

MR Damper의 준능동 퍼지제어이론을 이용한  
교량구조물의 지진응답제어  
Seismic Response Control of Bridge Structures  
Using Semi-Active Fuzzy Control of MR Damper

박관순\* · 고현무\*\* · 옥승용\*\*\* · 서충원\*\*\*\*

Park, Kwan-Soon · Koh, Hyun-Moo · Ok, Seung-Yong · Seo, Chungwon

---

ABSTRACT

In this study magneto-rheological damper, a kind of semi-active device, is used to reduce the response of pier and girder of bridge structure subjected to seismic excitation and as a effective semi-active control method fuzzy control technique considering nonlinear behavior of the damper dynamics. By Numerical simulations of a nine span continuous bridge system subjected to various earthquakes, fuzzy control technique is compared with existing clipped optimal control technique in control performance which reduces displacement of pier and girder simultaneously. In the comparison of the control performance within a control force limit, it is confirmed that presented fuzzy control technique more efficiently reduce the pier and girder displacement than clipped optimal control technique based on optimal control theory.

---

1. 서론

최근 건설되고 있는 교량과 같은 장대 구조물들은 지진하중에 의한 진동을 제어하기 위해서 수동형 제진장치(passive control system)(Priestley, 1996 ; 고현무 등, 1999 ; 하동호 등, 2000)나 능동형 제진장치(active control system)를 사용하는데 각각 장단점이 있다. 수동형의 경우는 경제적이기는 하나 시스템이나 외부 하중의 변화에 대해 적응성을 가지지 못하고, 능동형의 경우에는 적응성이 좋기는 하지만 제어력을 낼 때 큰 전력이 필요하게 된다. 이 연구에서는 수동형 제진장치의 한계를 극복하기 위하여, 기존의 수동형 감쇠기에 가변성을 부가함으로써 시스템을 구성하는

---

\*서울대학교 지구환경시스템공학부 계약조교수 · 공학박사 · 02-880-8315(E-mail:kspark@sel.snu.ac.kr)

\*\*서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 · 공학박사 · 02-880-7352(E-mail:khm@gong.snu.ac.kr) · 정희원

\*\*\*서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정 · 공학석사 · 02-880-8325(E-mail:dhryd@sel.snu.ac.kr)

\*\*\*\*서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정 · 공학박사 · 02-880-8325(E-mail:sephiroth@sel.snu.ac.kr)

다양한 요소들의 변화들에 대하여 적응성을 갖는 준능동 제어(semi-active control)개념을 도입하였으며, 교량에 장착된 준능동 제어시스템의 효과적인 감쇠력 조절을 위하여 퍼지제어기법(fuzzy control technique)을 제시하였다. 준능동 제어장치로는 MR (magneto-rheological) Damper(Spencer 등, 1998)를 사용하였는데, 이는 빠른 반응속도를 가지면서도 외부온도가 변하거나 불순물이 첨가되어도 항복응력의 변화가 거의 없이 일정한 성능을 유지하는 장점으로 인하여 실외에 장착되어야 하는 교량구조물에 적용하기 용이하며 지진하중에 대하여 빠른 반응을 요하는 제어시스템에 적합한 것으로 판단된다. MR Damper는 자기장의 세기에 따라 변하는 항복응력을 갖는 점소성 거동을 하기 때문에, 이 장치를 이용한 준능동제어는 자기장을 변화시킬 수 있는 전류 또는 전압을 조절함으로써 이루어진다. 현재까지 제시된 제어방법으로는 선형제어이론(linear control theory)에 기반하여 매 순간 필요한 제어력을 산정한 뒤, 이에 따라 전류의 세기를 on-off의 방식으로 조절하는 Clipped Optimal Control Method가 있다(Dyke 등, 1996). 그런데, 이 방법은 적용이 간단한 장점을 가지지만, Damper의 비선형성이 고려되지 않을 뿐 아니라, 매 순간 필요한 감쇠력을 제공하는 전류의 양을 2단계만 사용함으로써 효과적인 제어효과를 발휘하지 못할 수도 있다. 이 연구에서는 MR Damper의 감쇠력 조절에 필요한 전류의 양을 보다 세밀하게 연속적으로 결정하는 방법으로 퍼지이론(Wang, 1997; Symans 등, 1999)을 적용하였다. 제시하는 준능동퍼지제어방법의 적용성과 제어효과를 검증하기 위하여 MR Damper가 장착된 9경간 연속교량에 대하여 수치해석을 수행하였으며 이를 Clipped Optimal Control Method와 비교한 후 그 결과를 제시하였다.

