

대용량 20톤 MR 유체 감쇠기의 새로운 동적 모델

New Dynamic Model of Large-Scale 20-Ton MR Fluid Damper

정형조* 최강민** Yang, Guangqiang*** Spencer, Billie F., Jr.+ 이인원**
Jung, Hyung-Jo Choi, Kang-Min Yang, Guangqiang Spencer, Billie F., Jr. Lee, In-Won

ABSTRACT

MR 유체 감쇠기는 구조물의 진동을 감소시키기 위한 가장 유망하고 새로운 제진(制振) 장치 중 하나이다. 이 장치는 기계적인 단순성, 높은 동적 범위, 적은 전력 요구량, 커다란 감쇠 능력, 강인성 등의 장점을 가지고 있기 때문에, 토목 구조 시스템의 내진(耐震) 및 내풍(耐風) 성능을 향상시키는데 매우 유용하다. 많은 연구자들이 MR 유체 감쇠기의 유사-정적 모델을 연구했지만 그 모델이 감쇠기의 설계를 위해서는 유용하다고 하더라도, 동적 하중에 대한 감쇠기의 거동을 모사하는 데는 충분하지 않다. 본 논문에서는 대용량 20톤 MR 유체 감쇠기의 동적하중에 대한 응답 해석 결과를 이용하여, Bouc-Wen 모델을 기반으로 하는 새로운 역학적 모델을 제안하였다. 이 모델은 MR 유체의 stiction 현상과 관성 및 shear thinning 효과를 잘 묘사한다. 또한, 제안된 MR 유체 감쇠기의 동적 모델이 실험 결과와 매우 잘 일치함을 보였다.

1. 서론

MR (magnetorheological) 유체는 제어 가능한 유체 (controllable fluid) 중 하나이다. MR 유체의 본질적인 특성은 자기장이 유체에 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. MR 유체 감쇠기는 제어 가능한 감쇠력을 제공하기 위해서 MR 유체를 사용한 새로운 반능동 장치이다. 이 장치는 기존 반능동 장치들이 갖는 기술적인 어려움의 많은 부분을 해결할 수 있다. 또한, 최근 연구결과에 의하면 MR 유체 감쇠기는 능동제어 시스템의 성능과 비슷한 정도의 성능까지 얻을 수 있기 때문에 중진과 강진 하에서 효율적으로 구조물의 응답을 감소시킬 수 있음을 알 수 있다 (Dyke et al. 1996; Jansen and Dyke 2000; Spencer et al. 2000).

토목공학 분야에 MR 유체 감쇠기를 응용하기 위하여 최대 20톤 용량의 감쇠기가 설계되고 제작되었다. 그림 1(a)는 본 연구에서 사용한 MR 유체 감쇠기의 개략적인 모습을 보여주고 있다. 감쇠기는

* 한국과학기술원 건설환경공학과 연구조교수

** 한국과학기술원 건설환경공학과 박사과정

*** Postdoctoral Researcher, Dept. of Civil Eng. & Geo. Sci., Univ. of Notre Dame, USA

+ Leo Linbeck Professor, Dept. of Civil Eng. & Geo. Sci., Univ. of Notre Dame, USA

++정회원, 한국과학기술원 건설환경공학과 교수

20.3 cm의 내경, ± 8 cm의 스트로크, 1m의 길이 및 250 kg의 질량을 가지고 있다. 감쇠기는 5 리터 정도의 MR 유체를 담고 있다. 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 MR 유체 감쇠기를 위한 실험장치를 나타낸다.

