

# 자기유변유체 댐퍼를 이용한 대형구조물의 반능동제어

윤 정 방\*, 구 자 인, 김 상 범, 전 준 보  
한국과학기술원 토목공학과

## 국문요약

자기유변유체감쇠기를 이용한 반능동 제어 시스템은 최근에 개발되어 승용차의 승차감 향상을 위한 진동제어에 사용되고 있다. 본 연구에서는 바람, 지진, 파랑 등에 대한 대형구조물의 진동제어를 위한 MR 감쇠기의 적용성을 분석하기 위하여, 미국 토목학회에서 제안한 76층 건물의 풍하중에 대한 진동제어에 관한 Benchmark Problem에 대하여 수치모의 해석을 수행하였다. 연구결과로부터, 풍하중에 대한 고층 건물의 진동제어를 위하여 MR 감쇠기를 이용한 반능동 제어의 성능은 능동형 동조질량 감쇠기의 성능과 유사함을 확인할 수 있었다.

## 1 서 론

이 논문에서는 하중특성 변화에 대한 제어 장치의 적응성과 태풍, 지진, 파랑 등 대형 재난의 발생시 제어기 작동의 신뢰성을 확보하기 위하여, 자기유변유체 (Magneto-Rheological Fluid : MR) 댐퍼를 이용한 반능동 제어장치에 대하여 연구하였다. MR 유체는 평상시에는 점성유체의 성질을 가지나, 12 V 정도의 전력에 의해 자력을 가하면 순간적으로 고체로 변하는 Smart 재료중의 하나이다. 따라서, MR 댐퍼는 건전지로도 운전이 가능한 장점이 있다. 이러한 제어장치는 제어력이 제어장치내 MR 유체의 성질을 원하는 방향으로 매 순간마다 바꾸어서 제어 효과를 얻으므로 반능동 제어장치라 부른다.

MR 감쇠기의 적용성을 분석하기 위하여, 미국 토목학회에서 제안한 76층 건물의 풍하중에 대한 진동제어에 관한 Benchmark Problem에 대하여 수치모의 해석을 수행하였다. 감쇠기가 건물의 여러층에 설치된다고 가정하여, 감쇠기의 최적 위치와 용량을 결정하기 위하여 유전자 알고리즘을 사용하였으며, 비선형 특성을 가진 MR Damper의 효

율적인 제어를 위하여 Clipped Optimal 제어 기법을 사용하였다. 제어기의 풍하중의 변화에 대한 강건함을 입증하기 위해 여러 풍속 조건에 대하여 MR 댐퍼를 이용한 반능동 제어시스템의 진동제어 효과를 분석하였다. 연구 결과로부터, 풍하중에 대한 고층 건물의 진동제어를 위한 MR 감쇠기의 제어 성능은 능동형 동조질량 감쇠기의 성능과 유사함을 확인할 수 있었다.

## 2 구조계와 MR 댐퍼의 모형화

### 2.1 구조계의 모형화

그림 1에는 미국 토목학회(ASCE)에서 제안한 풍하중에 대한 진동제어 문제의 대상 구조물인 76층 건물을 보여주었다. MR 댐퍼가 포함된 구조물의 동적 거동은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M\ddot{y}(t) + C\dot{y}(t) + K_y(t) = f(t) + Bf_{MR}(t, v_{in}) \quad (1)$$

여기에서  $y(t)$ ,  $f(t)$ ,  $f_{MR}(t, v_{in})$  과  $v_{in}$  = 구조물의 변위, 풍하중, MR 감쇠기에 의한 제어력, 및 MR 댐퍼에 입력된 전압 벡터;  $M$ ,  $C$  와  $K$  = 질량, 감쇠, 및 강성 행렬; 그리고  $B$  = MR 댐퍼의 효과를 나타내는 Boolean 행렬이다.

