

MR댐퍼를 기반으로 하는 스마트 수동제어 시스템

Smart Passive System Based on MR Damper

조상원* · 이헌재** · 오주원*** · 이인원****

Cho, Sang Won · Lee, Heon Jae · Oh, Ju Won · Lee, In Won

1. 서 론

자기유변유체 댐퍼(Magnetorheological Fluid Damper, 이하 MR댐퍼)는 반능동 제어장치의 일종으로써, 자기유변유체를 이용하여 댐퍼의 점성력을 변화시킨다. 1990년 중반에 미국 University of Illinois at Urbana Champaign의 B. F. Spencer Jr. 교수가 MR댐퍼를 처음으로 토목분야에 소개한 이래로, MR댐퍼는 배터리 수준의 소규모 전력사용과 작동의 신뢰성 및 내구성 그리고 경제성 등의 이유로 근래에 활발하게 연구되고 주목을 받아왔다. MR댐퍼 제어시스템은 2001년도에 중국의 사장교인 Dongting Lake Bridge와 일본의 Nihon-Kagaku-Miraikan 빌딩에 진동제어를 위해 설치되었다. 이는 실험실 규모를 제외하고 실제 구조물에 적용된 세계최초의 적용 예이다.

MR댐퍼를 사용하여 구조물의 진동을 줄이기 위해서는 배터리 규모의 전원 및 구조물의 응답을 측정하는 센서 그리고 센서 신호로부터 제어 명령을 결정하는 제어기 등을 포함하는 제어시스템이 필요하다. 앞에서 말한 여러 장점에도 불구하고 사장교의 케이블 진동제어나 초고층 빌딩의 진동제어를 위해 많은 양의 MR댐퍼를 사용할 경우, 전력공급 및 센서 그리고 제어기 등을 포함하는 제어 시스템을 구축하고 유지 관리하는 것은 많은 노력을 필요로 한다.

따라서 본 논문에서는 기존 MR댐퍼의 제어시스템을 대체하기 위하여, 전자기유도 시스템(Electromagnetic Induction System, 이하 EMI시스템)을 구비한 MR댐퍼를 제안하였다. EMI시스템은 솔레노이드 코일과 영구자석으로 구성되며, 패러데이의 전자기 유도법칙(Reitz et. al. 1993)에 의해 MR댐퍼의 왕복운동을 전기에너지로 변환한다. 이렇게 생성된 전기에너지는 다시 MR댐퍼의 점성을 변화시키는 전원으로 사용되며, 생성되는 전기에너지의 강도는 MR댐퍼의 왕복운동 속도 및 영구자석의 세기 그리고 솔레노이드 코일의 회전수에 비례한다. 또한 MR댐퍼의 왕복운동이 빠르면 강한 전류가 유도되고, 왕복운동이 느리면 약한 전류가 유도된다. 따라서 MR댐퍼에 가해지는 하중의 강도에 따라 MR댐퍼의 점성이 변화한다. 이러한 EMI 시스템을 구비한 MR댐퍼는 전력 및 센서 그리고 제어기를 필요로 하지 않는다. 이러한 간단한 구조는 EMI 시스템을 구비한 MR댐퍼를 사용하는 가장 큰 장점 중에 하나이다.

EMI시스템에 관한 기존 기술로써는, 자동차 엔진 마운트의 진동제어를 위한 대한민국 특허(등록번호 2000-004066)과 Electrorheological 댐퍼의 진동제어를 위한 일본 특허(등록번호 2-145337)이 있으며, 본 연구진의 토목구조물의 적용을 위한 대한민국 특허(등록번호 0416398)가 있다.

본 논문에서는 EMI시스템을 구비한 MR댐퍼의 토목구조물에 대한 적용성을 평가하기 위한 연구를 수행하였다. EMI시스템을 구비한 MR댐퍼의 성능을 비교하기 위해서, 먼저 EMI시스템의 설계변수 설정과정을 소개하고, 수치해석을 통해서, 기존 MR댐퍼 시스템과의 효율성을 비교하였다. 기존 MR댐퍼 시스템은 Clipped-Optimal 제어이론을 사용하였다.

