S. J., Frech, S. and Carlson, J. D., “Investigation of magnetorheological dampers for earthquake hazard mitigation”, *Proceedings of the 2nd World Conference on Structural Control*, Kyoto, Japan, Vol. 1, 1998, pp.349~358
9. Yi, F., Dyke, S. J., Caicedo, J. M. and Carlson, J. D., “Experimental verification of multi-input seismic control strategies for smart dampers”, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 127, No. 11, 2001, pp.1152~1164
10. Yoshida, O., Dyke, S. J., Giacosa, L. M. and Truman, K. Z., “Torsional response control of asymmetric buildings using smart dampers”, *Proceedings of the 15th ASCE Engineering Mechanics Conference*, New York, NY, USA, 2002
11. Christenson, R. E., “Semiactive control of civil structures for natural hazard mitigation: analytical and experimental studies,” *Ph.D. dissertation*, University of Notre Dame, Indiana, USA, 2001
12. Christenson, R. E. and Spencer, Jr., B. F., “Coupled building control using ‘smart’ dampers”, *Proceedings of the 13th ASCE Engineering Mechanics Conference*, Baltimore, Maryland, USA, CD-ROM, 1999
13. Ni, Y. Q., Liu, H. J. and Ko, J. M., “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, 2002

13. Johnson, E. A., Ramallo, J. C., Spencer, Jr., B. F. and Sain, M. K., "Intelligent base isolation systems," *Proceedings of the Second World Conference on Structural Control(2WCSC)*, Kyoto, Japan, Vol. 1, 1998, pp.367~376
14. Ramallo, J. C., Johnson, E. A., Spencer, Jr., B. F. and Sain, M. K., "Smart' base isolation systems", *Proceedings of the Advanced Technology in Structural Engineering, Structures Congress*, Philadelphia, Pennsylvania, USA, CD-ROM, 2000
15. Yoshioka, H., Ramallo, J. C. and Spencer, Jr., B. F., "Smart' base isolation strategies employing magnetorheological dampers", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 128, No. 5, 2002, pp.540~551
16. Sahasrabudhe, S. and Nagarajaiah, S., "Semiactive control of sliding isolated buildings with MR dampers", *Proceedings of 2001 Mechanics and Materials Conference*, San Diego, California, USA, 2001
17. Wang, X. and Gordaninejad, F., "Lyapunov-based control of a bridge using magnetorheological fluid dampers", *Proceedings of the 8th International Conference on ER/MR Fluids*, 2001
18. Wang, X. and Gordaninejad, F., "Lyapunov-based control of a bridge using magnetorheological fluid dampers", *Journal of Intelligent Material System and Structures*, Vol. 13, No. 7, 2002, pp.415~419
19. Liu, Y., Gordaninejad, F., Evrensel, C. A., and Wang, X., "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, 2000, pp.199~206
20. Liu, Y., Gordaninejad, F., Evrensel, C. A. and Hitchcock, G., "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, 2001, pp.281~288
21. Johnson, E. A., Baker, G. A., Spencer, Jr., B. F. and Fujino, Y., "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, 2000, pp.207~216
22. Johnson, E. A., Christenson, R.E. and Spencer, Jr., B. F., "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, 2001
23. Christenson, R. E., Spencer, Jr., B. F. and Johnson, E. A., "Experimental verification of semiactive damping of stay cables", *Proceedings of the 2001 American Control Conference*, Arlington, Virginia, USA, 2001, pp.5058~5063
24. Spencer, Jr., B. F. and Nagarajaiah, S., "State of the art of structural control", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 7, 2003, pp.845~856.
25. Fujitani, H., et al., "Development of 400kN magnetorheological damper for a real base-isolated building", *Proceedings of SPIE Conference on Smart Structures and Materials*, Vol. 5057, 2003