

실제 규모의 자기유변 유체 감쇠기를 위한 동적 모델의 개발

Development of Dynamic Model for Full-Scale Magnetorheological Fluid Damper

정형조* · Guangqiang Yang** · Billie F. Spencer, Jr.*** · 이인원****

Jung, Hyung-Jo · Guangqiang Yang · Billie F. Spencer, Jr. · Lee, In-Won

Abstract

Magnetorheological (MR) fluid dampers are one of the most promising new devices for structural vibration reduction. Because of their mechanical simplicity, high dynamic range, low power requirements, large force capacity and robustness, these devices have been shown to mesh well with application demands and constraints to offer an attractive means of protecting civil infrastructure systems against severe earthquake and wind loading. Several researchers have investigated quasi-static models of MR fluid dampers. Although useful for design of the damper, quasi-static models are not sufficient to describe the MR fluid damper behavior under dynamic loading. In this paper, a dynamic model of the overall MR fluid damper system is presented which includes two parts: (i) a dynamic model of the power supply and (ii) a dynamic model of the MR fluid damper. Previous studies have demonstrated that a current driven power supply can dramatically reduce the MR fluid damper response time. Therefore, a current driver is employed as the power supply for the MR fluid damper. This paper discusses the operating principles of the current driver, and a dynamic model is provided. Subsequently, the response analysis of the MR fluid damper is performed, and a mechanical model based on the Bouc-Wen model is proposed to predict the behavior of the damper under dynamic loading. This model accommodates the stiction phenomenon and inertial and shear-thinning effects of the MR fluids. Experimental verification has shown that the proposed dynamic model of the MR fluid damper system predicts the experimental results very well.

Keywords : MR fluid dampers, smart damping devices, hysteresis model, parameter estimation, system identification

요 지

자기유변(MR) 유체 감쇠기는 구조물의 진동을 감소시키기 위한 가장 유망하고 새로운 장치 중 하나이다. 이 장치는 기계적인 단순성, 높은 동적 범위, 적은 전력 요구량, 커다란 감쇠 능력, 강인성 등을 보유하고 있기 때문에, 토목 구조 시스템에 대한 내진(耐震) 및 내풍(耐風)을 위해서 매우 유용하다. 많은 연구자들이 자기유변 유체 감쇠기의 유사-정적 모델을 연구해왔다. 하지만 유사-정적 모델이 감쇠기를 설계하기 위해서는 유용한 모델이긴 하지만, 동적하중을 받는 감쇠기의 거동을 묘사하는 데는 충분하지 않다. 본 논문에서는, 전체 자기유변 유체 감쇠 시스템의 동적 모델을 구하기 위해서 다음과 같은 두 부분을 고려하였다: (i) 전원 공급 장치의 동적 모델, (ii) 자기유변 유체 감쇠기의 동적 모델. 기존 연구를 통해서 전류로 조절되는 전원 공급 장치가 자기유변 유체 감쇠기의 응답 시간을 현저하게 감소시킬 수 있음이 증명되었다. 이에 따라, current

*한국과학기술원 건설 및 환경공학과, 연구조교수(E-mail: hjung@mail.kaist.ac.kr)

**Doctoral Candidate, Dept. of Civil Engrg. & Geo. Sci., Univ. of Notre Dame, USA(E-mail: gyang@nd.edu)

***Linbeck Professor, Dept. of Civil Engrg & Geo. Sci., Univ. of Notre Dame, USA(E-mail: spencer@nd.edu)

****정형원 · 한국과학기술원, 건설 및 환경공학과, 교수(E-mail: iwlee@kaist.ac.kr)

driver가 자기유변 유체 감쇠기를 위한 전원 공급장치로 고려되었다. 본 논문에서는 current driver의 작동 원리가 논의되고, 동적 모델이 제안되었다. 또한, 자기유변 유체 감쇠기의 응답 해석이 수행되고, 동적하중을 받는 자기유변 유체 감쇠기의 거동을 예측하기 위하여 Bouc-Wen 모델을 기반으로 하는 역학적 모델을 제안하였다. 이 모델은 자기유변 유체의 stiction 현상과 관성 및 shear thinning 효과를 잘 묘사한다. 제안된 자기유변 유체 감쇠 시스템의 동적 모델이 실험 결과를 잘 예측함을 증명하였다.

핵심용어: 자기유변 유체 감쇠기, 스마트 감쇠 장치, 이력 모델, 매개변수 추정, 시스템 규명

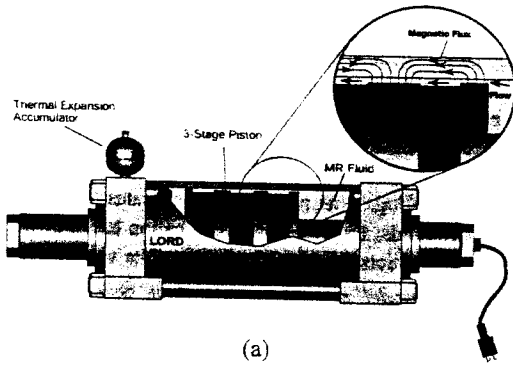
1. 서론

자기유변 유체(magnetorheological fluid)는 제어 가능한 유체(controllable fluid) 중 하나이다. 자기유변 유체의 본질적인 특성은 유체에 자기장이 가해지면 자유롭게 유동하던 선형 점성 유체가 수 백분의 일 초 사이에 제어 가능하고 항복 강도를 갖는 반고체 상태로 변환되고, 또한 그에 대한 역 변환도 가능하다는 점이다. 자기유변 유체 감쇠기는 제어 가능한 감쇠력을 제공하기 위해서 자기유변 유체를 사용한

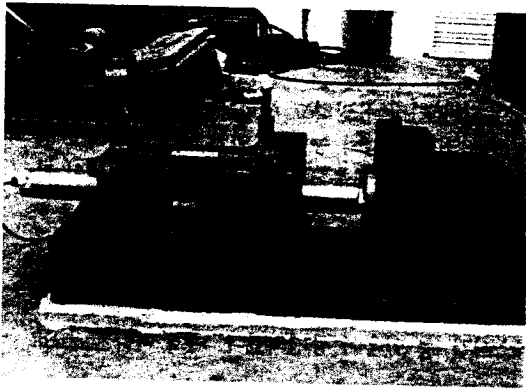
새로운 반응동 제어장치이다. 이 장치는 기계적인 단 순성(밸브가 필요 없음), 높은 동적 범위(자기유변 유체 감쇠기에 자기장을 가해줌으로써 10배 정도의 힘을 얻을 수 있음), 적은 전력 요구량(일반적으로 50 Watt 이하), 커다란 감쇠 능력, 강인성 등을 보유하고 있기 때문에, 기존 반응동 제어장치들이 갖는 기술적인 어려움의 많은 부분을 해결할 수 있다. 또한, 최근 연구결과에 의하면 자기유변 유체 감쇠기는 능동 제어시스템의 성능과 비슷한 수준까지 성능을 발휘할 수 있기 때문에, 중진과 강진 하에서 효율적으로 구조물의 응답을 감소시킬 수 있다(Dyke *et al.* 1996; Jansen & Dyke 2000; Johnson *et al.* 2001; Spencer *et al.* 2000).