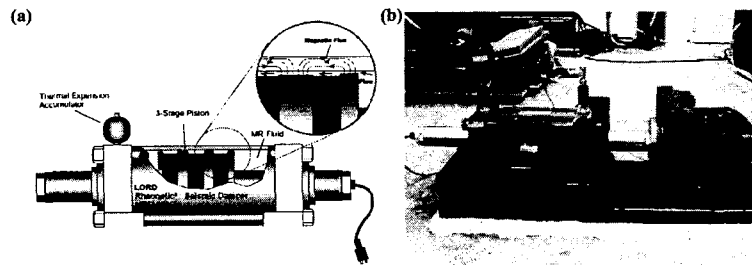


그림 1. (a) 20톤 용량의 MR 유체 감쇠기의 개략도; (b) 실험 장치

MR 유체 감쇠기에 대한 유사-정적 모델은 많은 연구자들에 의해 연구되었다 (Gavin et al. 1996; Kamath et al. 1996; Makris et al. 1996; Spencer et al. 1998; Wereley & Pang 1998; Yang et al. 2002). 이 모델이 MR 유체 감쇠기의 설계에 유용하다고 하더라도, 동적 하중을 받는 MR 유체 감쇠기의 비선형 거동, 특히 비선형 저항력-속도 거동을 묘사하는 데는 충분하지 않다. MR 유체 감쇠기 시스템의 동적 모델을 두 부분, 즉 전원 공급장치의 동적 모델과 MR 유체 감쇠기의 동적 모델로 나눌 수 있다. 기존 연구에서 current driver가 MR 유체 감쇠기의 응답 시간을 현저하게 감소시킨다는 결과를 보여주었다. 따라서, current driver가 MR 유체 감쇠기에 전류를 제공할 전원 공급장치로 채택되었다. 본 논문에서는, MR 유체 감쇠기의 응답 해석에 기반을 두고, 감쇠기의 동적 거동을 예측하기 위하여 Bouc-Wen 모델을 이용한 역학적 모델을 제안하였다. 이 모델은 감쇠기의 저항력에 대한 MR 유체의 stiction 현상과 관성 및 shear thinning 효과를 잘 나타낸다. 제안된 MR 유체 감쇠 시스템의 동적 모델이 실험 결과를 잘 예측함을 실험 결과와의 비교를 통해 증명하였다.

2. MR 유체 감쇠기의 동적 모델

2.1 MR 유체 감쇠기의 응답 해석

감쇠기의 응답은 기본적으로 그림 2에서 보는 바와 같이 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 영역에서 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 1의 종단부에서 보는 바와 같이 가속도는 정상 수준으로 감소한다. 저항력의 오버슈트에는 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 까닭에, 힘의 roll-off가 관측된다.

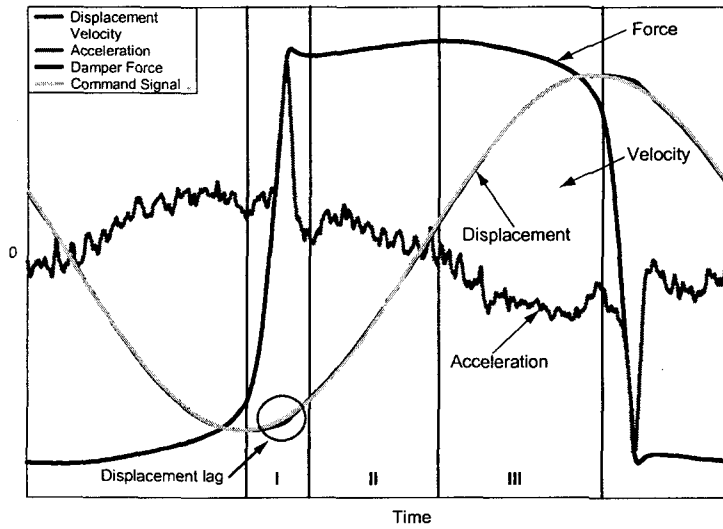


그림 2. MR 유체 감쇠기의 응답 해석

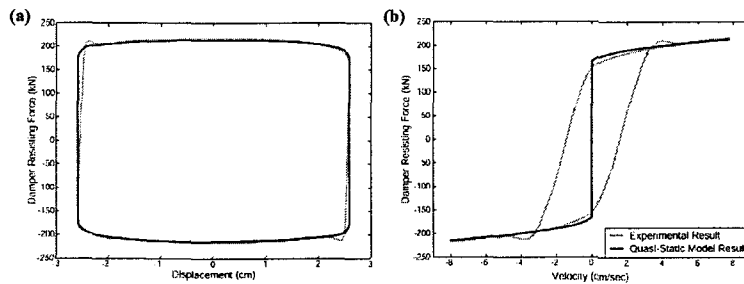


그림 3. 1 인치, 0.5 Hz의 사인파형의 변위 가진과 2A 입력 전류 하에서 유사-정적 모델과 실험 결과의 비교, (a) 힘 vs. 변위; (b) 힘 vs. 속도