## 2. MR Damper-교량시스템

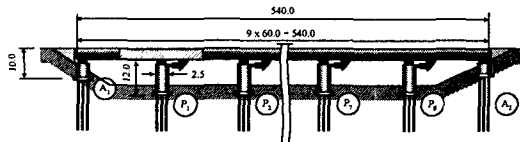


그림 1. MR Damper-교량 모형

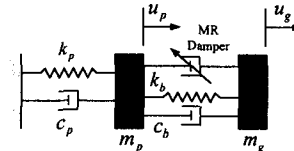


그림 2. 2자유도 모델링

준능동 제어장치가 장착된 교량 모델은 그림 1과 같이 교각(Pier)과 교량의 상부구조(Girder) 사이에 MR Damper가 설치되어 있는 구조로 MR Damper는 상부구조와 교각사이에 설치되어 상부구조의 변위를 줄여주고, 상부구조로부터 교각에 전달되는 하중을 전달하는 역할을 한다. 이에 대한 역학적 모델로는 그림 2와 같은 상부구조와 교각상단에 질량을 집중시킨 등가 선형의 2자유도로 모델링한다. 교각과 상부구조의 질량은 각각 224ton, 1624ton이며, 교각의 강성은 8280tonf/m, 감쇠비는 5%이다. 탄성받침은 저감쇠 bearing으로 414tonf/m의 강성과 2%의 감쇠비를 가정하였다. 그리고 MR Damper의 핵심 구성요소인 MR Fluid는 ER Fluid의 자기적 상사물질로서, 일반적으로 무기물이나 실리콘 오일 내에 자기적으로 극성을 띄는 미소입자가 고르게 분포되어 있는 구조를 가진다. 유체 내에 분포된 미소입자들은 주변에 자기장이 형성됨으로써 그 배열형태를 변화시켜 유체를 반고체 상태로 변환시키는데, 입력전류를 조절하여 자기장을 변화시킴으로써 감쇠

력이 변하게 된다. MR Damper의 해석모델로는 Modified Bouc-Wen model(Spencer, 1997)을 적용하였다.

### 3. 퍼지제어기의 설계

제시하는 퍼지제어기법은 구조물의 응답정보로부터 퍼지연산을 수행함으로써 매 순간 보다 효율적인 제어성능을 발휘하도록 MR Damper에 입력되는 전류를 조절하게 되는데, 그림 3과 같은 구조를 띤다. 퍼지연산을 위한 입력으로는 교각과 상부구조의 상대변위와 상대속도를 사용하였고, 출력은 감쇠기의 입력전류를 사용하였다.

퍼지연산은 그림 4와 같이 퍼지화(Fuzzification), 퍼지규칙에 근거한 퍼지추론엔진(Inference Engine), 비퍼지화(Defuzzification)의 3단계로 구성되고, 각 단계는 입력에 대한 소속함수(Membership Function), 퍼지규칙표(Fuzzy Rule Table), 그리고 출력에 대한 소속함수를 구성요소로서 갖는다.