토목공학 분야에 자기유변 유체 감쇠기를 응용하기 위하여 최대 20톤 용량의 감쇠기가 설계되고 제작되었다(Spencer *et al.* 1998). 그림 1(a)는 본 연구에서 사용한 자기유변 유체 감쇠기의 개략적인 모습을 보여 주고 있다. 감쇠기는 20.3 cm의 내경, ± 8 cm의 스트로크, 1 m의 길이 및 250 kg의 질량을 가지고 있다. 감쇠기는 5 리터 정도의 자기유변 유체를 담고 있다. 어떤 주어진 순간에 자기장에 의해 활동하는 유체의 양은 대략 90 cm^3 이다. 전자기 코일(electromagnetic coils)은 피스톤의 세 부분에 나뉘어져 감겨있고(3-Stage Piston), 그림 1(a)에서 볼 수 있듯이 유체가 피스톤을 통과할 때 네 부분에서 오리피스(orifice) 효과를 얻을 수 있다. 코일은 총 1.5 km가량의 wire로 이루어져 있다. 직렬로 고려한다면 전체 코일은 인덕턴스 $L_0=6.6 \text{ H}$ 와 저항 $R_0=21.9 \Omega$ 을 갖는다. 그림 1(b)는 미국 University of Notre Dame에 설치된 20톤 용량의 자기유변 유체 감쇠기를 위한 실험장치를 나타낸다.

자기유변 유체 감쇠기에 대한 유사-정적 모델은 많은 연구자들에 의해 연구되었다(Gavin *et al.* 1996a; Kamath *et al.* 1996; Makris *et al.* 1996;



(a)



(b)

그림 1 (a) 20톤 용량의 자기유변 유체 감쇠기의 개략도; (b) 실험 장치

Spencer et al. 1998; Wereley & Pang 1998; Yang et al. 2002). 이 모델이 자기유변 유체 감쇠기의 설계에 유용하다고 하더라도, 동적 하중을 받는 자기유변 유체 감쇠기의 비선형 거동, 특히 비선형 저항력-속도 거동을 묘사하는 데는 충분하지 않다. 본 논문에서는, 자기유변 유체 감쇠기 시스템의 동적 모델을 두 부분, 즉 전원 공급장치의 동적 모델과 자기유변 유체 감쇠기의 동적 모델로 나누었다. 기존 연구에서 current driver가 자기유변 유체 감쇠기의 응답 시간을 현저하게 감소시킨다는 결과를 보여주었다. 따라서, current driver가 자기유변 유체 감쇠기에 전류를 제공할 전원 공급장치로 채택되었다. 또한, current driver의 동작 원리가 토의되고 동적 모델이 제안되었다. 자기유변 유체 감쇠기의 응답 해석에 기반을 두고, 감쇠기의 동적 거동을 예측하기 위하여 Bouc-Wen 모델을 이용한 역학적 모델을 제안하였다. 이 모델은 감쇠기의 저항력에 대한 자기유변 유체의 stiction 현상과 판성 및 shear thinning 효과를 잘 나타낸다. 제안된 자기유변 유체 감쇠 시스템의 동적 모델이 실험 결과를 잘 예측함을 실험 결과와의 비교를 통해 증명하였다.

2. Current Driver의 동적 모델

자기유변 유체감쇠기의 전자기 회로(또는 감쇠기 코일)는 그림 2와 같이 저항과 인덕터가 직렬로 연결된 전기적 회로망을 사용하여 구현할 수 있다(Yang et al. 2002). 코일에서 전류를 지배하는 방정식은 다음과 같다:

$$L \frac{d}{dt} i(t) + R_L i(t) = V(t) = V_H \frac{T_{on}}{T} \quad (1)$$

여기서 L 과 R_L 는 각각 코일 인덕턴스와 저항; V_H 는 bus 전압; T_{on}/T =duty cycle; 그리고 $V=V_H(T_{on}/T)$ 는 PWM 증폭기의 등가 출력 전압이다. 일정한 duty cycle T_{on}/T 를 가정하면, 식 (1)의 해는 다음과 같다:

$$i(t) = \frac{V_H T_{on}}{R_L T} \left(1 - e^{-\frac{R_L t}{L}} \right) = I_s \left(1 - e^{-\frac{R_L t}{L}} \right) \quad (2)$$

식 (2)는 전류가 최종값 I_s 의 95%에 도달할 때 까지 소요되는 시간이 거의 $3L/R_L$ 초가 필요함을 의미한다.

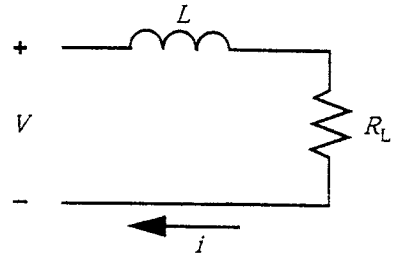


그림 2 전자기 회로의 단순 모델

이러한 지수 응답은 많은 실제적인 응용에 있어서 불충분하다. 또한, 전력선 전압 (power line voltage)의 변동은 bus 전압 V_H 에 영향을 미친다. 이것은 코일에 있는 정상상태 전류 I_s 에 영향을 주게 되고 결과적으로 감쇠기의 저항력에 영향을 미친다.

