구조물의 진동 제어를 위한 압착식 MR 감쇠기의 동적 모델링

Dynamic Modeling of Semi-active Squeeze Mode MR Damper for Structural Vibration Control

허 광 희* 전 준 용**

Heo, Gwang-Hee Jeon, Joon-Ryong

Abstract

Normally in order to build a semi-active control system equipped with MR damper, the dynamic modeling of the damper is required to numerically predict its dynamic damping force and also its behavioral characteristics. For the dynamic modeling of the MR damper, this paper attempts to predict and evaluate its dynamic behavior by applying specifically both a power model and a Bingham model. Dynamic loading tests were performed on the squeeze type of damper specially designed for this research, and force-displacement hysteresis loops confirmed the effectiveness of the damper as a semi-active control device. In the meantime, in order to evaluate the effectiveness of each model applied, the model parameter for each model was identified. On the basis of the parameter, we derived the error ratio of the force-velocity relationship curve and the dynamic damping force, which was contrasted and compared with the experimental results of the squeeze type of damper. Finally, the squeeze type of MR damper developed in this research was proved to be valid as a semi-active control device, and also the evaluation of the two dynamic models showed they were working fine so that they were likely to be easily utilized to numerically predict the dynamic characteristics of any dampers with MR fluid as well as the squeeze type of MR damper.

요 지

일반적으로 MR 감쇠기를 이용한 준능동 제어 시스템을 구축하기 위해서는 감쇠장치의 동적모델이 요구된다. 여기서, 동적모델링은 감쇠장치의 발생 감쇠력 및 거동 성향 등을 수치적으로 예측하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 MR 감쇠기의 동적거동을 실무적인 관점에서 합리적으로 모델링하기 위하여 다양한 동적모델 중 Power 모델 및 Bingham 모델을 적용해 MR 감쇠기의 동적거동특성을 예측·평가하였다. 이때 활용한 MR 감쇠기의 실험결과는 압착식 형태로 개발된 MR 감쇠기를 대상으로 동하중 실험을 수행하여 획득하였으며, 힘-변위 이력곡선으로부터 준능동 제어장치로의 타당성을 확인하였다. 또한, 각 동적모델의 예측성능을 평가하기 위하여 우선 실험결과를 이용해 각 동적모델 별 모델변수를 규명하였고, 이를 바탕으로 힘-속도 관계곡선 및 예측된 발생 감쇠력의 오차율을 산출하여 개발된 압착식 MR 감쇠기의 실험결과와 상호 비교·평가하였다. 최종적으로 본 연구에서 개발한 압착식 MR 감쇠기는 준능동 제어장치로 활용 가능함을 확인하였고, 평가된 두 가지 동적모델은 모두 우수한 예측성능을 보임으로써 본 연구에서 개발한 압착식 MR 감쇠기는 물론 MR유체를 이용한 다양한 형태의 감쇠장치의 거동특성을 수치적으로 예측하기 위하여 간단히 활용될 수 있는 가능성을 제시하였다.

Keywords : Squeeze mode MR damper, Dynamic modeling, Power model, Bingham model

핵심 용어 : 압착식 MR 감쇠기, 동적 모델링, Power 모델, Bingham 모델

* 정회원, 건양대학교 건설시스템공학과 교수

** 학생회원, 충남대학교 토목공학과 박사과정

E-mail : heo@konyang.ac.kr 041-730-5631

• 본 논문에 대한 토의를 2009년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2009년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론(Introduction)