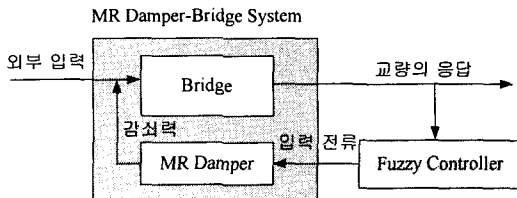


그림 3. 퍼지제어시스템의 개념도

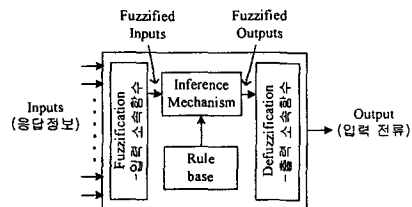


그림 4. 퍼지연산과정

퍼지화과정에서 입력 소속함수는 입력정보에 대하여 물리적인 의미를 갖는 여러 개의 퍼지변수들로 따라 정의하는데, 이 연구에서는 삼각형 모양의 입력 소속함수를 사용하였고 상대변위와 상대속도의 입력크기에 대하여 [NVL, NL, NM, NS, NVS, Zero, PVS, PS, PM, PL, PVL]의 11개 퍼지변수를 사용하였다. 여기서, N은 negative, V는 very, L는 large, M은 Medium, S는 small, P는 positive를 나타낸다.

추론엔진은 미리 결정된 퍼지규칙표에 따라 퍼지화과정을 통하여 결정되는 입력퍼지값들을 출력퍼지값으로 변환시켜주는 역할을 한다. 입력과 출력에 대한 변수들의 조합관계는 예로서, 식 (1)과 같은 조건문(if-then)을 사용함으로써 표현할 수 있다.

$$\text{Rule : if } u \text{ is "PVL" and } \dot{u} \text{ is "PVL", then } i(\text{input current}) \text{ is "VL2"}. \quad (1)$$

위의 식은 교각과 상부구조의 상대변위와 상대속도가 모두 클 경우 입력전류가 커야한다는 규칙으로,  $u$ ,  $\dot{u}$ ,  $i$ 는 각각 입출력 정보인 교량의 교각과 상부구조의 상대변위, 상대속도, 그리고 입력전류이다. "PVL"과 "VL2"는 각각 입·출력퍼지변수를 나타낸다. 이와 같은 규칙들의 조합으로 표 1과 같은 퍼지규칙표를 구성하며, 조건문에서의 AND 논리관계에 대한 퍼지연산에는 Min 방법을, 그리고 추론의 결과인 규칙들을 하나로 묶는 방법(aggregation method)으로는 Max 방법을 사용하였다.

표 1. 퍼지규칙표

퍼지화된 출력	교각과 상부구조의 상대변위											
	NVL	NL	NM	NS	NVS	Zero	FVS	FS	PM	PL	PVL	
교각- 상부구조의 상대속도	NVL	VL2	VL1	L2	L1	M2	M1	M2	L1	L2	VL1	VL2
	NL	VL1	L2	L1	M2	M1	S2	M1	M2	L1	L2	VL1
	NM	L2	L1	M2	M1	S2	S1	S2	M1	M2	L1	L2
	NS	L1	M2	M1	S2	S1	VS2	S1	S2	M1	M2	L1
	NVS	M2	M1	S2	S1	VS2	VS1	VS2	S1	S2	M1	M2
	Zero	M1	S2	S1	VS2	VS1	Zero	VS1	VS2	S1	S2	M1
	FVS	M2	M1	S2	S1	VS2	VS1	VS2	S1	S2	M1	M2
	FS	L1	M2	M1	S2	S1	VS2	S1	S2	M1	M2	L1
	PM	L2	L1	M2	M1	S2	S1	S2	M1	M2	L1	L2
	PL	VL1	L2	L1	M2	M1	S2	M1	M2	L1	L2	VL1
	PVL	VL2	VL1	L2	L1	M2	M1	M2	L1	L2	VL1	VL2