해석의 효율성을 위해 상태변수 축소 (state order reduction) 방법을 사용해서 76층 건물을 23 자유도 시스템으로 변환하였는데 선택된 자유도는 3, 6, 10, 13, 16, 20, 23, 26, 30, 33, 36, 40, 43, 46, 50, 53, 56, 60, 63, 66, 70, 73과 76층의 수평 변위이다. 이에 대한 상태 변위 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= S(t)x(t) + d_{MR}(t, v_{in}) + f(t) \\ \ddot{x}(t) &= c_c \ddot{x}(t) + c_{d,MR}(t, v_{in}) + c_f'(t) \\ \ddot{v}_{in}(t) &= m_m \ddot{x}(t) + m_{d,MR}(t, v_{in}) + m_f'(t) + \ddot{v}_{in}(t) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $x(t)$  = 구조물의 변위와 속도로 정의된 상태벡터  $[x^T \dot{x}^T]^T$ ;  $\ddot{v}_{in}(t)$  = 제어변수, 관측변수, 및 관측오차 벡터; 그리고,  $S$ ,  $c_c$ ,  $c_f$ ,  $c_{d,MR}$ ,  $m_m$ ,  $m_f$  와  $m_{d,MR}$  = 계수 행렬이다.

## 2.2 MR 댐퍼의 모형화

MR 댐퍼는 높은 동적 항복 강도를 가지고 있으며, 가용할 수 있는 온도 범위가 넓고, 감쇠력을 제어하기 위해서 작은 전압만이 필요하며, 또한 입력 자성변화에 대한 반응 시간이 짧은 특성을 가지고 있다. 많은 연구자들이 MR 유체의 모델링에 대한 연구를 하여왔는데, 본 연구에서는 그림 2와 같은 bi-viscous 모델을 사용하여 MR 감쇠기의 거동을 모형화 하였으며, 이 때 감쇠력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_0 \dot{x} = \begin{cases} F_1 \dot{x}, & |\dot{x}| < \dot{x}_s \\ F_0 \dot{x} + I_1 \text{sgn}(\dot{x}), & |\dot{x}| > \dot{x}_s \end{cases} \quad (3)$$

여기에서  $\dot{x}_s$  는 MR 감쇠기의 속도이며,  $\dot{x}_s$  는 항복 속도,  $I_0$  는 항복 강도;  $F$  와  $F$  는 항복 전후의 감쇠 계수이다.

항복강도 ( $I_0$ ) 와 항복전 감쇠계수 ( $F_0$ ) 와 MR댐퍼에 실제로 작용되는 전압 ( $Y_{D,S}$ ) 과의 관계는 다음과 같다고 가정하였다(Dyke et al. 1998).

$$\begin{aligned} I_0 Y_{D,S} &= Y_{L,0} + I_1 Y_S \\ F_1 Y_{D,S} &= Y_{L,1} + F_S \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $I_0$ ,  $I_1$ ,  $F_0$ ,  $F_1$  및  $F_S$  는 MR 댐퍼에 대한 실험으로부터 얻어지는 상수이다

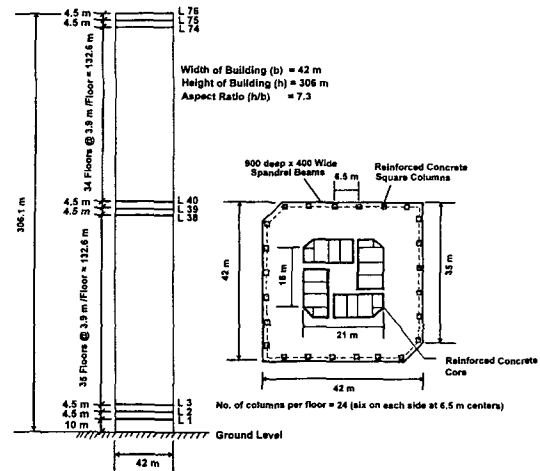


Figure 2: Structural diagram of the building showing dimensions and core details.

MR댐퍼를 제어하기 위하여 외부에서 전기 회로에 가해지는 전압 ( $Y_L$ ) 과 실제로 MR댐퍼에 가해지는 전압 ( $Y_{D,S}$ ) 과의 관계는 Spencer (1997) 등에 의해 제시된 first order filter를 사용하여 아래와 같이 모형화하였다.

$$\dot{Y}_{D,S} = -K(Y_{D,S} - Y_L) \quad (5)$$

여기서  $K$ 는 MR댐퍼 전기회로의 상수이다. 본 연구에서는 용량이 200kN이고 동적비가 10인 MR 댐퍼가 여러 층에 설치되는 것으로 가정하였는데, 이의 특성은 표 1에 보이었다.