자기유변 유체 감쇠기의 자기 회로의 응답 시간을 감소시키기 위해서는 다양한 접근 방법을 고려할 수 있다. 그 중 하나는 전압으로 조절되는 전원 공급장치 대신에 current driver를 사용하는 것이다. PWM 서보 증폭기를 기반으로 하는 current driver의 개략도와 그것의 전달 함수 블록 다이어그램은 그림 3에 나타내었다. 오차가 없는 제어 결과를 얻기 위해서, PI 제어가 일반적으로 사용된다. duty cycle이 제어기 출력 u_c 과 비례하고 u_c 는 포화되지 않는다고 가정하면, 식 (1)과 피드백 루프를 나타내는 다음 식

$$V(t) = \alpha V_H \left[K_i \int_0^t (v_0 - \beta i) dt + K_p (v_0 - \beta i) \right] \quad (3)$$

은 아래 식 (4)와 같은 current driver를 위한 지배 방정식을 얻기 위해 조합된다:

$$\frac{L}{\beta \gamma} \frac{d^2}{dt^2} + \frac{(R_L + \beta \eta)}{\beta \gamma} \frac{di}{dt} + i = \frac{v_0}{\beta} + \frac{\eta}{\beta \gamma} \frac{dv_0}{dt} \quad (4)$$

여기서 $\gamma = \alpha K_i V_H$; $\eta = \alpha K_p V_H$; v_0 =기준 입력 신호; β =전류 감지 민감도; 그리고 K_p K_i =제어기의 비례 및 적분 이득. 그러면 정상상태 전류는

$$I_s = \frac{v_0}{\beta} \quad (5)$$

이것은 단지 입력 기준 신호 v_0 와 전류 감지 민감도 β 에만 의존한다. 하중 저항 R_L 과 bus 전압 V_H 은 정상상태 전류에 대한 아무런 영향을 갖지 않는다.

그림 4는 계단 기준 신호(step reference signal)에 대한 전형적인 current driver의 응답을 보여준다. 최

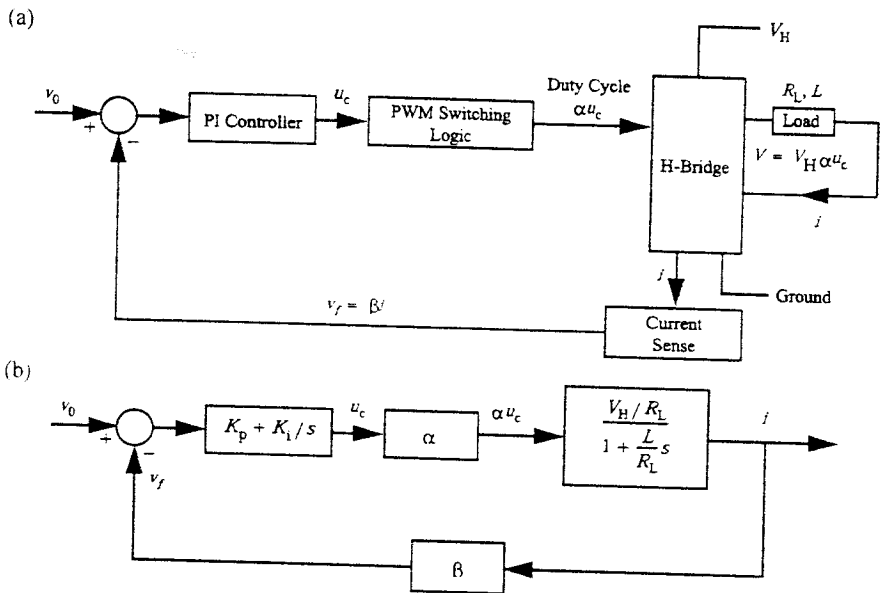


그림 3 (a) PWM 서보 증폭기에 기반을 둔 current driver의 개략도; (b) current driver의 전달 함수

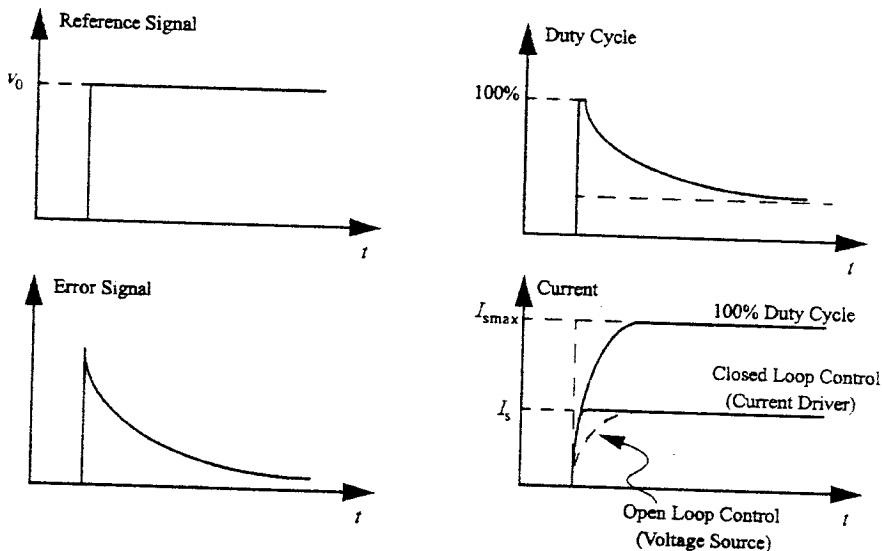


그림 4 계단 기준 신호에 의한 current driver의 응답

적의 성능을 얻기 위해서, 상대적으로 큰 비례 이득 (proportional gain)이 사용된다. 따라서, 오차 신호가 클 때, 제어기 출력 u_c 은 응답의 초기 부분에서 포화된다. 전원 공급장치는 전류 증가를 촉진하기 위해서 최대 전압을 적용한다, 그리고 전류는 식 (1)에 의해 지배된다. 전류가 증가함에 따라, 오차 신호는 감소한다. 제어기 출력 u_c 은 더 이상 포화되지 않는다, 그리고 전류는 식 (4)에 의해 지배된다. 제어기는 전류를

정상상태 전류 v_0/β 로 조정한다. 전압 소스(voltage source)를 사용한 지수 전류 응답과 비교하면, current driver는 그림 4에서 쉽게 알 수 있듯이 전류 응답 시간을 현저하게 감소시켰다.