2. EMI시스템을 구비한 MR댐퍼

* 한국과학기술원 건설환경공학과 박사후 연수과정 · 공학박사 · E-mail: s.w.cho@kaist.ac.kr - 발표자
 ** 한국과학기술원 건설환경공학과 박사과정 · 공학석사 · E-mail: hjung@sejong.ac.kr
 *** 정회원 · 한남대학교 토목환경공학과 교수 · 공학박사 · E-mail: ohjw@mail.hannam.ac.kr
 **** 정회원 · 한국과학기술원 건설환경공학과 교수 · 공학박사 · E-mail: iwlee@kaist.ac.kr

Lord Corporation가 Dyke등(1996a)이 사용한 MR댐퍼 시제품을 통해서, MR댐퍼의 개략적인 구조를 나타내었다. 그림 1에서와 같이, 자기장이 피스톤 머리 부분에 의한 전자석 부분에 의해 발생한다. 전자석에 사용되는 전류는 외부의 배터리에 의해 공급된다. 이 전류는 제어 명령을 결정하는 제어기에 의해 조정되며, 결과적으로 MR유체의 점성을 변화시킨다. 따라서 MR댐퍼를 이용하여 구조물의 응답을 감소시키기 위해서는, 전원, 제어기, 그리고 센서로 이루어진 제어시스템이 필요하다. 이에 반해서 그림2는 영구자석과 솔레노이드 코일로 구성된 EMI시스템을 구비한 MR댐퍼를 나타낸다. EMI시스템은 MR댐퍼 피스톤의 왕복운동에 의한 운동에너지를 패러데이의 전자기 유도법칙에 따라 전기에너지로 변환시킨다. 즉 그림2에서 영구자석과 코일2의 상대운동에 의해 유도된 전류는 코일1에 공급되어 자기장을 발생시키며, MR댐퍼의 점성을 변화시키기 위해 사용된다. 따라서 식(1)과 같은 패러데이의 법칙에 따라서, 영구자석과 코일2의 상대운동이 빠르면 강한 전류가 코일1에 유도되고, 반대의 경우에는 약한 전류가 유도된다.

$$\epsilon = -NA \frac{dB}{dt} \quad (1)$$

여기서 ϵ 는 볼트(V)단위를 갖는 유도기전력이며, N 은 코일이 감긴 회전수, B 는 자기장의 세기, A 는 단면적이다.

이러한 원리에 의해, EMI시스템을 구비한 MR댐퍼는 전원과 센서 없이 독립적으로 작동하여 구조물의 응답을 감소시킨다. 그러므로 위와 같이 간단한 EMI시스템은 기존의 MR댐퍼 제어시스템을 대체할 수 있다.

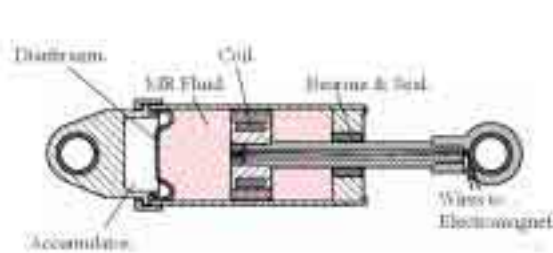


그림 1. 기존 MR댐퍼의 개략도

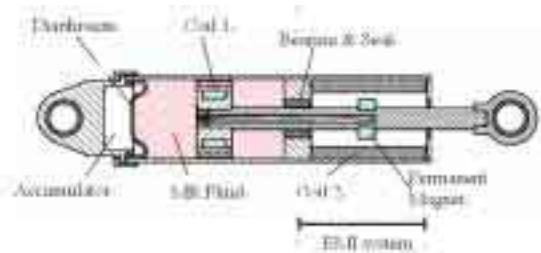


그림 2. EMI시스템을 구비한 MR댐퍼의 개략도

3. 해석모델과 설계

3.1 해석모델

EMI시스템의 성능 평가는 수치해석을 통해 이루어진다. 수치해석의 직접적인 비교를 위해서, Dyke등(1996a)이 수치해석에서 사용하였던, 3층짜리 전단빌딩을 사용하였다. 이 빌딩에는 1층에 한 개의 MR댐퍼가 사용된다. Dyke등이 사용한 기존 MR댐퍼시스템과 제안된 EMI시스템을 사용한 MR댐퍼의 성능이 수치해석을 통해 비교된다.