## 2.3 모델축소와 상태 관측기

제어기를 설계하기 전에 두 단계의 예비설계가 수행되었다. 첫번째 단계는 제어 과정

7 DE 3 D U D P H W Y L V F R X V  
 B  
 3 D U D P H W H 3 D U D P 9 D  
 B  

$$\begin{matrix} F_{1D} & & I_{05} \\ F_{1E} & & I_{05} \\ \&_{05} & & F_0 \end{matrix}$$
 N  
 B

에서의 계산 효율을 높이기 위해 23자유도 시스템을 5 자유도 시스템으로 변환하는 것인데, 축소된 시스템에서의 자유도는 16, 30, 40, 60과 76층의 수평변위이다. 두번째 단계는 관측기의 설계인데, 관측된 신호로부터 상태를 추정하기 위해 Kalman-Bucy filter를 사용하였다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_U = & [U(W + S_{UG}) \\ & + I_{RE}(P(W - \lambda) - P(V P))] \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $\hat{x}_U$  = 축소된 상태변수의 추정값;  $I_P$  = 관측신호  $[y_1, y_2, y_3]$ ;  $I_{RE} = (V P^T + R)^{-1} =$  관측 이득 행렬 (observer gain matrix)이며; 관측 이득 행렬은 아래와 같은 Riccati 방정식으로부터 구한 행렬  $3_{RE}$ 로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{S}_{URE} + 3_V^{-1} - 3_{RE} U S_{VP}^{-1} 3_{RE} \\ + 4_{RE} - V 6_{RE}^{-1} 7 = 5 \end{aligned} \quad (7)$$

여기에서

$$\begin{aligned} \dot{S}_U = & -S_{RE}^{-1} \&_V \\ \begin{matrix} \dot{y}_{RE} \\ \dot{y}_E \end{matrix} & V \alpha = \begin{pmatrix} \&_U & \&_W \\ \&_U & \&_W + I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I \\ \&_W \end{pmatrix} \end{aligned}$$

### 3 제어기의 설계

#### 3.1 MR댐퍼의 Clipped Optimal 제어기법

MR댐퍼를 사용한 반능동제어는 시스템의 특성을 매시간 변화시켜서 제어 효과를 내는 것이기 때문에 선형 최적제어에 바탕을 둔 종래의 제어 기법은 효율성에 문제가 있

을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Dyke (1998) 등에 의해 제안된 Clipped Optimal 제어기법을 사용하였다. 최적 제어력을 계산하기 위하여, 예측된 가속도  $\&_0$  와 감쇠력  $I_0$  을 바탕으로, 우선 Linear Quadratic Gaussian (LQG) 제어기법을 사용한 선형 최적제어기를 아래와 같이 설계 하였다.

$$I_{04} = -1 \frac{\text{程}}{\text{程}} \cdot ( ) \quad \begin{matrix} \&_{05} \\ I_0 \end{matrix} \text{程} \quad (8)$$

여기서  $\cdot ( )$  는 Laplace 변환,  $\&_{05} ( )$  는 LQG 제어기의 전달 함수이다. LQG 제어기는 아래와 같은 목적함수를 최소화 하는 방법으로 구성하였다.

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} [ \int_0^T ( \&_{05}^T \&_{05} + I_0^T \&_{05} ) dt ] \quad (9)$$

여기서, 제어 변수들은 다음과 같고  $I_F = [ \&_{05}, \&_{05}, \&_{05}, \&_{05}, \&_{05}, \&_{05}, \&_{05}, \&_{05}, \&_{05} ]$ , 그리고  $4_{05}$  와  $5_{05}$  는 대각행렬로 택하였다.

MR댐퍼에 의해 발생하는 힘은 식 (8)에서 구한 최적 제어력  $I_{04}$  이 되도록 직접 제어할 수 있는 것이 아니고, 감쇠기에 가해지는 입력 전압  $Y_L$  을 조절하여 내부 MR유체의 점성특성만이 제어될 수 있다. 따라서 MR 댐퍼가 최적 제어력을 내게하기 위하여, 입력전압을 Clipped Optimal 제어기법을 사용하여, 아래와 같이 제어하였다. 만약 감쇠기가 최적 제어력을 내고 있을 때 ( $L_{05}, H_{05} = \&_{05}$ ), 입력 전압은 현상태를 유지하도록 한다. 그러나, 이 둘의 부호가 같고,  $|I_{05}|$  이  $|I_{04}|$  보다 작을 때에는  $I_{05}$  을 증가시키기 위해서 입력 전압  $Y_L$  을 최고치( $Y_{max}$ )로 증가시킨다. 다른 경우에는 입력 전압을 0으로 한다. 이 알고리즘을 Heaviside step-function을 사용 해서 나타내면 다음과 같다(Dyke et al. 1998).

$$Y_L = \max(Y_{05} - I_{04}, 0) \quad (10)$$

여기서  $\&_{05}$  는 Heaviside step-function이다.