건설기술의 고도성장에 힘입어 구조물은 날로 장대화 및 대형화 되고 있다. 그러나 초장대 교량이나 초고층 빌딩 구조물은 예견치 못한 지진 및 풍하중으로 인해 심각한 인적·물적 손실을 초래할 수 있어 이러한 돌발상황에 보다 적극적으로 대처하고, 외부유해진동을 효과적으로 제어하고자 많은 연구가 수행 되었다(Fujino, 1996). 이러한 연구의 초기에는 주로 격납면진받침 혹은 동조질량 제진장치 등과 같은 수동제어 중심의 연구가 대부분이었고, 근자에 들어 능동 및 준능동 제어개념이 도입되면서 스마트한 새로운 형태의 제어 시스템 개발이 국내·외적으로 큰 이슈가 되고 있다(Datta, 2003). 특히, 1990년대 들어 Carlson (1996)등이 토목분야에 준능동형 MR(Magneto-Rheological)유체장치를 도입하면서 많은 연구자들로 하여금 MR유체장치를 이용한 제어 시스템의 연구가 다각적으로 수행되고 있다(정형조 등, 2003). 여기서, MR 유체란 구조물의 진동제어를 위한 효과적인 지능형 재료(Smart material)중의 하나로써, 그 본질적인 특징은 자유롭게 유동하던 선형 점성 유체가 자기장이 가해지면 수백분의 일 초 사이에 항복강도를 갖는 반고체 상태로 변환된다는 점과, 자기장이 없을 때에는 초기 유체 유동상태로 복귀된다는 점이다. 또한 유체의 항복강도는 적은 전력만으로도 발생이 가능하고, 인가 자기장의 세기에 따라 유체 항복강도가 조절이 되기 때문에 이러한 MR 유체를 이용한 제어장치는 현재 구조물의 진동 제어를 위한 효과적인 수단으로 주목 받고 있다.

여기서, Spenser(1997) 및 Dyke(1998) 등은 이러한 MR 유체를 활용한 감쇠기의 이력(Hysteresis) 거동의 동적 모델을 개발하여 실험적 연구에 적용하였다. 또한 Yang(2001, 2002) 등은 최근 임베디드 형태의 자기관을 갖는 20tf 급 대용량 MR 감쇠기를 개발하여 그 성능을 평가하였다. 그러나 이 장치는 전자석 시스템이 메인실린더 내부에 위치하고 있어 피스톤 왕복운동 시 반고체 상태의 MR 유체로 인해 메인실린더에 기계적인 손상이 발생할 수 있고, 또한 큰 감쇠력 발현을 목적으로 높은 자기장을 형성 시 내부 고열이 발생하게 되며, 결국 이러한 온도변화는 MR 유체의 재료적인 특성을 변화시킬 우려가 있다. 따라서 이러한 문제점 등은 결국 장치의 장기간 사용 시 내구성 문제가 발생할 수 있다. 이러한 점을 보완하기 위하여 Sodeyama(2003, 2004) 등은 Bypass 형태의 MR 감쇠기를 개발하였다. 그러나, 이 장치 역시 충분한 제어력을 발생시키기 위해서는 전자석(Electro-magnet)의 길이를 길게 하여야 하고 이는 결국 제어기의 전체 길이를 증가시키게 되어 교량과 같이 제어기의 설치 위치가 교각의 위치 쪽으로 한정될 수밖에 없는 경우나 혹은 기타 구조물의 협소구역에 제어기가 설치될 경우 설치 공간 등에 제약을 받게 될 수 있다. 그러므로 장치의 장기적인 사용이 가능하고 협소한 공간에도 부착이 용이하도록 한 준능동형 MR 감쇠기의 개발이 요구된다.

한편, 이와 같은 준능동형 MR 감쇠기를 이용해 구조물의 진동을 효과적으로 제어하기 위해서는 적절한 제어 알고리즘 구축이 필요하다(Heo, 2005[(1),(2)]). 이때, 제어 알고리즘에는 감쇠기의 성능을 예측할 수 있는 동적모델을 요구하는 경우가 많다(Dyke, 1998) (Jansen, 2000). 이러한 준능동형 MR 감쇠기의 거동특성을 수치적으로 예측하기 위한 동적모델은 다양한 형태로 개발·제안되어 왔으며, 건설분야에서의 대표적인 연구로는 Spencer(1997)등이 MR 장치의 동적거동을 예측하기 위해 Bingham 모델에 근거한 점탄소성 모델과 Bouc-Wen 모델에 기반을 둔 역학적 모델을 제안한 바 있다. 한편, 이러한 동적모델은 제어대상과 제어목적 그리고 제어방법에 따라 다양하게 적용될 수 있으며, 특히 실무적인 측면에서는 모델의 구성이 수학적으로 단순하면서도 만족할 만한 예측성능을 갖는 동적모델을 선택·적용하는 것이 요구된다.

따라서 본 논문에서는 기존 MR 감쇠기의 문제점을 개선·보완할 수 있도록 한 압착식 MR 감쇠기를 개발하고, 또한 실무적인 관점에서 채택된 Power 모델과 Bingham 모델을 적용해 개발된 압착식 MR 감쇠기의 수치모사 성능을 힘-속도 관계곡선 및 오차율로부터 평가하였다. 최종적으로, 본 논문에서 개발한 압착식 MR 감쇠기가 구조물의 진동제어를 위한 준능동형 제어장치로 활용 가능함을 보였고, 또한 본 논문에서

평가된 두 가지 동적모델은 이러한 준능동형 MR 감쇠장치의 수치모델링에 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였다.