구조물의 지배방정식은 식(2)와 같다.

$$\dot{z} = Az + Bf + E\ddot{x}_g \quad (2)$$

여기서 \ddot{x}_g 는 1차원 지진가속도이고, f 는 MR댐퍼의 제어력, 그리고 z 는 상태벡터이다. 제어력 f 에 관한 식들은 스펜서등(1997a)의 논문에 제시되어 있다.

3.2 EMI시스템의 설계

패러데이의 법칙에 따라, 유도되는 기전력의 양은 코일의 회전수와 자기장 Flux의 변화량에 비례한다. 따라서 영구자석의 세기가 일정하다면, 유도기전력의 양은 솔레노이드 코일의 회전수로 조절할 수 있다. 그러므로 EMI시스템의 성능을 발휘하기 위해서는 설계과정에서 EMI시스템이 사용되는 구조물에 적합하도록 솔레노이드 코일의 회전수를 결정해야 한다. 이를 위해서, 본 연구에서는 두 가지 계수, 즉 각 층의 최대 가속도의 합인 S_a 와 각 층의 최대 층간변위의 합인 S_i 를 사용하였다. S_a 와 S_i 모두 비제어시의 최대값으로 각각 정규화하여 나타내었다. 코일의 회전수를 결정하기 위하여, El Centro, Hachinohe, Kobe지진에 대해서, S_a 와

S_i 각각을 ,최대응답 접근법(박규식 등 2003)으로 결정하였다.

그림3(a)는 각각의 지진에 대한 S_a 의 변화를 나타내고 그림3(b)는 그림3(a)의 최대 응답들의 포락선을 나타낸다. 그림3(b)로부터, 화살표로 표시된, 포락선의 최저점에서의 코일 회전수를 최적회전수라 할 수 있다. 그림4는 S_i 에 관한 것으로서, 내용은 그림3과 동일하다. 따라서 그림3과 그림4로부터, 3층짜리 전단빌딩에 적합한 두 가지 코일회전 수 값을 결정할 수 있으며, 그 값은 각각 2.16×10^4 와 2.6×10^4 (turns/m)이다. 또한 전체적인 구조물의 응답가속도를 줄이기 위해서 변수 S_a 로부터 설계된 EMI시스템을 EMI_{ac} , 그리고 전체적인 구조물의 층간변위를 줄이기 위해서 변수 S_i 로부터 설계된 EMI시스템을 EMI_{dr} 이라 한다.

성능의 비교를 위해서, Clipped-Optimal 제어 방식(Dyke 등 1996a,b)을 사용하는 기존의 MR댐퍼시스템을 사용하였다. 이를 위해 두 가지 가중계수를 사용하였으며, S_a 에 대해서 $q_a=5.0 \times 10^{-13}$, $q_i=1.0 \times 10^{-5}$ 이고 S_i 에 대해서는 $q_a=5.0 \times 10^{-15}$, $q_i=5.0 \times 10^{-6}$ 를 사용하였다. 또한 전체적인 구조물의 응답가속도를 줄이기 위해서 변수 S_a 로부터 설계된 Cipped-Optimal 제어를 CO_{ac} , 그리고 전체적인 구조물의 층간변위를 줄이기 위해서 변수 S_i 로부터 설계된 Cipped-Optimal 제어를 CO_{dr} 이라 한다.