Current driver의 효과를 실험적으로 검증하기 위해서, 일정 전압(constant voltage) 전원 공급장치와 current driver에 의해 발생하는 계단 입력 신호에 의한 20톤 용량 자기유변 유체 감쇠기의 코일(직렬 연

결)에 흐르는 전류를 비교하였다. 실험 결과는 그림 5에 나타내었다(Yang et al. 2000). 20톤 규모 자기유변 유체 감쇠기에서 직렬로 연결된 코일에 대한 시간 상수 L_0/R_0 는 0.3초이다. 따라서, 그림 5에서 보는 바와 같이, 전류가 최종값의 95%에 도달하는 데 소요

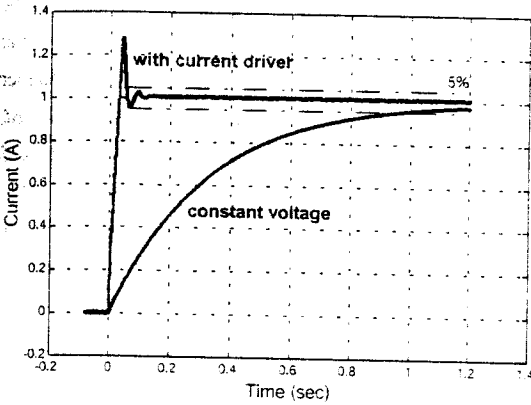


그림 5 일정 전압에 의해 조절되는 코일 전류와 current driver에 의한 코일 전류와의 비교

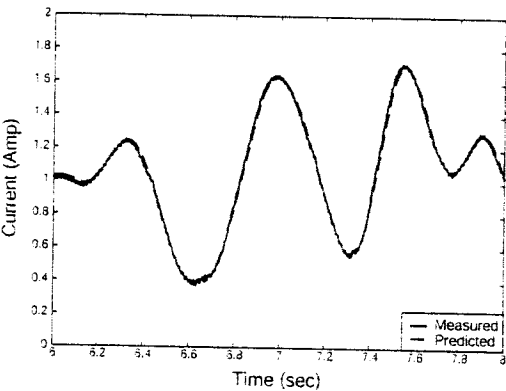
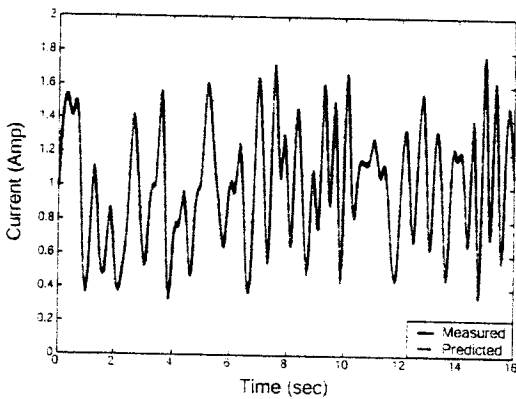


그림 6 (a) 측정 전류와 예측 전류의 비교; (b) 전류가 빠르게 변하는 영역에서의 자세한 비교

되는 시간은 대략 1초이다. 반면에 current driver를 사용하면, 5% 오차 범위는 0.06초 이내로 도달한다. Current driver는 직류 전원 공급 장치(±120 V)와 Advanced Motion Controls에서 전류 모드에서 작동하도록 제작된 PWM 서보 증폭기로 구성된다. Current driver는 응답 시간의 현저한 감소를 제공하기 때문에, 본 논문에서는 전원 공급장치로 current driver를 채택하였다.

식 (4)를 기초로 하여, 실험에서 사용된 current driver의 동적 모델을 규명하였다. Current driver에서 입력 기준신호 v_0 와 전류 i 사이의 전달 행렬은 다음과 같다:

$$i(s) = \frac{1001.45s + 1016.1}{s^2 + 503.7s + 508.05} v_0(s) \quad (6)$$

그림 6에서 측정된 전류와 예측된 전류를 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이 전류가 빠르게 변화하는 영역에서도 두 값이 매우 잘 일치하였다.

3. 자기유변 유체 감쇠기의 동적 모델

3.1 자기유변 유체 감쇠기의 응답 해석

감쇠기의 응답은 그림 7에서 보는 바와 같이 기본적으로 세 영역으로 나눌 수 있다. 영역 I의 초기 부분에서, 속도는 음수에서 양수로 부호가 변하고 값은 매우 작으며 MR 유체는 주로 선-항복(pre-yield) 영역에서 작동한다. MR 유체는 유동하지 않으며 매우 작은 탄성 변형을 보인다. 감쇠력이 항복 수준을 넘어서면, MR 유체의 stiction 현상에 의해 선-항복 영

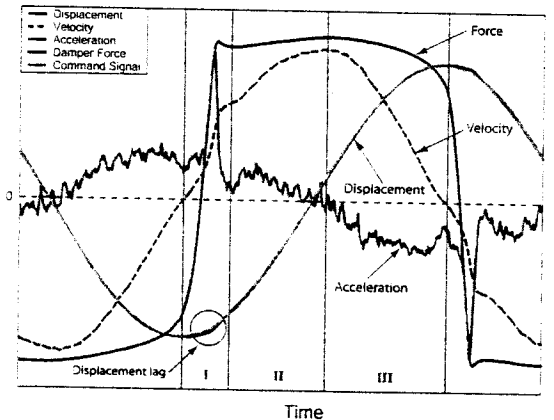
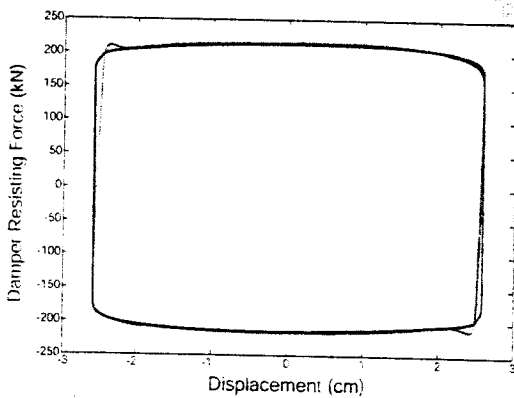
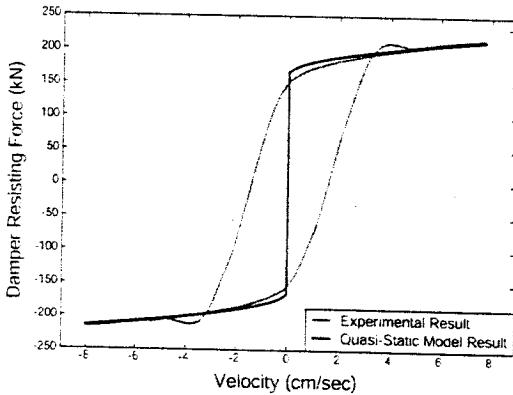


그림 7 자기유변 유체 감쇠기의 응답 해석



(a) 힘 vs. 변위



(b) 힘 vs. 속도

그림 8 1 인치, 0.5 Hz의 사인파형의 변위 가진과 2A 입력 전류 하에서 유사-정적 모델과 실험 결과의 비교

역에서 후-항복 영역으로 전이되는 동안에 감쇠력 손실이 발생한다. 이 현상이 힘 곡선에서 overshoot 형태의 거동을 일으킨다. 서보 제어기는 변위 피드백을 사용하기 때문에, 감쇠기 운동을 촉진하기 위해 제어기는 밸브를 크게 open하라고 명령하기 쉽다, 따라서, 상당한 가속도의 증가가 관측된다. MR 유체가 항복한 후에, 유체는 유동하기 시작한다. 영역 I의 종단부에서 보는 바와 같이 가속도는 정상 수준으로 감소한다. 저항력의 over shoot에는 유체의 관성효과도 영향을 미치는 것으로 예상된다. 영역 II에서, 속도는 양의 값을 나타내며 증가를 계속한다. 따라서, 소-점성력이 증가하고 저항력의 미세한 증가가 관측된다. 영역 III에서, 속도는 감소한다. 감쇠기의 속도는 이 영역의 종단부에서 0에 근접하며 유체의 shear thinning 효과 때문에 소성 점성력이 급격하게 감소한다. 그런

가답에, 힘의 roll-off가 관측된다. 따라서, 그림 8(b)와 같은 힘-속도 그래프에서 두개의 시계 방향의 루프가 최대 속도 부근에서 나타난다.