마지막 단계인 비퍼지화과정은 추론과정에서 전제들간의 논리적연산에 의해 결정된 출력값을 물리적인 의미를 갖는 출력정보로 역환산하는 과정으로서, 제안하는 방법에서의 출력은 MR Damper에 들어가는 입력 전류로서 Yang 등(2002)에 제안한 바에 따라 0~2A의 값을 갖도록 삼각형 모양의 11개의 출력소속함수를 정의하였다. 출력소속함수가 정의된 좌표평면에서 수평축은 퍼지 추론엔진과정에서 구해진 MR Damper에 입력되는 전류로서 양의 값을 가지며, 수직축은 추론과정에서 수행된 전제들간의 논리적 연산을 통한 퍼지값이 된다.

비퍼지화 과정의 출력값은 실제 MR Damper에 들어가는 입력 전류(IC : Input Current)로서, 무게중심법(Center of Gravity Method)을 사용하여 식 (2)로 표현된다.

$$IC = \frac{\sum_{j=1}^{N_R} b_j^i \mu_j^i}{\sum_{j=1}^{N_R} \mu_j^i} \quad (2)$$

여기서,  $N_R$ 은 주어진 입력에 대하여 적용되는 규칙의 개수,  $\mu_j^i$ 는  $i$ 번째 입력정보에 대하여  $j$ 번째 규칙에 따른 출력 소속함수값,  $b_j^i$ 는 해당하는 출력 소속함수의 무게중심을 의미한다.

앞서 언급한 일련의 과정을 거쳐 최종적으로 그림 5와 같은 물리적인 의미를 갖는 입출력 정보간의 사상관계를 3차원으로 표현하는 Rule Surface를 얻게 된다. 그림에서  $x, y$ 축은 각각 교각에 대한 상부구조의 상대변위와 속도를 나타내고  $z$ 축은 전류를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 입력의 절대값이 클 때는 출력값인 전류도 크고, 입력의 절대값이 작을 때는 전류도 작아지는 형태를 띄고 있다. 즉, 그림과 같이 입력의 절대값이 큰 4개의 모서리 부분은 큰 전류값을 입력의 절대값이 작은 가운데 부분은 작은 전류값을 갖는다. 이를 통하여 MR Damper의 효과적인 준능동 제어를 구현하게 된다.

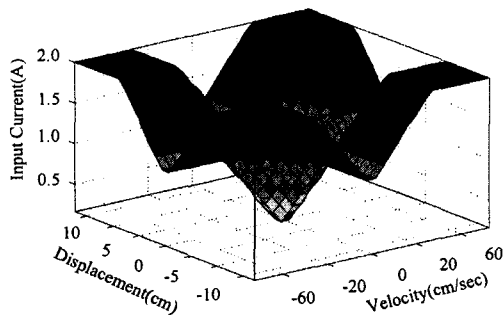


그림 5. Rule Surface

#### 4. 수치해석 예

지진입력으로는 El Centrol(1940), Mexico(1985), Kobe(1995)의 세 가지 지진기록을 사용하고, 설계 지진가속도는 0.34g로 하였다. Clipped Optimal Control Method에 따른 준능동제어기를 설계하고, 제시하는 퍼지제어기법과 제어성능을 비교한다.

##### 4.1 Clipped Optimal Controller 설계

Clipped Optimal Control Method은 목표제어력을 결정하는 능동제어기를 설계하는 단계와 설계된 능동제어기가 산정하는 목표제어력과 MR Damper의 감쇠력을 비교하여 매 순간 MR Damper의 입력전류를 최대값 또는 최소값으로 결정하는 단계로 구성된다. 이 연구에서 능동제어기는 일반적인 최적제어이론에 기반한 LQR 제어기법(Kirk, 1970)을 적용하였다.