2.2 MR 유체 감쇠기의 동적 모델

MR 유체 감쇠기에 대한 유사-정적 모델은 많은 연구자들에 의해 연구되었다 (Gavin et al. 1996; Kamath et al. 1996; Makris et al. 1996; Spencer et al. 1998; Wereley & Pang 1998; Yang et al. 2002). 그림 3은 MR 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. Ehr Gott & Masri (1992) 와 Gavin et al. (1996)은 감쇠기의 변위와 속도 정보를 이용하여 감쇠기의 저항력을 예측하기 위해 Chevychev 다항식을 도입한 무-매개변수 접근법을 제안했다. Chang & Roschke (1998)는 MR 유체 감쇠기의 동적 거동을 묘사하기 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)은 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.

2.1 절에서 보여준 감쇠기의 응답 해석을 기반으로 하여, shear thinning 및 관성 효과와 stiction 현상을 고려한 역학적 모델이 그림 4와 같이 제안되었다. 감쇠기의 저항력은 다음과 같이 구해진다

$$f = az + kx + c(\dot{x})\dot{x} + m\ddot{x} + f_0 \quad (1)$$

여기서 변수 z 는

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x}|z|z|^{n-1} - \beta\dot{x}|z|^n + A\dot{x} \quad (2)$$

이 모델에서, 유체의 stiction 현상 및 관성 효과는 등가 질량 m 에 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 단조-감소하는 함수이다. 본 논문에서는, 항복 후 감쇠계수를 다음과 같은 형태로 가정하였다:

$$c(\dot{x}) = a_1 e^{-(a_2|\dot{x}|)^p} \quad (3)$$

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. MR 유체감쇠기의 거동을 예측하는 능력을 추정하기 위해서, 이상의 세가지 동적 모델에 대해서 1 인치 0.5 Hz의 사인파형 변위 가진과 2A의 입력전류에 대한 감쇠기의 응답을 고려하였다. 예측 결과와 실험 자료의 비교는 그림 5에 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 단조-감소하며 변화하는 감쇠 계수를 도입하였다. 그것은 저속도 영역에서의 힘의 roll-off와 고속도 영역에서의 두개의 시간 방향으로의 루프를 포함한 모든 영역에서 감쇠기의 거동을 매우 잘 묘사한다.