2. 본론

2.1 압착식 MR 감쇠기의 개발

본 연구에서는 교량이나 빌딩 구조물과 같은 건설구조물의 효과적인 진동제어를 위해 준능동 형태의 MR 감쇠기를 개발하였다. 개발된 MR 감쇠기는 단일-자기관 시스템에서 다중-자기관 시스템으로 확장·고려함으로써 감쇠력의 용량을 크게 증가시키면서도 제어장치의 길이는 최소화 할 수 있도록 한 압착식의 형태(개념)를 취한다. 특별히 본 연구에서는 이를 압착식 MR 감쇠기(Squeeze mode MR damper, SM MR Damper)로 명명 하였다. 우선 본 논문에서는 단일-자기관 시스템이 고려된 Prototype의 압착식 스마트 MR 감쇠기를 개발하고, 그 감쇠성능 및 동적 거동특성을 검증하고자 하였다. 추후 다중-자기관 시스템이 고려된 압착식 스마트 MR 감쇠기로 본 개념을 확장하여 최종적으로 실 구조물의 적용성에 대한 실험이 단계적으로 수행할 계획이다. 본 논문에서 개발한 단일-자기관 시스템을 갖는 압착식 스마트 MR 감쇠기의 개념도는 다음 Fig. 1과 같다.

Fig. 1과 같이 개발된 MR 감쇠기는 메인실린더와 분리된 단일-자기관 시스템은 물론 혹시 발생할지 모를 MR 유체의 누유 및 유체 휘발성 증발로 인한 실린더 내부의 유체 소실에 대비하여 유체보충 탱크를 갖도록 하였고, 이때 탱크의 유체는 실린더 내부로만

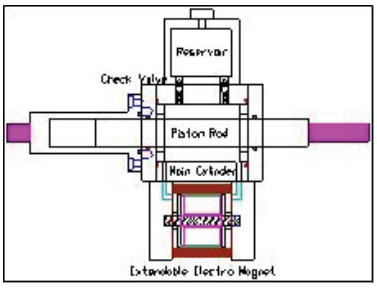


Fig. 1 Concept of SM MR Damper

Table 1 Design Specifications of SM MR Damper

설계사항	설계치수
최대 감쇠력	1000N
스트로크	30mm(±15mm)
실린더 내경	30mm
피스톤 로드 직경	15mm
오리피스 외경	38mm
오리피스 내경	30mm
오리피스 길이	35mm
전자석 코일턴수	400turns
전자석 코일직경	0.23mm
MR Fluid	LORD MRF-132DG

유입될 수 있도록 체크벨브를 적용시켰다. 감쇠기의 전체 길이가 30Cm를 갖으면서 이때의 최대 감쇠력은 1kN이 되도록 다음 Table 1과 같이 상세제원을 결정하였다.

Table 1에서와 같이 피스톤 최대 스트로크는 30mm(±15mm)이며, 메인실린더 및 자기관 오리피스에는 미국 Lord사에서 개발한 MRF-132DG로 충전하였다. 단일-자기관 부분은 외부덮개와 1.0mm의 간격(Gap)을 갖도록 하였고, 그 전체 길이는 35mm이다. 자기관은 저탄소강(Low-carbon steel)으로 제작된 요크에 에나멜선으로 감아 자기를 형성하였으며, 오리피스의 전체 자화길이는 28mm이다. 상기 제원을 바탕으로 개발된 Prototype 압착식 스마트 MR 감쇠기는 다음 Photo 1과 같다.

여기서, 개발된 감쇠기는 메인실린더 내부의 피스톤에는 원활한 축방향 왕복운동을 위해 웨어링(Wear ring)을 적용하였고, 볼트로 조립된 각 부분의 접합부에는 MR 유체의 누유 및 대기와의 접촉을 차단하기 위하여 실링용 오링(O-ring)을 삽입하여 조립하였다.