### 3.2 MR댐퍼의 설치 위치 및 크기

MR댐퍼의 성능은 설치 위치와 용량에 따라 좌우되며, 이의 결정은 integer programming 문제이다. 또한 76층 건물의 경우, 가능한 설치 위치의 수가 너무 방대하므로 cost surface가 복잡해 질 수 있다. 이러한 이유로 인해 본 연구에서는 MR댐퍼의 최적 위치와 용량을 결정하기 위해 유전자 알고리즘을 사용하였다.

계산 시간의 단축을 위해 다음의 3가지 경우에 대한 예비 시험을 수행하였다. 경우 1: MR댐퍼가 아랫층에 설치되었을 때 (3, 6, 10, 13, and 16층), 경우 2: MR 댐퍼가 중간층에 설치 되었을 때 (33, 36, 40, 43, and 46층), 그리고 경우 3: MR댐퍼가 윗층에 설치 되었을 때 (63, 66, 70, 73, and 76층). 풍하중에 대한 해석 결과 경우 3과 같이 감쇠기가 윗층에 설치되었을 때 효율이 가장 우수하였으므로, MR댐퍼의 용량을 결정하기 위해 63,66,70,73과 76층 만을 고려하였다. 풍하중 하에서의 진동제어의 주요 목적은 진동에 의한 거주자의 불쾌감을 감소 시키는데 있으므로 가속도를 고려하여서 목적함수를 정의하였다. 유전자 알고리즘을 사용하여 구한 각 층에서의 MR댐퍼(200kN 용량)의 최적 개수는 63, 66, 70, 73, and 76 층에 대해 각각 2, 7, 5, 4, and 3 개이었다.

## 4 수치 모의해석 및 결과 분석

풍하중의 작용 하에서의 76층 건물에 대한 수치 모의해석을 수행하였다. 대상 구조물은 Yang (2000)등이 제안한 콘크리트 office tower이며, 23 자유도 시스템으로 모델링되었다. 세부사항은 problem organizer의 웹사이트(<http://www.eng.uci.edu/~anil/benchmark.html>)에 나타나 있다. 본 연구에서는 제어 과정에서 계산 효율을 위해서 상태변수 축소기법을 사용해서 5 자유도 시스템으로 축소시켰다.

Samali(2000) 등이 풍동실험으로부터 구한 풍하중 데이터를 이용하여 바람방향에 수직되는 횡방향의 동적성분만을 고려하여

구조물의 진동해석과 진동제어해석을 수행하였다. 지상 10m 에서의 평균 풍속( $\bar{V}$ )은 약 13.5m/s 이며 이는 거주자의 안락함과 관련된 설계 규정에 대한 풍속이다.

8개의 제어성능지수를 검토하였는데, J1과 J2는 가속도의 rms(root-mean-square)값, J3와 J4는 변위의 rms값, J7과 J8은 최대 가속도, J9과 J10은 최대변위에 대한 성능지수이다.(Yang et al. 2000) 각 성능지수는 작을수록 더 우수한 제어 성능을 의미한다. 반능동 제어를 사용할 때와 사용하지 않았을 때의 응답에 대한 시간이력은 그림 2에서 비교하였으며, MR댐퍼의 제어력에 대한 시간이력은 그림 3에 보였다. 수동, 반능동 MR 감쇠기에 의한 건물의 최대 및 rms응답을 표 2와 3에 보였다. 아울러, 비교를 위해 TMD와 ATMD에 의한 제어 결과도 보였다 (Yang et al. 2000). 여러 제어 방법에 대한 제어성능 지수를 표 4에 보였다.