3.2 자기유변 유체 감쇠기의 동적 모델

자기유변 유체 감쇠기에 대한 유사-정적 모델은 많은 연구자들에 의해 연구되었다(Gavin *et al.* 1996a; Kamath *et al.* 1996; Makris *et al.* 1996; Spencer *et al.* 1998; Wereley & Pang 1998; Yang *et al.* 2002). 그림 8은 자기유변 유체 감쇠기가 1인치 0.5 Hz의 사인파형 변위 가진과 2A의 입력 전류를 받을 때의 유사-정적 모델과 실험결과를 비교하고 있다. 유사-정적 모델은 감쇠기의 힘-변위 거동을 잘 묘사한다. 하지만, 실험 자료에서 관측되는 비선형 힘-속도 거동을 묘사하는 데는 충분하지 않다. 감쇠기의 거동을 표현하고 감쇠기를 갖는 구조물의 진동제어를 모의 실험하기 위해서는 좀더 정확한 모델이 필요하다.

제어가능한 유체 감쇠기의 동적 모델은 크게 두 가지로 구분되어 연구되었다: 무-매개변수 모델과 매개변수 모델. Ehrgott & Masri(1992)와 Gavin *et al.* (1996b)은 감쇠기의 변위와 속도 정보를 이용해서 감쇠기의 저항력을 예측하기 위해 Chevychev 다항식을 도입한 무-매개변수 접근법을 제안했다. Chang & Roschke(1998)는 자기유변 유체 감쇠기의 동적 거동을 모사하기 위해서 인공 신경망을 개발했다. 그러나, 무-매개변수 감쇠기 모델은 매우 복잡하다는 단점을 가지고 있다. Gamato & Filisko(1991)는 Bingham 모델에 기반을 둔 매개변수 점탄성-소성 모델을 제안했다. Wereley *et al.*(1998)은 선-항복 이력(pre-yield hysteresis)을 개선시킨 비선형 모델을 확장하여 비선형 이력 양(兩)점성(nonlinear hysteretic biviscous) 모델을 개발하였다. Spencer *et al.*(1997)는 Bouc-Wen 모델에 기반을 둔 역학적 모델을 제안하였다. 이 모델은 피스톤과 실린더 사이에서 발생하는 유체의 누출 등에 의한 저속도 영역에서의 힘의 roll-off를 잘 묘사한다. 그럼에도 불구하고, 위에서 언급한 모든 매개변수 모델은 저속도 영역에서 유체의 stiction 현상과 관성 및 shear thinning 효과를 고려하지 못하는 단점을 가지고 있다.

3.1 절에서 보여준 감쇠기의 응답 해석을 기반으로 하여, shear thinning 및 관성 효과와 stiction 현상을 고려한 역학적 모델이 그림 9와 같이 제안되었다. 감

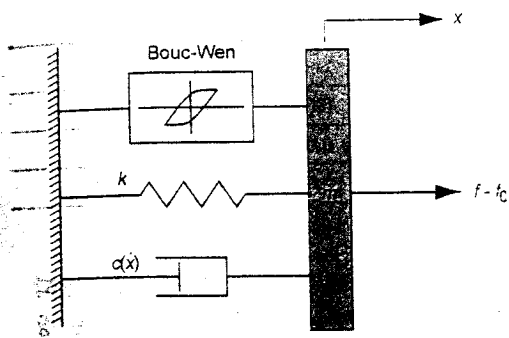


그림 9 자기유변 유체 감쇠기의 제안된 역학적 모델

쇠기의 저항력은 다음과 같이 구해진다.

$$f-f_0 = \alpha z + kx + c(x)\dot{x} + m\ddot{x} \quad (7)$$

여기서 변수 z 는

$$\dot{z} = -\gamma|z|\dot{x}|z|^{n-1} - \beta\dot{x}|z|^n + A\dot{x} \quad (8)$$

이 모델에서, 유체의 stiction 현상 및 관성 효과는 등가 질량에 의해 표현되고 accumulator의 강성은 k , 측정 바이어스(bias) 및 감쇠기의 밀봉(seal)에 의한

마찰력은 f_0 ; 그리고 항복 후 소성 감쇠 계수는 $c(\dot{x})$ 로 표현된다. 실험 결과로부터 관측되는 저속 구간에서의 감쇠기의 저항력에 대한 shear thinning 효과를 위해서, $c(\dot{x})$ 는 속도의 절대값 $|\dot{x}|$ 에 대하여 단조감소하는 함수이다. 본 논문에서는, 항복 후 감쇠계수를 다음과 같은 형태로 가정하였다:

$$c(\dot{x}) = a_1 e^{-(a_2|\dot{x}|)^p} \quad (9)$$

여기서 a_1 , a_2 및 p 는 양의 상수이다.

제안된 역학적 모델 이외에도, 본 연구에서는 Bouc-Wen 모델에 기반을 둔 2개의 다른 동적 모델을 고려하였다. 하나는 질량 요소를 갖는 단순 Bouc-Wen 모델이다. 이 모델에서 감쇠 계수는 상수(constant)이다. 다른 하나는 Spencer *et al.*(1997)에 의해 제안된 역학적 모델에 질량 요소를 추가한 것이다. 자기유변 유체감쇠기의 거동을 예측하는 능력을 추정하기 위해서, 이상의 세가지 동적 모델에 대해서 1인치 0.5 Hz의 사인파형 변위 가진과 2A의 입력전류에 대한 감쇠기의 응답을 고려하였다. 예측 결과와 실