Photo 1 Prototype SM MR Damper

2.2 압착식 MR 감쇠기의 동적실험

본 연구에서는 개발된 압착식 스마트 MR 감쇠기의 제어성능과 준능동 제어창치로서의 타당성을 확인하기 위하여 건양대학교 SIS Lab의 Photo 2와 같은 실험테이블 및 계측시스템을 이용해 다양한 조건 하에서의 동하중 실험을 수행하였다.

(a) Dynamic Test Table

(b) Equipment System

Photo 2 Dynamic Loading Test Setup

우선 실험테이블 셀업은 감쇠기의 강제 피스톤운동을 위하여 최대 변위 ±1.0inch 용량의 가진기(VTS-600)를 이용하였고, 발생 감쇠력 계측을 위해 최대용량 5kN의 인/압축형 Load cell(DBBP-500)을 이용하였으며, 감쇠기의 변위를 계측하기 위하여 전체 스트로크 용량이 50mm인 LVDT(CDP-50)를 이용하였다. 또한, 자기관의 자기 형성을 위한 전류 공급하기 위하여 Lord사에서 생산한 0~2 Ampere의 출력범위를 갖는 Current driver(RD-3002-03)를 사용하였다. 다음으로, 계측시스템 구성은 계측장치로부터의 데이터를 획득하기 위하여 동적데이터로거(DRA-107A)를 사용하였고, 이때 데이터는 0.01초의 샘플링 주기로 획득하였다.

개발된 감쇠기의 동적 거동특성을 분석하기 위하여 본 연구에서는 동하중 실험의 조건을 크게 가진속도의 변화와 인가전류 세기의 변화로 설정하였다. 가진속도의 변화는 가진기를 이용해 각각 40mm/sec, 54mm/sec 및 80mm/sec 속도의 2Hz 사인파를 MR 감쇠기에 가하여 속도에 관계된 감쇠력을 평가하고자 하였으며, 동시에 인가전류 세기의 변화는 실내실험의 여건상 0.000A, 0.025A, 0.050A, 0.075A, 0.100A, 0.150A, 0.200A, 0.250A, 0.500A 및 1.0A의 총 10개의 경우로 설정하여 인가전류의 세기에 관계된 감쇠력을 고려하였다.

2.3 압착식 MR 감쇠기의 동적모델

본 연구에서는 개발된 압착식 스마트 MR 감쇠기의 동적 거동을 해석적으로 모델링하기 위해 여러 종류의 동적 모델 중 실용적인 측면이 고려된 Power 모델 및 Bingham 모델을 채택하였고, 본 연구에서 개발한 MR 감쇠기의 실험결과를 토대로 해석모델의 성능을 평가였다. 첫 번째로, Power 모델은 힘-속도 관계로부터 점성 유체 감쇠기의 동적 거동을 표현하기 위해 간단히 적용되었다(Sodeyama, 2003, 2004). 이러한 Power 모델의 힘-속도 관계는 식(1)과 같이 표현된다.

$$F = C_i g V^n \tag{1}$$

여기서, F는 MR 감쇠기의 전체 제어력이고, C_i는 비선형 감쇠계수이며, V는 감쇠기의 피스톤 속도, 마지막으로 n은 지수이다. 기본가정으로부터 변수 C_i 및 n은 진폭과 주파수에 대해 독립적이고, 이 변수들은 실험값과 해석값 사이의 최소자승오차법에 의해 결정된다. 또한, n이 영(zero)으로 수렴하는 상태에서도 지정한 한계 내에 감쇠력이 잔존하므로, MR 감쇠기의 거동을 모사하는 경우에 사용할 수 있다.

두 번째로, Bingham 모델은 MR 감쇠기의 동적 거동을 모사하기 위한 대표적인 동적 모델중의 하나이다(Gavin, 1994[(1),(2)]). 여기서, 감쇠장치(Dashpot) 및 마찰장치(Coulomb friction slider)는 서로 평행하게

연결되어 있다고 간주하며, 이 경우 이러한 Bingham 모델의 힘-속도 관계는 식(2)와 같이 표현된다.