LQR제어기 설계시 변위에 대한 가중행렬은 식 (3)으로 표현될 수 있으며,  $w_p$ ,  $w_g$ 는 각각 제어목적이 되는 교각과 상부구조의 응답에 대한 가중값이다.

$$C^* = w_g \times \begin{bmatrix} w_p/w_g & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

상부구조에 대한 가중치  $w_g=1$ 인 경우에 대하여 가중치의 비( $w_p/w_g$ )를 교각 변위에 보다 높은 가중치( $w_p/w_g=20$ )를 둔 경우(Clipped Optimal 1)와 상부구조 변위에 보다 높은 가중치( $w_p/w_g=15$ )를 둔 경우(Clipped Optimal 2)로서 LQR제어기를 설계하였다. 그리고 설계된 LQR 제어기에 의해서 MR Damper에 입력되는 전류의 최대값 또는 최소값의 결정은 아래의 식 (4)에 따라 이루어진다.

$$\text{입력전류(input current)} = IC_{\max} H\{(f_c - f)f\} \quad (4)$$

$f_c$ 는 LQR 제어를 통하여 계산되는 최적 감쇠력이고  $f$ 는 실제 MR Damper가 발휘하는 감쇠력이다. 그리고,  $IC_{max}$ 는 MR Damper에 입력될 수 있는 최대전류로서 2A이고,  $H(\cdot)$ 는 Heaviside Step Function이다(Dyke 등, 1996).

#### 4.2 해석결과 비교

Kobe지진입력에 대한 Clipped Optimal 1과 퍼지제어를 수행한 경우의 교각 및 상부구조 응답 및 감쇠력의 시간이력곡선과 각 경우에 대한 전류입력과 이력곡선을 그림 6에 도시하였다. 퍼지제어기와 교각변위 및 상부구조변위에 가중치를 달리한 두 가지의 Clipped Optimal Controller에 대하여 각 지진별 수치해석을 수행하였으며, 그 결과로서 교각의 변위 및 교각과 상부구조의 상대변위의 최대값을 그림 7에 도시하였다. 그림 7의 (a), (b)에서 교각변위에 보다 높은 가중치를 설정한 Clipped Optimal 1의 경우는 제시한 퍼지제어와 비교했을 때 교각의 변위를 1cm이하로 더 줄여주는 대신 상부구조의 변위는 최대 2.5cm이상 더 늘어나는 것을 확인할 수 있다. 반면 Clipped Optimal 2의 경우는 상부구조에 보다 높은 가중치를 설정하였으므로, 교각의 변위가 퍼지제어보다 증가하는 것을 볼 수 있지만, 상부구조와 교각의 상대변위에서도 역시 퍼지제어보다 큰 응답을 보이는 것을 확인할 수 있다. 동일한 용량의 MR Damper에 대하여 퍼지제어를 적용한 경우에는 두 가지 Clipped Optimal Controller에 비해 교각과 상부구조의 변위를 보다 효율적으로 저감시키고 있음을 알 수 있다.