MR 감쇠기에 의한 반능동 제어 시스템을 사용하였을 경우가, 제어를 하지 않았을 경우 보다 최대 및 rms 변위응답의 감소량이 각각 28-33% , 45-47% 이었고, 최대 및 rms 가속도 응답의 감소량이 각각 49-58%, 61-65%임을 확인할 수 있었다. 가속도의 제어를 위해 감쇠기가 설계 되었으므로, 가속도에 대한 값들이 변위값 보다 더 많이 감소되었음을 알 수 있다. MR 감쇠기에 의한 반능동 제어를 이용할 경우, 시방서에서 제시한 최대 허용 가속도인 15cm/sec (or 5cm/sec in RMS value)를 만족함을 확인할 수 있다.

표 4의 결과에 의하면 반능동 MR 감쇠기의 효율은 ATMD와 비슷한 결과를 보이지만 TMD보다는 훨씬 더 좋은 결과를 얻을 수 있다. 최대 가속도(J7 and J8)에 의한 MR댐퍼의 제어성능지수는 ATMD의 경우에 비해 약간 높은 값(성능이 저조)을 나타내었다. RMS 가속도(J2)에 의한 값은 보다 작은 값(성능이 우수)을 나타내었다.

MR댐퍼는 비선형 장치이므로 외부 하중의 크기에 따라 제어성능이 다르게 나타날 수 있으므로, 여러 풍하중 조건(0.5) ,

1.5) and 2.0) )에 대하여 추가적인 해석이 수행되었다. 표 5에 보인 제어성능 지수에 의하면, 여러 크기의 풍하중 하에서도 MR댐퍼를 이용한 반응동 제어 시스템의 강건함을 확인할 수 있다.

## 5 결 언

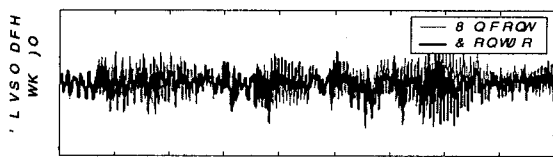
본 연구에서는 고층 건물의 풍하중에 의한 진동을 제어하기 위하여, MR 감쇠기를 이용한 반응동 제어 장치의 적용성을 분석하였다. MR댐퍼의 최적 위치와 용량을 결정하기 위해 유전자 알고리즘을 사용하였으며, 감쇠기에 작용되는 자기장의 강도를 조절하기 위한 제어기법으로 Clipped optimal control 기법을 사용하였다. 76층 건물에 대한 수치 모의해석으로부터 MR 감쇠기를 이용한 반응동 제어시스템이 풍하중에 의한 대형 구조물의 진동을 효율적으로 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. MR 감쇠기의 제어 능력이 대체적으로 ATMD의 기능과 유사함을 알 수 있었다. MR댐퍼의 지진하중에 대한 대형구조물의 진동제어 효능은 타 연구자에 의해 검증된 바 있으며, MR 댐퍼를 파랑하중에 대한 대형해양 구조물의 진동제어에 이용시에도, 유사한 진동저감 효과를 얻을 수 있으리라 사료된다.

## 감사의 글

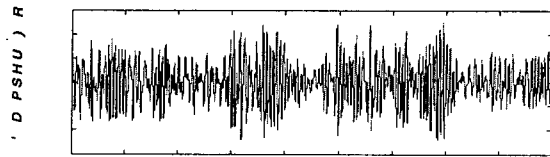
이 연구는 한국과학기술평가원(KISTEP)에서 주관하는 국가지정연구실에 대한 사업의 지원을 받아 수행되었다. 저자들은 이 연구비 지원에 감사의 뜻을 표한다.

## 참고문헌

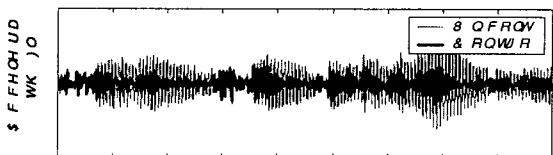
- Dyke, S.J. Spencer, B.F. Jr. Sain, M.K. & Carlson, J.D. 1998. An experimental study of MR dampers for seismic protection. *6 P D 0 DWHUL DO DQG7*: 693-703.
- Spencer, B.F. Jr Dyke, S.J. Sain, M.K. & Carlson, J.D. 1997. Phenomenological model for magneto-rheological dampers. - *R X U QD ( QJ L QHH UL QJ*: 230-238.
- Spencer, B.F. Jr Yang, G. Carlson, J.D. & Sain, M.K. 1998. *6P DU W GD PS HU V S UR WH F WLR Q RI VWVFD OH V 3 UR F R I WKH QG : R 6 WUX FWX UDO &RQDS D*
- Yang, J.N. Agrawal, A.K. Samali, B. & Wu, J.C. 2000, A benchmark problem for response control of wind-excited tall buildings. *%HQ FKP D UN 3 URE OHP 3 DF N : RUOG : LGHKWWS JUDP FLYLO IDF XO W\*