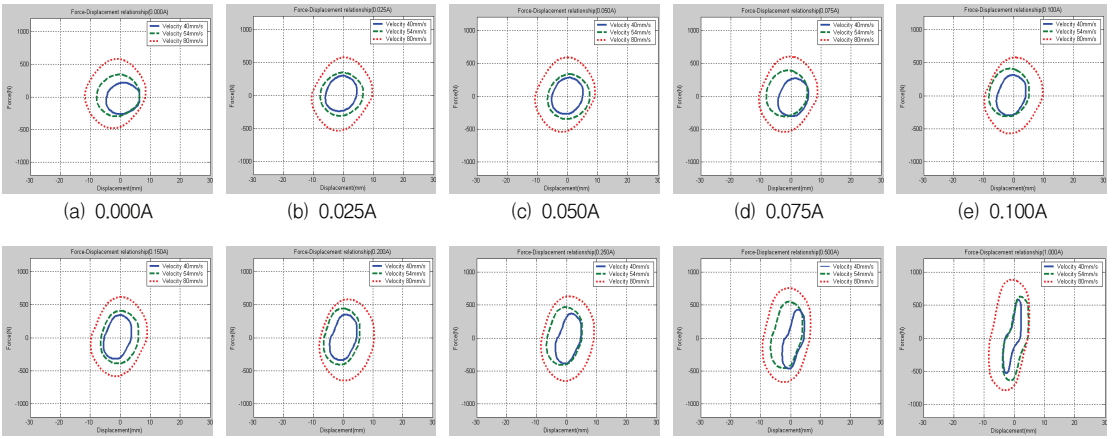
$$F = F_F sgn(\dot{x}) + c_0 \dot{x} \quad (2)$$

여기서, F는 감쇠기의 전체 제어력이고, $\dot{x}$ 는 감쇠기의 피스톤 속도이며, c_0는 감쇠계수, 마지막으로 F_F는 마찰력이다. 이들 두 모델들은 모두 그 관계식이 간단하면서도 우수한 성능을 보임으로서 MR 감쇠장치의 동적 거동특성을 수치적으로 모사하기에 효과적일 수 있다.

3. 실험 및 해석 결과

3.1 동적실험 결과 및 분석

본 논문에서는 개발된 압착식 MR 감쇠기의 감쇠성능을 평가하고자 2.2절에서의 실험조건을 바탕으로 동적실험을 수행하였다. 여기서 실험의 결과는 아래 Fig. 2와 같이 각 인가전류로 구분하여 피스톤 속도별 힘-변위 이력곡선으로 평가하였고, 이때 획득된 각 실험조건 별 발생 감쇠력 및 발생 변위는 다음 Table 2에 나타내었다.



(a) 0.000A (b) 0.025A (c) 0.050A (d) 0.075A (e) 0.100A

(f) 0.150A (g) 0.200A (h) 0.250A (i) 0.500A (j) 1.000A

Fig. 2 Force-Displacement Hysteresis Loops

Table 2 Experiment results of SM MR Damper

인가전류(A)		0.000A		0.025A		0.050A		0.075A		0.100A	
감쇠력(N)	발생변위(mm)	N	mm	N	mm	N	mm	N	mm	N	mm
가진 속도 (mm/sec)	40	268.3	6.268	274.9	6.080	283.2	6.025	294.0	5.945	310.1	4.935
	54	323.9	7.230	329.9	7.160	343.0	6.988	353.8	6.890	363.9	6.775
	80	548.0	10.15	560.5	12.14	569.5	9.958	581.4	9.800	580.8	9.753
인가전류(A)		0.150A		0.200A		0.250A		0.500A		1.000A	
감쇠력(N)	발생변위(mm)	N	mm	N	mm	N	mm	N	mm	N	mm
가진 속도 (mm/sec)	40	338.8	5.265	352.0	5.088	383.0	4.610	453.5	3.883	556.9	2.965
	54	400.4	6.355	427.9	6.085	439.2	5.983	506.7	5.380	640.0	4.303
	80	602.9	9.250	618.5	9.250	647.8	8.923	717.1	8.063	843.2	6.775

여기서, 가진속도 별 발생 감쇠력의 관계를 보면, 가진속도가 증가함에 따라 발생 감쇠력이 점진적으로 증가하고, 또한 인가전류 별 발생 감쇠력의 관계를 보면, 인가전류의 세기가 증가함에 따라 역시 발생 감쇠력이 함께 증가함을 알 수 있었다. 반면, 인가전류가 증가함에 따라 가진속도에 관계없이 발생변위는 감소되는 것으로 나타났으며, 이는 자기관 내 오리피스의 MR 유체가 자기장 영향으로 전단응력을 발생시켜 가진기로부터의 강제변위를 억제하는 역학적 관계에 기인한 것으로 판단된다. 이상의 동적실험결과로부터, 초기 MR 감쇠기의 관성력을 무시한다면 발생되는 감쇠력은 피스톤 속도와 입력 전류에만 관계되는 특성을 가지고 있음을 알 수 있었고, 결국, 개발된 압착식 MR 감쇠기는 인가전류의 크기로부터 감쇠력을 효과적으로 조절할 수 있는 준능동형 제어장치로의 거동특성을 충분히 반영함을 관측할 수 있었다.