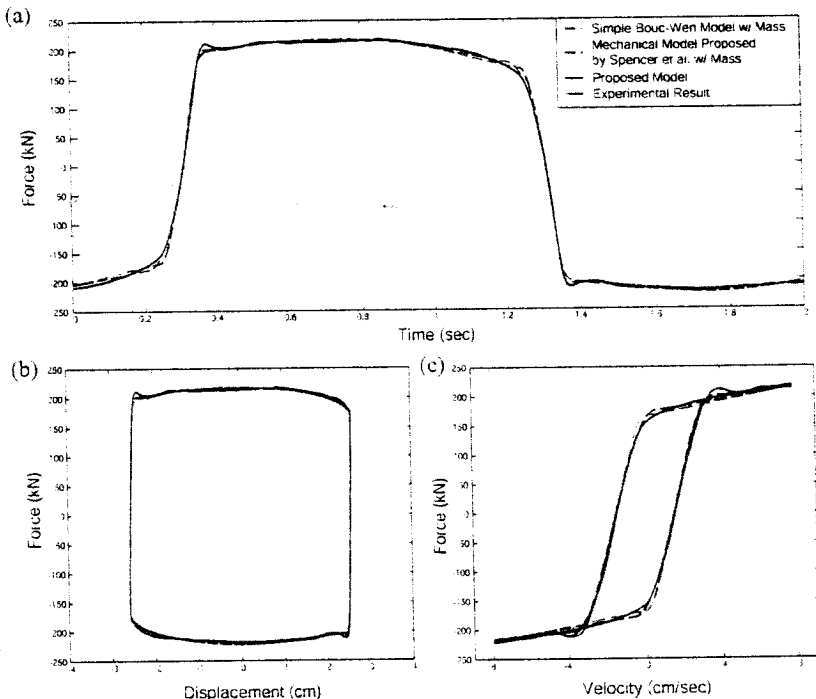


그림 10 다양한 동적 모델의 경우에 감쇠기의 예측 응답과 실험으로부터 얻어진 응답의 비교
(a) 힘 vs. 시간; (b) 힘 vs. 변위; (c) 힘 vs. 속도

표 1 자기유변 유체 감쇠기의 동적 모델의 오차 정규모델

모델	E_t	E_x	$E_{x\&}$
관성효과를 고려한 단순 Bouc-Wen 모델	0.0338	0.00551	0.0170
관성효과를 고려한 Spencer <i>et al.</i> (1997)의 모델	0.0246	0.00407	0.0128
제안 모델	0.0171	0.00308	0.0089

험 자료의 비교는 그림 10에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이, 모든 모델이 감쇠기의 힘-변위 거동을 잘 묘사한다. 그러나, 단순한 Bouc-Wen 모델은 저속도 영역에서의 힘의 roll-off를 묘사하는데 실패했다. Spencer *et al.* (1997)에 의해 제안된 역학적 모델은 힘의 roll-off를 묘사하기 위해서 두개의 다른 감쇠 계수를 이용한다. 하나는 높은 속도 영역에서 사용되고 다른 하나는 낮은 속도 영역에서 사용된다. 그림에서 보는 바와 같이, 이 모델은 단순한 Bouc-Wen 모델에 비해 약간의 개선을 보여주고 있다. 제안된 역학적 모델은 유체의 shear thinning 효과에 의한 힘의 roll-off를 묘사하기 위해서 단조감소하며 변화하는 감쇠 계수를 도입하였다. 그것은 저속도 영역에서의 힘의 roll-off와 고속도 영역에서의 두개의 시간 방향으로의 루프를 포함한 모든 영역에서 감쇠기의 거동을 매우 잘 묘사한다. 제안된 역학적 모델을 위한 매개변수들은 다음과 같이 선정되었다: $\alpha = 927570 \text{ N}$, $n = 2.7755$, $\gamma = 31778 \text{ m}^{-1}$, $\beta = 21.637 \text{ m}^{-1}$, $A = 217.27 \text{ m}^{-1}$, $k = 486250 \text{ N/m}$, $a_1 = 3308891 \text{ N}\cdot\text{sec/m}$, $a_2 = 24.9054 \text{ sec/m}$, $p = 0.5403$, $m = 59999 \text{ kg}$, and $f_0 = -1377.32 \text{ N}$.

그림 10과 같은 정성적인 비교와 더불어서, 각 모델과 실험 결과 간의 오차에 대한 정량적인 연구 또한 수행되었다. 여기서 고려한 각각의 모델에 대해서, 예측한 힘과 측정된 힘 사이의 오차는 완전한 1사

이를 동안에 시간, 변위 및 속도의 함수로 계산되었다. 오차 정규를 계산하기 위하여 다음과 같은 방정식이 사용되었다(Spencer *et al.* 1997)

$$E_t = \frac{\epsilon_t}{\sigma_f}, E_x = \frac{\epsilon_x}{\sigma_f}, E_{x\&} = \frac{\epsilon_{x\&}}{\sigma_f} \quad (10)$$

여기서

$$\begin{aligned} \epsilon_t^2 &= \frac{1}{T} \int_0^T (f_{\text{exp}} - f_{\text{pre}})^2 dt, \quad \epsilon_x^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (f_{\text{exp}} - f_{\text{pre}})^2 \left| \frac{dx}{dt} \right| dt \\ \epsilon_{x\&}^2 &= \frac{1}{T} \int_0^T (f_{\text{exp}} - f_{\text{pre}})^2 \left| \frac{dx}{dt} \right| dt \\ \sigma_f^2 &= \frac{1}{T} \int_0^T (f_{\text{exp}} - \mu_F)^2 dt \end{aligned} \quad (11)$$

오차 정규는 표 1에 나타내었다. 모든 경우에 대해서, 제안된 역학적 모델로부터 계산된 오차 정규가 다른 모델에 비해서 더 작은 값은 나타내었다. 이것은 제안된 모델이 실제 규모의 자기유변 유체 감쇠기에 대해서 다른 모델보다 동적 거동을 보다 잘 묘사할 수 있음을 나타낸 것이다.