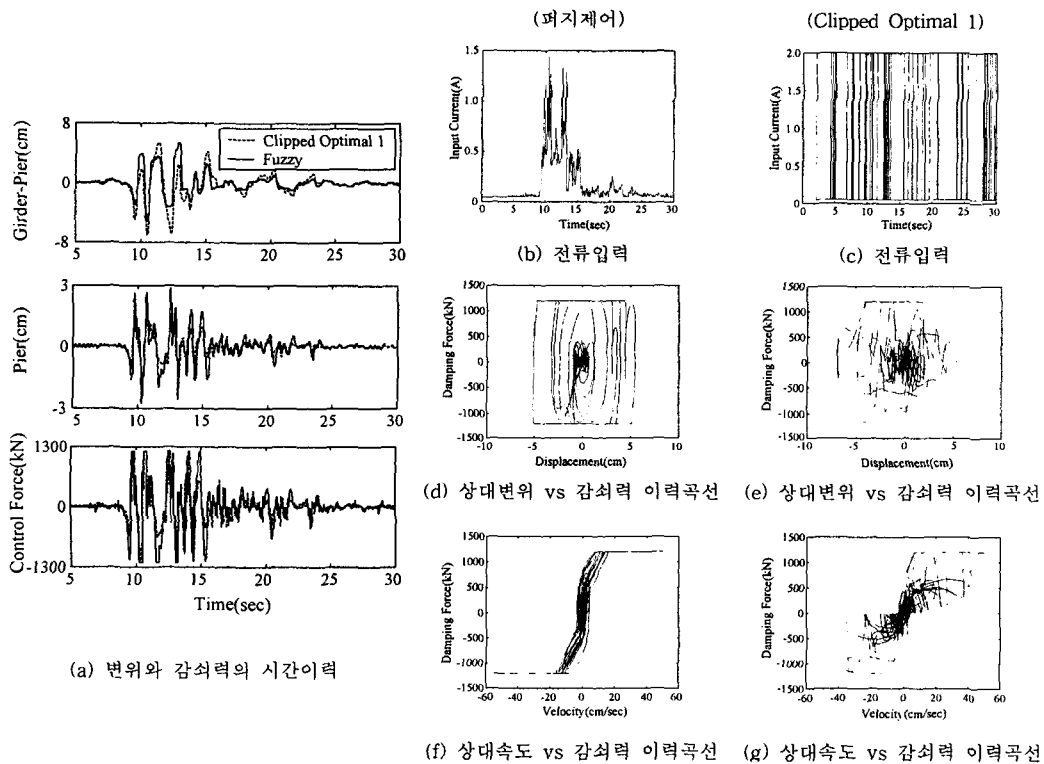
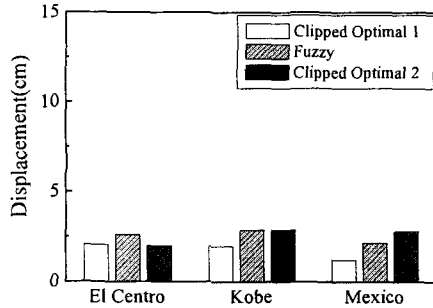
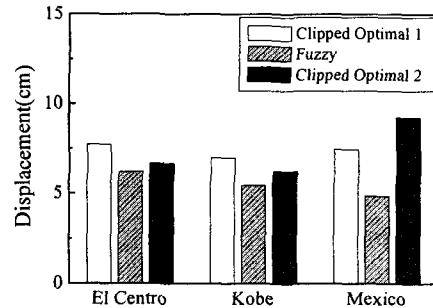


그림 6. Clipped Optimal 1 및 퍼지제어 시 해석결과비교



(a) 교각상단의 변위 최대값



(b) 교각-상부구조간의 상대변위 최대값

그림 7. 제어방법에 따른 지진응답비교

## 5. 결론

지진하중이 작용하는 교량 시스템에 발생하는 진동문제를 해결하는 방법으로 MR Damper를 적용하였고, 감쇠력을 결정하는 입력전류의 양을 연속적으로 조절함으로써 감쇠기의 역학적 모델의 비선형성을 고려할 수 있는 효율적인 준능동 퍼지제어기법을 제시하였다. 기존의 Clipped Optimal Control Method이 최적제어이론에 기반하여 목표제어력을 산정하고 매 순간 감쇠력의 크기에 따라 높은 전류와 낮은 전류의 2단계로 전류를 조절하는 반면, 제시하는 기법은 감쇠기의 상대변위와 속도의 입력정보로부터 퍼지연산과정을 통하여 감쇠력을 보다 세밀하게 조절하여 제어 성능을 개선할 수 있다.