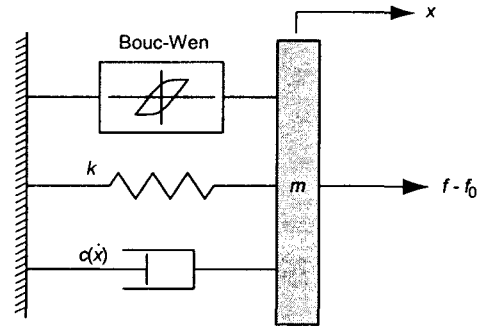


그림 4. MR 유체 감쇠기의 제안된 역학적 모델

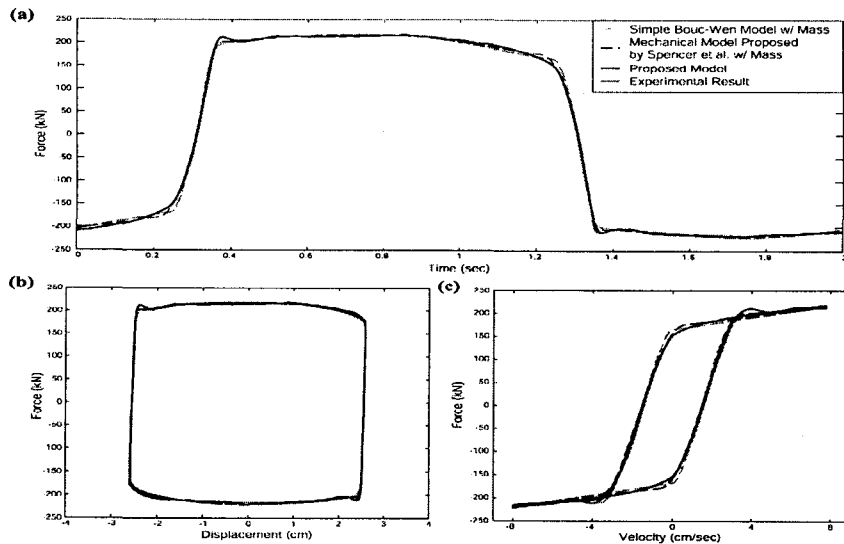


그림 5. 다양한 동적 모델의 경우에 감쇠기의 예측 응답과 실험으로부터 얻어진 응답의 비교, (a) 힘 vs. 시간; (b) 힘 vs. 변위; (c) 힘 vs. 속도

2.3 변동 전류를 위한 일반화

이전까지의 논의는 일정한 전류 즉 일정한 자기장이 가해질 때의 MR 유체 감쇠기의 응답을 기반으로 하였다. 그러나, 이러한 장치를 사용하는 제어 시스템의 최적 성능은 자기장이 시스템의 측정된 응답을 기반으로 하여 연속적으로 변할 때 얻어질 것으로 예상된다. 이런 식으로 감쇠기를 사용하기 위해서, 변동하는 전류에 대해서도 MR 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_1 , a_2 , m , n , 및 f_0 도 입력전류의 함수임을 알 수 있다.

입력 전류 i 와 감쇠 매개변수 α , a_1 , a_2 , 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.

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

전류 (A)	α (10^5 N)	a_1 (10^3 N·sec/m)	a_2 (sec/m)	m (kg)	n	f_0 (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

MR 유체가 유동학적 평형상태에 이르는 것을 묘사하는 동역학(dynamics)은 다음과 같은 1차 필터를 통해 표현된다.

$$H(s) = \frac{31.4}{s + 31.4} \quad (4)$$

그림 6은 2 A의 일정 입력 전류에 있어서 모의 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.

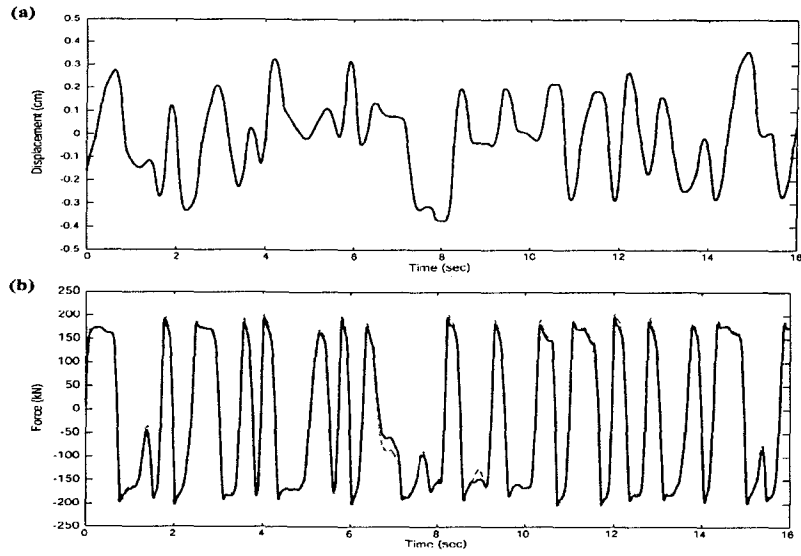


그림 6. 랜덤 변위와 2A 입력 전류 하에서 감쇠기의 예측 응답과 실험으로부터 얻어진 응답의 비교,
(a) 변위 vs. 시간; (b) 힘 vs. 시간