3.3 변동 전류를 위한 일반화

이전까지의 논의는 일정한 전류 즉 일정한 자기장이 가해질 때의 자기유변 유체 감쇠기의 응답을 기반으로 했다. 그러나, 이러한 장치를 사용하는 제어 시

표 2 랜덤 변위 가진의 다양한 전류 수준에 따른 감쇠기의 다양한 매개변수

전류 (A)	$\alpha(10^5 \text{ N})$	$a_1(10^5 \text{ N}\cdot\text{sec/m})$	$a_2 \text{ (sec/m)}$	$m(\text{kg})$	n	$f_0(\text{N})$
0.0237	1.3612	4349	862.03	3000	1.000	1465.82
0.2588	2.2245	24698	3677.01	11000	2.0679	2708.36
0.5124	2.3270	28500	3713.88	16000	3.5387	4533.98
0.7625	2.1633	32488	3849.91	18000	5.2533	4433.08
1.0132	2.2347	24172	2327.49	19500	5.6683	2594.41
1.5198	2.2200	38095	4713.21	21000	6.7673	5804.24
2.0247	2.3002	35030	4335.08	22000	6.7374	5126.79

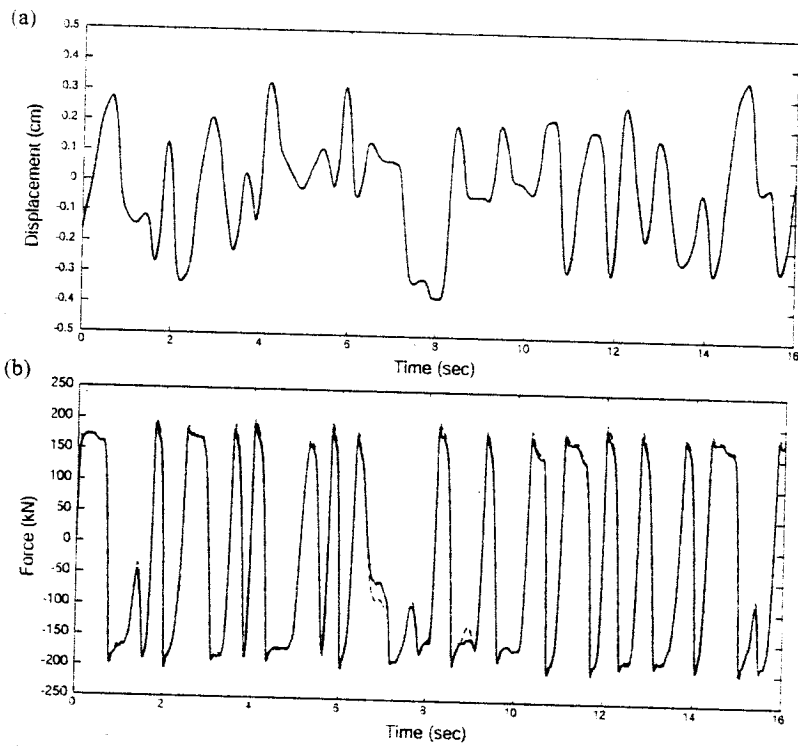


그림 11 랜덤 변위와 2A 입력 전류 하에서 감쇠기의 예측 응답과 실험으로부터 얻어진 응답의 비교. (a) 변위 vs. 시간; (b) 힘 vs. 시간

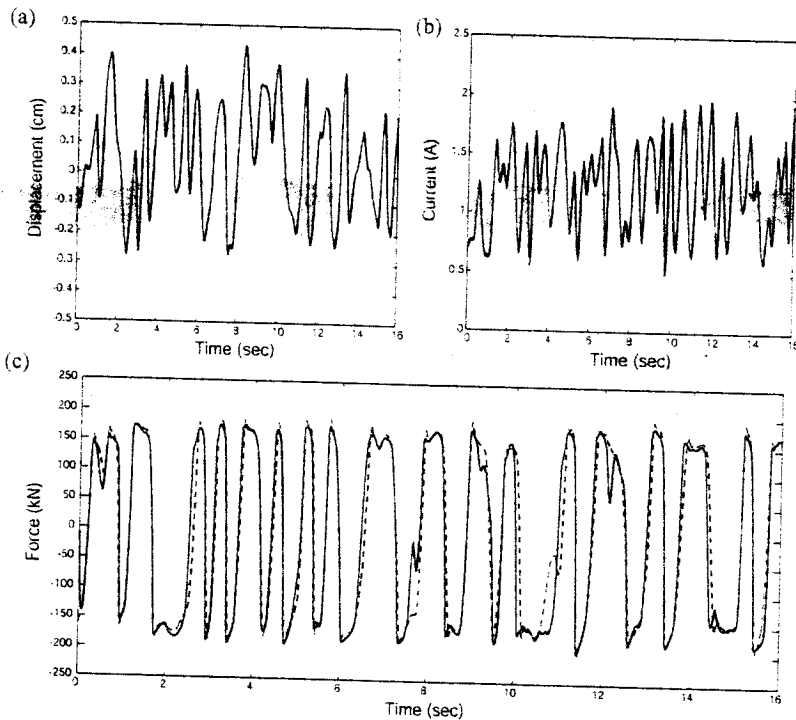


그림 12. 랜덤 변위와 랜덤 입력 전류 하에서 감쇠기의 예측 응답과 실험으로부터 얻어진 응답의 비교. (a) 변위 vs. 시간; (b) 입력 전류 vs. 시간; (c) 힘 vs. 시간

스텝의 최적 성능은 자기장이 시스템의 측정된 응답을 기반으로 하여 연속적으로 변할 때 얻어질 것으로 예상된다. 이런 식으로 감쇠기를 사용하기 위해서, 변동하는 전류에 대해서도 자기유변 유체 감쇠기의 거동을 예측할 수 있는 모델을 개발해야만 한다.

변동 입력 전류 하에서도 유용한 모델을 결정하기 위해서는, 매개변수들의 입력 전류에 대한 함수 의존성(functional dependence)이 결정되어야만 한다. 유체의 항복 전압은 입력 전류에 의존하기 때문에, α 는 입력 전류 i 의 함수로 가정할 수 있다. 또한, 실험 결과로부터 a , m , n , 및 f_0 도 입력전류의 함수임을 알 수 있다.

입력 전류와 감쇠 매개변수 α , a , m , n , f_0 간의 관계식을 얻기 위해서, 감쇠기는 일정한 전류 수준에서 2 Hz의 cutoff 주파수를 갖는 랜덤 변위 가진에 의해 조종된다. Trust-region과 preconditioned conjugated gradients(PCG) 방법에 기반을 둔 한정된 비선형 최소-자승(constrained nonlinear least-squares) 최적화 기법이 사용된다. 결과는 표 2에 나타내었다. 입력 전류에 따라 변하지 않는 감쇠 매개변수들의 값은 다음과 같다: $\gamma = 25179.04 \text{ m}^{-1}$, $\beta = 27.1603 \text{ m}^{-1}$, $A = 1377.9788 \text{ m}^{-1}$, $k = 20.1595 \text{ N/m}$, and $p = 0.2442$.