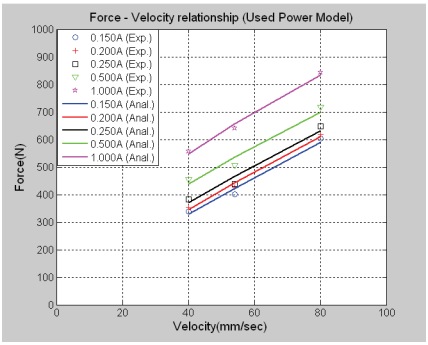
3.2 동적모델 결과 및 분석

본 연구에서는 개발된 압착식 MR 감쇠기의 실험결과를 토대로 이러한 준능동형 MR 감쇠장치에 간단히 적용 가능한 동적모델을 구성하기 위해 기존 Power 모델과 Bingham 모델을 적용하여 수치모사 경향 및 성능을 평가하였다. 여기서, 각 동적모델 별 수치모사의 경향을 파악하기 위하여 본 연구에서는 상기 Table 2에서 보인 실험결과 중 상대적으로 발생 감쇠력이 인가전류에 직접적인 영향을 받고 있다고 판단되는 6가지 실험조건을 선택·고려하여 동적모델링을 수행하였으며, 이때 규명된 각 동적모델 별 변수(Parameters)는 아래 Table 3에 나타내었고, 이들 변수로부터 산출된 해석결과는 다음 Fig. 3과 같이 힘-속도 관계곡선으로 표현하여 각 동적모델 별 수치모사 경향을 파악하였다.

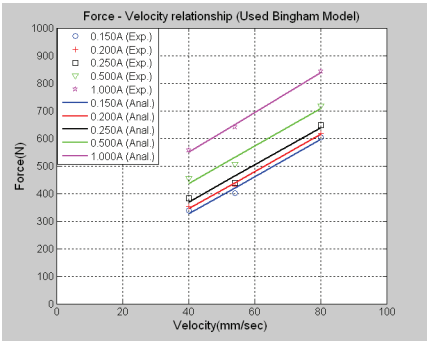
먼저 Fig. 3(a)로부터, Power 모델은 MR유체의 항복 이후에 나타나는 소성 특성을 유체의 실질적인 거동과 유사한 비선형성 거동을 하도록 고려함으로써 MR 감쇠장치의 동적 거동특성을 보다 효율적으로 모사함을 확인할 수 있었고, Fig. 3(b)로부터, Bingham 모델은 MR 유체의 항복 이후의 특성이 일정하게 나타난다고 가정하고 있기 때문에 항복 이후의 동적 거동특성

Table 3 Model Parameters of SM MR Damper

Current(A)	Power Model		Bingham Model	
	C_i (N/(mm/sec))	n	c_o (N/(mm/sec))	F_F (N)
0.100	9.999	0.919	6.966	14.22
0.150	14.704	0.842	6.752	55.73
0.200	16.817	0.819	6.746	74.81
0.250	21.632	0.769	6.797	95.76
0.500	36.750	0.672	6.779	165.88
1.000	59.167	0.603	7.240	260.08



(a) Used Power Model



(a) Used Bingham Model

Fig. 3 Force-Velocity Relationship Curves

모사에서 다소 오차가 발생 할 수 있지만, 본 연구에서는 근소한 오차를 갖는 선형성 거동을 보임으로써 우수한 거동모사 경향을 보였다. 따라서 본 연구에서 적용한 두 동적모델은 각각 이러한 MR유체를 이용한 감쇠장치의 동적거동을 비선형 및 선형성의 경향을 갖는 단순 모델링에 효과적인 것으로 평가되었다.