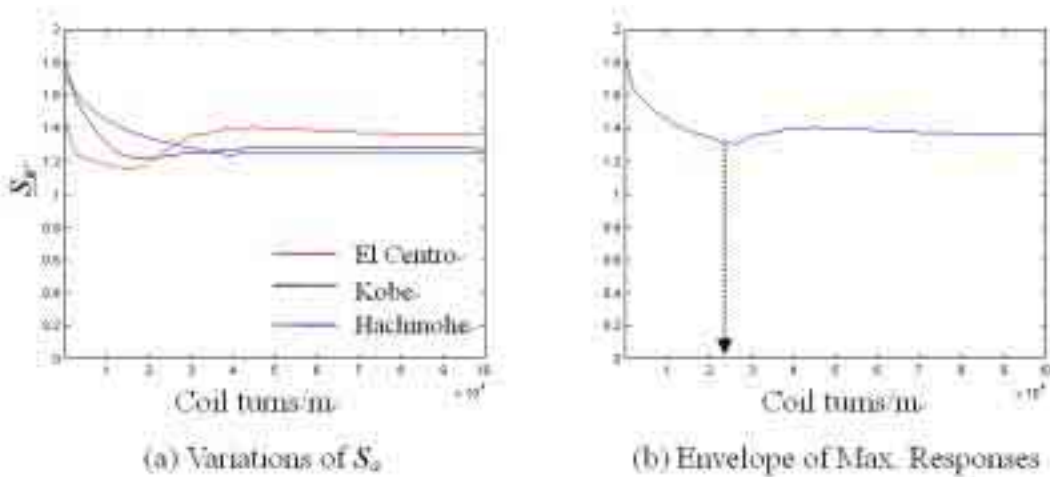


그림 3. 세 가지 지진에 대한 S_a 를 이용한 EMI시스템 설계

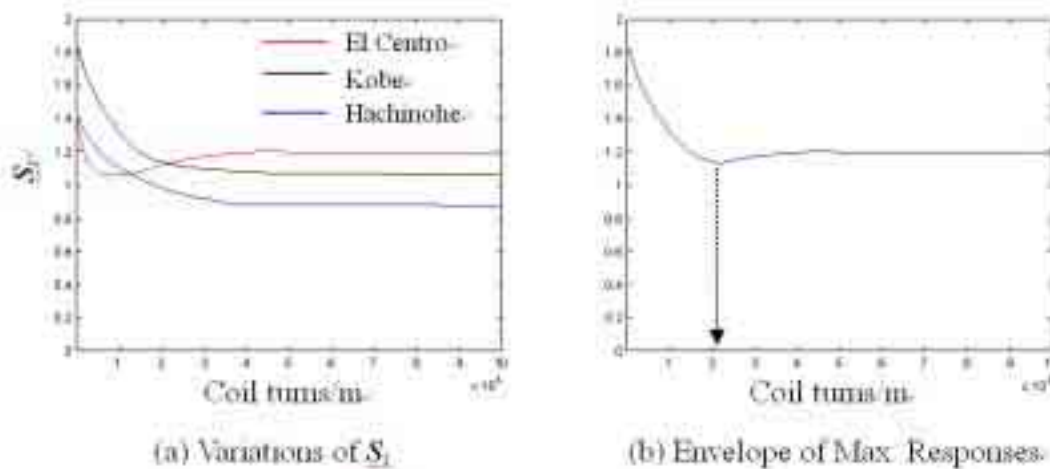


그림 4. 세 가지 지진에 대한 S_i 를 이용한 EMI시스템 설계

4. 수치해석 결과

제안된 EMI시스템을 구비한 MR댐퍼의 효율성을 검증하기 위해서 4개의 역사지진을 입력지진으로 사용하여 수치해석을 수행하였다. 사용된 역사지진은 El Centro, Hachinohe, Kobe 그리고 Northridge 지진이다. Northridge지진은 설계단계에서 고려하지 않았으나, EMI시스템과 Clipped-Optimal 제어기의 설계의 적절성을 검증하기 위해 포함하였다. 제안된 EMI시스템의 수치해석 결과들을 기존의 Clipped-Optimal 제어시스템과 제2세대 선형 제어 벤치마크 문제(스펜서 등 1997b)에서 사용된 평가기준에 의해 비교하였다. 첫 번째 평가 척도는 정규화된 최대 가속도이고 두 번째 척도는 층간변위로서 다음 식과 같다.

$$J_1 = \max_{t, i} \left(\frac{|\ddot{x}_{ai}(t)|}{\ddot{x}_a^{\max}} \right), \quad J_2 = \max_{t, i} \left(\frac{|d_i(t)|}{d_n^{\max}} \right) \quad (3)$$

여기서 $\ddot{x}_{ai}(t)$ 는 i 번째 층의 절대 가속도, \ddot{x}_a^{\max} 는 비제어시의 최고 가속도, $d_i(t)$ 는 층간변위 그리고 d_n^{\max} 는 비제어시의 응답으로 정규화된 최대 층간변위이다.