자기유변 유체가 유동학적 평형상태에 이르는 것을 묘사하는 동역학(dynamics)은 다음과 같은 1st-order Filter를 통해 표현된다.

$$H(s) = \frac{31.4}{s + 31.4} \quad (13)$$

그림 11은 2 A의 일정 입력 전류에 있어서 도의 실험된 저항력과 실험 자료를 비교한 것이다. 이 테스트에서, 일정한 전류 수준에서 2 Hz의 cutoff 주파수를 갖는 랜덤 변위 가진에 의해 조절된다. 그림에서 볼 수 있듯이, 모델은 감쇠기의 거동을 정확하게 예측한다. 오차정규는 다음과 같다: $E_r = 0.09551$, $E_x = 0.00851$, and $E_y = 0.02607$.

또한, 예측된 저항력을 감쇠기에 변동 전류가 입력되었을 때의 실험 자료와 비교하였다. 이전 테스트와 마찬가지로, 제한된 락을 갖는 랜덤 변위 가진을 적용하였다. 변위 가진과 입력 전류는 그림 12에서 본 바와 같다. 다시 한 번, 실험 결과와 모델 응답의 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 이 테스트의 오차 정규는 다음과 같다: $E_r = 0.035517$, $E_x = 0.03257$, and $E_y = 0.10118$.

4. 결 론

자기유변(MR) 유체 감쇠기는 많은 실제 응용 분야에서 효과적인 반동동 제어가 가능한 기술 수준을 제공한다. 20톤 용량의 감쇠기는 현재 설계되고 건설되는 실제 크기의 구조물 문제에 반동동 감쇠를 제공할 수 있는 능력을 갖는다.

본 논문에서는 Bouc-Wen 이력 모델에 기반을 둔 역학적 모델이 자기유변 유체 감쇠기의 동적 거동을 묘사하기 위하여 제안되었다. 이 모델은 실험 자료에서 관측된 유체의 shear thinning과 관성 효과 및 stiction 현상을 고려하였다. 또한, current driver가 자기유변 유체 감쇠기의 응답 시간을 현저하게 감소시킬 수 있음을 보였다. Current driver의 작동 원리를 논의하고 그 장치의 동적 모델을 제안하였다. 이 동적 모델은 전원 공급장치를 포함한 전체 자기유변 유체 감쇠기 시스템의 동적 모델을 얻기 위하여 자기유변 유체 감쇠기의 역학적 모델과 결합되었다. 실험을 통해 얻어진 결과를 제안한 역학적 모델을 가지고 수치 모의 실험한 결과와 비교하여, 서로 매우 잘 일치함을 확인하였다.

감사의 글

저자는 본 연구를 지원해 준 1999년도 학술진흥재단 박사후 연수과정지원사업, 국가지정연구실 사업(사업명: 구조물의 내진 제어), 미국 과학재단(Grant No: CMS 99-00234, Program Director: S.C. Liu 박사) 및 LORD Corporation의 J.D. Carlson 박사에게 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- Chang, C.C. & Roschke, P. (1998) Neural network modeling of a magnetorheological damper. *J. of Intelligent Material Systems and Structures*, 9, 755-764.
- Dyke, S.J., Spencer Jr., B.F., Sain, M.K. & Carlson, J.D. (1996) Modeling and control of magneto-rheological dampers for seismic response reduction. *Smart Materials and Structures*, 5, 565-575.
- Ehrgott, R.C. & Masri, S.F. (1992) Modeling the oscillatory dynamic behavior of electrorheological materials in shear. *Smart Materials and Structures*, 1, 275-285.
- Gamota, D.R. & Filisko, F.E. (1991) Dynamic mechanical

- studies of electrorheological materials: moderate frequencies. *J. of Rheology*, 35, 399-425.
- Gavin, H.P., Hanson, R.D. & Filisko, F.E. (1996a) Electrorheological dampers, part 1: analysis and design. *J. of Applied Mechanics*, ASME, 63(9), 669-675.
- Gavin, H.P., Hanson, R.D. & Filisko, F.E. (1996b) Electrorheological dampers, part 2: testing and modeling. *J. of Applied Mechanics*, ASME, 63(9), 676-682.
- Jansen, L.M. & Dyke, S.J. (2000) Semiactive control strategies for MR dampers: comparative study. *J. of Engineering Mechanics*, ASCE, 126(8), 795-803.
- Johnson, E.A., Baker, G.A., Spencer Jr., B.F. & Fujino, Y. (2001) Semiactive Damping of Stay Cables. *J. of Engineering Mechanics*, ASCE, accepted.
- Kamath, G.M., Hurt, M.K. & Wereley, N.M. (1996) Analysis and testing of Bingham plastic behavior in semiactive electrorheological fluid dampers. *Smart Materials and Structures*, 5, 576-590.
- Makris, N., Burton, S.A., Hill, D. & Jordan, M. (1996) Analysis and design of ER damper for seismic protection of structures. *J. of Engineering Mechanics*, ASCE, 122(10), 1003-1011.
- Spencer Jr., B.F., Dyke, S.J., Sain, M.K. & Carlson, J.D. (1997) Phenomenological model of a magneto-rheological damper. *J. of Engineering Mechanics*, ASCE, 123(3), 230-238.
- Spencer Jr., B.F., Yang, G., Carlson, J.D. & Sain, M.K. (1998) Smart' dampers for seismic protection of structures: a full-scale study. *Proc. 2nd World Conference on Structural Control*, Kyoto, Japan. 417-426.
- Spencer Jr., B.F., Johnson, E.A. & Ramallo, J.C. (2000) Smart' isolation for seismic control. *JSME International Journal*, JSME, 43(3), 704-711.
- Stanway, R., Sproston, J.L. & Stevens, N.G. (1987) Non-linear modelling of an electro-rheological vibration damper. *J. of Electrostatics* 20, 167-184.
- Wereley, N.M. & Pang, L. (1998) Nondimensional analysis of semi-active electrorheological and magnetorheological dampers using approximate parallel plate models. *Smart Materials and Structures*, 7, 732-743.
- Wereley, N.M., Pang, L. & Kamath, G.M. (1998) Idealized hysteresis modeling of electrorheological and magnetorheological dampers. *J. of Intelligent Material, Systems and Structures*, 9(8), 642-649.
- Yang, G., Ramallo, J.C., Spencer Jr., B.F., Carlson, J.D. & Sain, M.K. (2000) Large-scale MR fluid dampers: dynamic performance considerations. *Proc. International Conference on Advances in Structure Dynamics*, Hong Kong, China. 341-348.
- Yang, G., Spencer Jr., B.F., Carlson, J.D. & Sain, M.K. (2002) Large-scale MR fluid dampers: modeling, and dynamic performance considerations. *Engineering Structures*, 30(3), 309-323.

(접수일:2001.11.8/심사일:2002.2.22/심사완료일:2002.3.13)