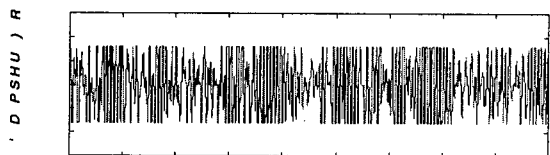
D ' L V S O D F H P H Q W



D ' D P S H U I R U F



E \$ F F H O H U D W L R Q



E ' D P S H U I R U F

) LXU 7 L P H K L V W R U L H V R I W K  
Z L W K D Q G Z L D F Y H F R

) LXU 7 L P H K L V W R U L H V R

Table 2 Peak response quantities of 76-story building with various dampers

Floor	No Control		w/ TMD		w/ ATMD		w/ MR			
	$ y_{s,i} $	$ \dot{y}_{s,i} $	$ y_{s,i} $	$ \dot{y}_{s,i} $	$ y_{s,i} $	$ \dot{y}_{s,i} $	Passive	Off	Clipped	Optimal
	cm	cm/s	cm	cm/s	cm	cm/s	cm	cm/s	cm	cm/s
30	6.8	7.1	5.6	4.6	5.1	3.3	6.2	6.0	4.8	3.5
60	22.4	20.0	17.8	12.7	16.3	8.9	20.1	17.6	15.2	8.5
75	31.6	30.3	24.8	19.8	22.7	11.6	28.4	25.9	21.2	14.0
76	32.3	31.2	25.4	20.5	23.2	15.9	29.1	26.2	21.6	13.2

Table 3 RMS response quantities of 76-story building with various dampers

Floor	No Control		w/ TMD		w/ ATMD		w/ MR			
	$s_{y_{s,i}}$	$s_{\dot{y}_{s,i}}$	$s_{y_{s,i}}$	$s_{\dot{y}_{s,i}}$	$s_{y_{s,i}}$	$s_{\dot{y}_{s,i}}$	Passive	Off	Clipped	Optimal
	cm	cm/s	cm	cm/s	cm	cm/s	cm	cm/s	cm	cm/s
30	2.25	2.02	1.48	1.23	1.26	0.90	1.89	1.71	1.17	0.77
60	7.02	6.42	4.79	3.72	4.08	2.81	6.15	5.42	3.77	2.28
75	9.92	9.14	6.75	5.38	5.74	3.34	8.67	7.72	5.29	3.52
76	10.10	9.35	6.90	5.48	5.86	4.70	8.87	7.89	5.41	3.41

Table 4 Control performance indices for various dampers

Criteria	w/ MR Dampers		w/ TMD (Yang et al. 2000)	w/ ATMD
	Passive Off	Clipped Optimal		
J	0.84	0.38	0.58	0.36
J	0.84	0.36	0.58	0.41
J	0.87	0.53	0.68	0.57
J	0.87	0.53	0.68	0.58
J	0.85	0.46	0.65	0.38
J	0.88	0.44	0.63	0.43
J	0.90	0.66	0.78	0.71
J	0.90	0.67	0.79	0.72

Table 5 Performance of MR dampers for various wind force levels

Criteria	Force Levels			
	$0.5F_{WD}$	$F_{WD}$	$1.5F_{WD}$	$2.0F_{WD}$
<i>RMS Responses</i>				
J	0.34	0.38	0.44	0.49
J	0.34	0.36	0.43	0.49
J	0.50	0.53	0.57	0.60
J	0.50	0.53	0.57	0.61
<i>Peak Responses</i>				
J	0.41	0.46	0.53	0.58
J	0.44	0.44	0.53	0.59
J	0.64	0.66	0.69	0.71
J	0.65	0.67	0.70	0.72