그림5는 El Centro지진 시에 MR댐퍼가 설치되어 있는 1층에서의 속도와 EMI시스템에 의해 유도되는 전압을 나타낸다. El Centro, Hachinohe지진과 같은 중간 규모의 지진보다 Kobe, Northridge지진과 같은 강진 시에, MR댐퍼가 설치되어 있는 첫 번째 층의 응답속도가 크다. 마찬가지로 패러데이의 전자기 유도법칙에 의해 그림에 나타나있는 것과 같이 강진에 대해서 더 강한 유도전압이 유도된다. El Centro, Hachinohe, Kobe 그리고 Northridge지진에 대해서, 유도된 최대전압은 각각 1.6V, 0.9V, 2.25V, 2.25V이다. 이것은 MR댐퍼를 작동시키기에 충분한 전압이다. 여기서 MR댐퍼의 전압용량이 2.25V이므로 유도전압은 최대 2.25V로 제안하였다. 또한 Clipped-Optimal제어기의 경우 제어신호로써 0V와 2.25V만을 사용하는데 반해서, EMI시스템은 제어신호로써 연속적인 전압을 사용한다.

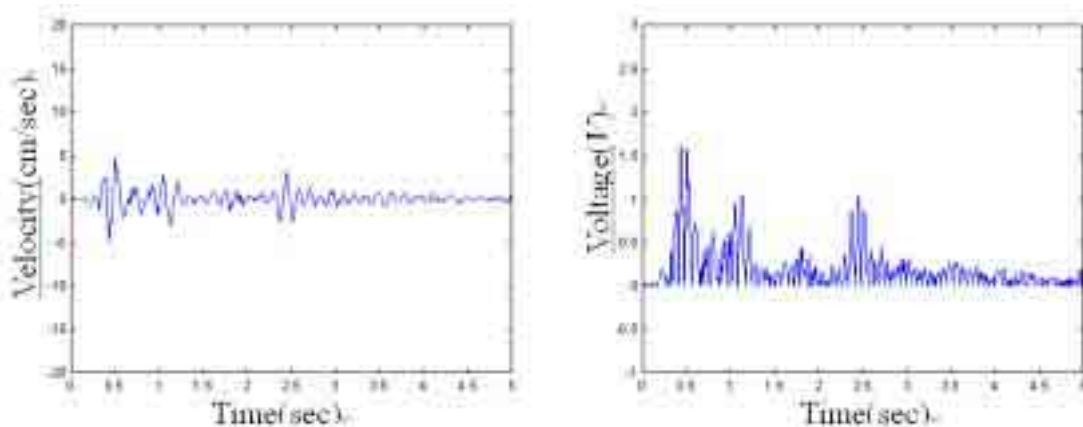


그림5. El Centro 지진시, 1층에서의 속도와 유도된 기전력

표1은 각 경우에 대한 각층에서의 가속도와 층간변위를 비제어시의 응답으로 정규화하여 나타내었다. 회색으로 표시된 칸은 각 층에서의 최소값을 나타낸다. El Centro와 Hachinohe지진과 같은 중간규모의 지진에 대해서는 Clipped-Optimal 제어기를 사용하는 기존 시스템이 더 낮은 성능을 보인다. EMI시스템은 1층에서만 최소값을 갖는다. 그러나 Kobe와 Northridge와 같은 강진에 대해서는 EMI시스템이 기존의 Clipped-Optimal 제어기 보다 최대 가속도에서 35% 그리고 최대 층간변위에서 24.1% 만큼 추가적으로 응답을 감소시킨다. EMI시스템이 제어기와 전원을 사용하지 않았음에도 불구하고 중진에 대해서 기존 Clipped-Optimal 제어기의 성능에 필적하고 강진에 대해서는 더 우수한 결과를 보인다.

5. 결론

본 논문은 토목구조물을 위해 EMI시스템을 구비한 MR댐퍼를 제안하였다. EMI시스템은 영구자석과 솔레

노이드 코일로 구성된다. EMI시스템은 패러데이의 전자기유도법칙에 의해서 기전력을 발생시키며 이것은 MR댐퍼의 점성을 변화시킨다. 이러한 EMI시스템은 전원과 센서 그리고 제어기를 사용하는 기존 MR댐퍼 시스템을 대체할 수 있다.