또한, 예측된 저항력을 감쇠기에 변동 전류가 입력되었을 때의 실험 자료와 비교하였다. 이전 테스트와 마찬가지로, 제한된 락폭을 갖는 랜덤 변위 가진을 적용하였다. 변위 가진과 입력 전류는 그림 7에서 본 바와 같다. 다시 한 번, 실험 결과와 모델 응답의 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

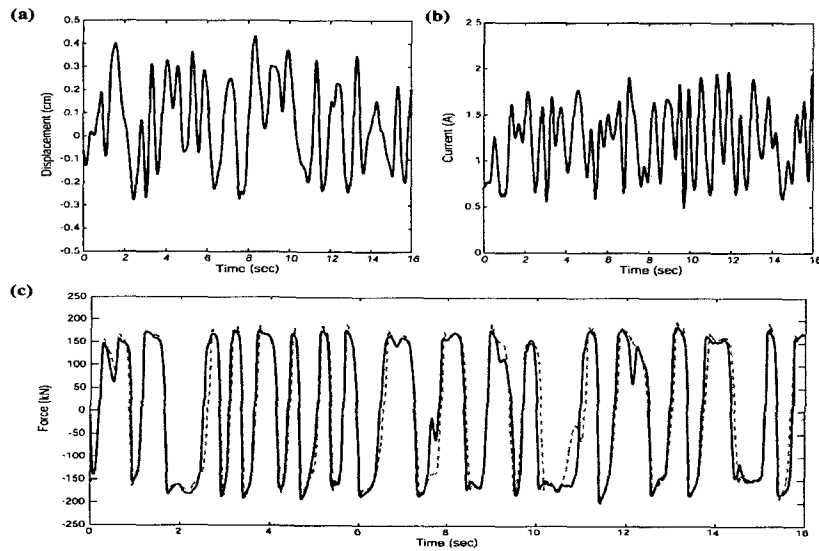


그림 7. 랜덤 변위와 랜덤 입력 전류 하에서 감쇠기의 예측 응답과 실험으로부터 얻어진 응답의 비교,
(a) 변위 vs. 시간; (b) 입력 전류 vs. 시간; (c) 힘 vs. 시간

3. 결 론

본 논문에서는 대용량 20톤 MR 유체 감쇠기의 동적 거동을 묘사하기 위한 동적 모델을 제안하였다. MR 유체 감쇠기의 특성 실험에서 관측된 MR 유체의 shear thinning 및 관성 효과와 stiction 현상을 고려할 수 있도록 Bouc-Wen 이력 모델에 기반을 둔 역학적 모델이 개발되었다. 제안된 역학적 모델이 MR 유체 감쇠기의 동특성 실험 결과와 서로 매우 잘 일치함을 확인함으로써, 새로운 동적 모델의 효용성을 검증하였다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 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.
2. Jansen, L.M., and Dyke, S.J., "Semiactive control strategies for MR dampers: comparative study," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.126, No.8, 2000, pp.795-803.
3. Spencer, B.F., Jr., Dyke, S.J., Sain, M.K., and Carlson, J.D., "Phenomenological model of a magnetorheological damper," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.123, No.3, 1997, pp.230-238.
4. Spencer, B.F., Jr., Johnson, E.A., and Ramallo, J.C., "'Smart' isolation for seismic control," *JSME International Journal*, JSME, Vol.43, No.3, 2000, pp.704-711.
5. Yang, G., Ramallo, J.C., Spencer, B.F., Jr., Carlson, J.D., and Sain, M.K., "Large-scale MR fluid dampers: dynamic performance considerations," *Proc. International Conference on Advances in Structure Dynamics*, Hong Kong, China, 2000, pp.341-348.
6. Yang, G., Spencer, B.F., Jr., Carlson, J.D., and Sain, M.K., "Large-scale MR fluid dampers: modeling, and dynamic performance considerations." *Engineering Structures*, Vol.30, No.3, 2002, pp.309-323.