Table 4 Analysis Results of Power Model

인가전류(A)		0.000A		0.025A		0.050A		0.075A		0.100A	
감쇠력(N)	오차율(%)	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
가진 속도 (mm/sec)	40	256.3	4.47	262.1	4.65	271.6	4.09	282.0	4.08	297.3	4.12
	54	350.9	8.33	358.6	8.69	369.1	7.60	380.5	7.54	391.8	7.66
	80	529.3	3.41	540.5	3.56	551.6	3.14	563.3	3.11	562.4	3.16
인가전류(A)		0.150A		0.200A		0.250A		0.500A		1.000A	
감쇠력(N)	오차율(%)	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
가진 속도 (mm/sec)	40	328.4	3.06	345.6	1.81	370.1	3.36	438.8	3.24	548.4	1.52
	54	422.8	5.59	441.9	3.27	466.3	6.17	536.9	5.96	657.4	2.71
	80	588.8	2.33	609.9	1.39	631.1	2.57	699.3	2.48	833.4	1.16

Table 5 Analysis Results of Bingham Model

인가전류(A)		0.000A		0.025A		0.050A		0.075A		0.100A	
감쇠력(N)	오차율(%)	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
가진 속도 (mm/sec)	40	250.5	6.63	255.9	6.91	266.2	6.00	276.8	5.85	292.8	5.57
	54	351.2	8.42	359.0	8.82	369.1	7.60	380.2	7.46	390.4	7.28
	80	538.4	1.75	550.3	1.81	560.3	1.61	572.1	1.59	571.5	1.60
인가전류(A)		0.150A		0.200A		0.250A		0.500A		1.000A	
감쇠력(N)	오차율(%)	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
가진 속도 (mm/sec)	40	325.8	3.83	344.6	2.10	367.6	4.02	437.0	3.63	549.7	1.29
	54	420.3	4.97	439.1	2.61	462.8	5.37	531.9	4.97	651.0	1.71
	80	595.9	1.16	614.5	0.64	639.5	1.28	708.2	1.24	839.3	0.46

마지막으로 본 연구에서는 각 동적모델의 수치모사 성능을 정량적으로 평가하고자 각 실험조건에 대하여 실험결과 대비 해석결과의 오차율을 계산하였고, 이를 아래 Table 4와 Table 5에 나타내었다.

여기서, Table 4의 Power 모델 해석결과는 실험결과 대비 최대 8.69%, 최소 1.16%의 오차율을 보였고, 또한 Table 5의 Bingham 모델 해석결과는 실험결과 대비 최대 8.82%, 최소 0.46%의 미소한 오차율을 보였다.

따라서 본 논문에서 적용한 두 가지 동적모델은 모두 그 해석 결과치가 동적실험 결과치와 상호 우수한 일치도를 보임으로써, MR 감쇠장치의 동적거동특성을 효과적으로 모사함을 확인하였고, 또한 이들 모델은 MR 감쇠장치의 수치모델링을 위해 적용되는 변수들의 상관관계를 간단하게 표현할 수 있기 때문에 실무적용성 측면에서 우수한 모델로 활용가능 할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 논문에서는 건설 구조물의 준능동 제어를 목적으로 기존 제안된 MR 감쇠장치의 성능 및 설치 용이성 등을 보완할 수 있도록 압착식 형태의 MR 감쇠기를 개발하고, 또한 이와 같은 MR 감쇠장치에 대한 실무적용성 측면에서의 효과적인 동적모델링을 위해 두 가지 동적모델을 적용하여 각 해석모델별 수치모사 성능을 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 연구에서 개발한 압착식 MR 감쇠기는 감쇠용량의 확장이 용이하도록 독립식 전자석 시스템을 채용함으로써, 장치의 전체길이는 최소화 하면서 동시에 감쇠력은 최대화 할 수 있고, 또한 이러한 압착식 형태로의 MR장치는 교량의 하부 공간 혹은 기타 구조물의 협소구역에 대해 배치(Installation)가 용이한 감쇠기로의 활용 가능성을 제시하였다.
2) MR 감쇠장치의 효과적인 동적모델링을 위해 선택·적용된 Power 모델과 Bingham 모델은 모두 실험결과와의 우수한 일치도로부터 수치모사의 정확성을 확인하였고, 특히 Power 모델은 유체의 비선형 거동을, Bingham 모델은 근사적인 MR 감쇠기의 동적 거동을 간단히 표현할 수 있는 예측 모델로 활용이 가능할 것으로 판단된다. 결국, 이들 두 동적모델은 발생 감쇠력이 입력전류와 가진속도에 관계되는 특성을 지닌 이러한 MR 감쇠장치의 동적모델링 시 수치모델변수들의 상관관계를 간단하게 표현할 수 있어 실무 적용성 측면에서 단순 수치모델로 활용 가능함을 입증하였다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 한국과학재단의 연구비 지원으로 연구되었음. 본 연구가 이루어지도록 지원하여 준 한국과학재단(과제번호 : R01-2007-000-21080-0(2007))에 대단히 감사합니다.