EMI시스템을 구비한 MR댐퍼의 성능을 연구하기 위해서, 2개의 EMI시스템을 설계하였고 같은 기준으로 설계된 Clipped-Optimal 제어기의 성능과 수치해석을 통해 비교하였다. 비교한 결과, El Centro와 Hachinohe 지진과 같은 중간규모의 지진에 대해서는 Clipped-Optimal 제어기를 사용하는 기존 시스템이 더 낮은 성능을 보이고 EMI시스템은 이에 필적할 만한 성능을 보인다. 또한 Kobe와 Northridge와 같은 강진에 대해서는 EMI시스템이 기존의 Clipped-Optimal 제어기 보다 최대 가속도에서 35.5% 그리고 최대 층간변위에서 24.1% 만큼 추가적으로 응답을 감소시킨다.

이러한 성능적인 측면이외에 중요한 점은, EMI시스템은 전원과 센서 그리고 제어기가 필요하지 않은 간단한 구조라는 것이다. 그러므로 제안된 EMI시스템을 구비한 EMI시스템은 실제 구조물에 적용할 수 있는 충분한 잠재력을 갖는다. 수치해석을 검증하기 위한 실험적 연구가 수행되고 있으며, 동시에 바람하중에 대한 성능검증을 위한 연구가 진행되고 있다.

표 1. 정규화된 최대 가속도와 층간변위

Story	Accelerations							
	El Centro (0.3495)*				Hachinohe (0.2294)			
	Cl-Oac	Cl-Odr	EMlac	EMldr	Cl-Oac	Cl-Odr	EMlac	EMldr
1 st	0.499	0.551	0.355	0.340	0.492	0.515	0.372	0.377
2 nd	0.354	0.433	0.436	0.396	0.431	0.520	0.526	0.530
3 rd	0.441	0.473	0.512	0.492	0.384	0.465	0.404	0.423
Story	Kobe (0.8337)				Northridge (0.8428)			
	Cl-Oac	Cl-Odr	EMlac	EMldr	Cl-Oac	Cl-Odr	EMlac	EMldr
	1 st	0.370	0.429	0.367	0.345	0.897	0.881	0.568
2 nd	0.494	0.493	0.484	0.485	0.587	0.554	0.612	0.586
3 rd	0.410	0.384	0.387	0.393	0.815	0.800	0.725	0.738

Story	Inter-story Drifts							
	El Centro (0.3495)				Hachinohe (0.2294)			
	Cl-Oac	Cl-Odr	EMlac	EMldr	Cl-Oac	Cl-Odr	EMlac	EMldr
1 st	0.228	0.212	0.168	0.180	0.295	0.243	0.178	0.194
2 nd	0.423	0.448	0.476	0.457	0.289	0.319	0.357	0.355
3 rd	0.441	0.473	0.512	0.492	0.384	0.465	0.404	0.423
Story	Kobe (0.8337)				Northridge (0.8428)			
	Cl-Oac	Cl-Odr	EMlac	EMldr	Cl-Oac	Cl-Odr	EMlac	EMldr
	1 st	0.348	0.308	0.293	0.301	0.563	0.473	0.359
2 nd	0.456	0.442	0.428	0.435	0.859	0.846	0.827	0.835
3 rd	0.410	0.384	0.387	0.393	0.815	0.800	0.725	0.738

* () is peak ground acceleration (g)

감사의글

본 연구는 교육인적자원부 BK21사업의 지원으로 연구되었으므로, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 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, pp. 565-575.
2. Dyke, S.J., Spencer Jr., B.F., Sain, M.K. and Carlson, J.D. (1996b), Seismic Response Reduction Using Magnetorheological Dampers." *Proc. of the IFAC World Congress*, San Francisco, CA, June 30-July 5.
3. Reitz, J.R. Milford, F.J., and Christy R.W. (1993), Foundations of electromagnetic theory, *Addison-Wesley Pub. Co.*
4. Park, K.S., Jung, H.J and Lee, I.W. (2003), Hybrid Control Strategy for Seismic Protection of a Benchmark Cable-Stayed Bridge, *Engineering Structures*, Vol. 25, No. 4, pp. 405-417.
5. Spencer Jr., B.F., Dyke, S.J., Sain, M.K. and Carlson, J.D. (1997a), Phenomenological Model of a Magnetorheological Damper, *J. Engrg. Mech., ASCE*, Vol. 123, No. 3, pp. 230-238.
6. Spencer Jr., B.F., Dyke, S.J., Sain, M.K. and Carlson, J.D. (1997b), Benchmark Problems in Structural Control:-Part I: Active Mass Driver System, *Proc. ASCE Struct. Congr. XV.*, ASCE, New York, pp. 1265-1269.