제시한 기법의 효율성을 검증하기 위하여 여러 가지 지진하중에 대하여 수치해석을 수행하였으며, 그 결과를 Clipped Optimal Control Method를 적용한 결과와 비교하였다. Clipped Optimal Control Method는 교각과 상부구조에 가중치를 달리한 두 가지 목적의 제어기를 설계하여 적용하였는데, 교각에 보다 높은 가중치를 적용한 Clipped Optimal 1인 경우에는 퍼지제어기와 비교할 때 교각의 응답은 보다 낮은 반면 상부구조의 응답에서 보다 높은 값을 보였다. 그러나, 상부구조에 보다 높은 가중치를 적용한 Clipped Optimal 2인 경우에는 요구제어력과 MR Damper가 발휘할 수 있는 최대 감쇠력간의 용량문제로 인하여 교각과 상부구조 응답들에 있어서 모두 퍼지제어기보다 제어성능이 저하되는 결과를 확인하였다. 그러므로, Clipped Optimal Control Method는 가중행렬의 선정에 따라 제어력 및 제어성능이 결정되고 또한 제어력은 입력지진에 따라 영향을 받게 되는데, 최대 감쇠력의 제한조건을 만족하지 못하는 경우는 제어성능이 현저히 저하될 수 있다. 이에 반해 제시하는 퍼지제어기법은 최대 감쇠력의 범위내에서 교각과 상부구조에 발생하는 지진응답을 효율적으로 감소시킴을 알 수 있다.

## 감사의 글

이 연구는 두뇌한국21사업 핵심분야 지원사업과 서울대학교 지진공학연구센터(KEERC)의 연구비 지원에 의하여 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 고현무, 송준호 (1999), 사용기간비용 최소화에 의한 지진격리 교량의 경제성 평가, *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제19권, 제I-4호, pp. 539-550.
2. 하동호, 고현무 (2000), 마찰반침을 가진 지진격리교량의 지진응답특성, *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제20권, 제6-A호, pp. 937-944.
3. Dyke, S.J., Spencer, Jr., B.F., Sain, M.K. and Carlson, J.D. (1996) Modeling and Control of Magnetorheological Dampers for Seismic Response Reduction. *Smart Materials and Structures*, Vol. 5, pp. 565-575.
4. Erkus, B., Abe, M., Fujino, Y. (2002) Investigation of Semi-Active Control for Seismic Protection of Elevated Highway Bridges. *Engineering Structures*, in press.
5. Kirk, D.E. (1970) *Optimal Control Theory - An Introduction*. Prentice Hall.
6. Priestley, M.J.N., Seible, F., Calvi, G.M. (1996) *Seismic Design and Retrofit of Bridges*. Wiley, New York.
7. Spencer, Jr., B.F., Dyke, S.J., Sain M.K. and Carlson J.D. (1997) Phenomenological Model of a Magnetorheological Damper. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 123, No. 3, pp. 230-238
8. Spencer, Jr., B.F., Yang, G., Carlson, J.D. and Sain, M.K. (1998) 'Smart' Dampers for Seismic Protection of Structures: A Full-Scale Study. *Proceedings of the Second World Conference on Structural Control (2WCSC)*, Kyoto, Japan, June 28 - July 1, Vol. 1, pp. 417-426.
9. Symans, M.D., Kelly, S.W. (1999) Fuzzy Logic Control of Bridge Structures Using Intelligent Semi-Active Seismic Isolation Systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 28, pp. 37-60.
10. Wang, L.-X. (1997) *A Course in Fuzzy Systems and Control*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
11. Yang, G., Jung, H.J. and Spencer, Jr., B.F. (2001) Dynamic Model of Full-Scale MR Dampers for Civil Engineering Applications. *US-Japan Workshop on Smart Structures for Improved Seismic Performance in Urban Region*, Seattle, WA, Aug. pp. 14-16, 2001.
12. Yang, G., Spencer Jr., B.F., Carlson, J.D. and Sain, M.K. (2002) Large-scale MR fluid dampers: modeling, and dynamic performance considerations. *Engineering Structures*, in press.