참고문헌

1. 정형조, 이인원 "토목/건축 분야의 스마트제어 기술: MR 댐퍼-기반 스마트제어 기술을 중심으로" 전산구조공학회논문집 제 16권, 제3호, 2003, pp. 41-50.
2. Carlson J.D. and Spencer Jr. B.F., "Magneto-Rheological Fluid Dampers for Semi-Active Seismic Control," Proceeding of the 3rd International Conference on Motion and Vibration Control, Chiba Japan, Vol. 3, 1996, pp. 35-40.
3. Datta T.K., "A State-of-Art Review on Active Control of Structures," ISET Journal of Earthquake Technology, March, Paper No. 430, Vol. 40, No. 1, 2003, pp. 1-17.
4. Dyke S J., Spencer Jr B F., Sain M.K. and Carlson J.D. "An Experimental Study of MR Dampers for Seismic Protection," Smart Materials and Structures: Special Issue on Large Civil Structures, 1998, pp. 693-703.
5. Fujino Y., Soong T.T. and Spencer Jr. B.F., "Structural Control: Basic Concepts and Applications," Proc. ASCE Structures Congress, 1996, pp. 1277-1287.
6. Gavin H.P., Ortiz D.S. and Hanson R.D., "Testing and Modeling of a Prototype ER Damper for Seismic Structural Response Control," Proceedings of the International Workshop on Structural Control, USC Publication Number CE-9311, 1994, pp. 166-180.
7. Gavin H.P., Hose Y.D. and R. D. Hanson R.D., "Design and Control of Electrorheological Dampers," Proceeding of the First World Conference on Structural Control, Pasadena, CA, August 3-5, Vol. 1, 1994, pp. WP3-83~WP3-92.
8. Heo G.H., Lee G., Lee W.S. and Lee D.G., "Designing a Smart Damping System to Mitigate Structure Vibration: Part 2. Experimental Approval of Unified Lyapunov Control Algorithm," Smart Structures and Material 12th SPIE Annual International Symposium, March, Vol. 5757, 2005, pp. 587-593.
9. Heo G.H., Lee D.G., Lee G. and Lee W.S., "Smart Damping System for Structural Vibration Mitigation; Development of Unified Clipped Optimal Algorithm and Evaluation of Control Performance," The 1th International Conference of Advanced Nondestructive Evaluation, 2005, pp. 30.
10. Jansen L.M. and Dyke S.J., "Semiactive Control Strategies for MR Dampers: Comparative Study," Journal of Engineering Mechanics, 2000, pp. 795-803.
11. Sodeyama H., Sunakoda K., Fujitani H., Soda S., Iwata N. and Hata K., "Dynamic Tests and Simulation of Magneto-Rheological Dampers," Computer-Aided Civil and Intrastructure Engineering, Vol. 18, 2003, pp. 45-57.
12. Sodeyama H., Suzuki K. and Sunakoda K., "Development of Large Capacity Semi-Active Seismic Damper Using Magneto-Rheologocal

Fluid," Transactions of the ASME Journal of Pressure Vessel Technology Vol. 126 February, 2004, pp. 105-109.
13. Spencer, Jr. B.F., Dyke S.J. and Carlson J.D., "Phenomenologcal Model for Magnetorheological Dampers," Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 123, No. 3, 1997, pp. 230-238.
14. Yang G., "Large-Scale Magnetorheological Fluid Damper for Vibration Mitigation: Modeling," Testing and Control, Ph. D Dissertation, University of Notre Dame. 2001.
15. Yang G., Spencer Jr. B.F., Carlson J.D. and M. K. Sain M.K., "Large-scale MR Fluid Dampers: Modeling and Dynamic Performance Considerations," Engineering Structures, Vol. 24, Issue 3, 2002, pp. 309-323.

(접수일자 : 2008년 6월 18일)
(심사완료일자 : 2008년 12월 15일)