

SMG 유체를 이용한 전단형 댐퍼의 제어성능평가

Control Performance Evaluation of Shear Type Damper using SMG Fluid

허광희¹⁾ · 전승곤^{2)*} · 서상구²⁾ · 김대혁³⁾

Heo, Gwang Hee¹⁾ · Jeon, Seung Gon^{2)*} · Seo, Sang Gu²⁾ · Kim, Dae Hyeok³⁾

¹⁾건양대학교 해외건설플랜트학과 교수, 공학박사, ²⁾충남도립대학교 건설정보학과 교수, 공학박사 ³⁾건양대학교대학원 재난안전소방학과 석사과정

¹⁾Department of International & Plant Engineering, Konyang University, professor, ²⁾Dept. of Civil Engineering and informatics, Chungnam State University, professor, ³⁾Department of Disaster Safety & Fire, Konyang University, master's candidate

/ A B S T R A C T /

This research focuses on developing the Smart material with Grease adopted as a base oil to overcome a particle deposition caused by the MR fluid consisting of a silicon, which maximizing the characteristics and advantage of the MR fluid. By adopting the SMG fluid to a shear damper, this paper aimed to evaluate the control performance of it according to the variation of intensity of electric current(0 A, 0.5 A, 1.0 A, 1.5 A, 2.0 A, 2.5 A) and frequency(0.5 Hz, 1 Hz, 2 Hz). Subsequently, the usability of the SMG damper was analyzed by comparing the dynamic model of it to that of the other types of dampers(Power(Involution) Model, Bingham Model). As a result, DR, the performance indicator of semi-active damper, shows approximately 5 in a condition of 2 Hz. Also while confirming the excellent performance like the Power and the Bingham model, it raises the possibility to exploit it as the semi-active damper.

Key words: Semi-active, MR damper, Dynamic modeling, Power model, Bingham model

1. 서론

건설구조물은 다양하고 효율적으로 사용되기 위해 거대해지고 복잡한 구조로 시공된다. 이와 같은 요구에 따라서 건설구조물의 규모는 더욱 장대화되고 있다. 최근에 시공된 대표적인 구조물로 노량대교(2018, 서울), 루스키 대교(2012, 블라디보스토크), 롯데월드타워(2016, 서울) 및 페테레이션 타워(2016, 모스크바) 등이 대표적인 장대형 구조물이다. 이러한 대형구조물은 고령화 또는 지속적인 반복하중, 설계하중 이상의 초과하중이 작용하게 되면 급작스러운 붕괴사고로 이어져 막대한 인적 물적 손실이 발생할 수 있게 된다. 지진하중으로 인한 피해 사례 중 2017년 멕시코 중부에 발생한 대지진에서 지진하중으로 인한 대형구조물들이 붕괴하는 사례를 비롯해서 최근 한국에서도 2017 포항 지진으로 건물들의 외벽과 담장이 무너지고 간판이 떨어지는 등 구조물에 직접적인 피해를 주는 사례가 발생하고 있다. 이와 같은 피해를 최소화하고자 구조물의 기능 및 성능을 향상을 위한 방안으로 제어장치 개발에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[1, 2].

예를 들어 2008년 Yanqing Liu는 준능동 제어장치의 가변 강성을 제어하기 위해 스프링을 사용한 시스템을 제안하였고, 또한 2014년 F. Weber은 기존의 TMD(Tuned Mass Damper)보다 60%까지 우수한 성능을 가진 MR-SVA(Semi-active Vibration Absorber with real-time controlled Magnetorheological Damper)를 발표하는 등 다양한 제어장치의 개발이 연구되고 있다. 그중에 하나가 준능동형 제어시스템(Semi Active Vibration Control System)으로 외부로부터 공급되는 낮은 전력만으로도 능동제어의 적응성 및 수동제어의 신뢰성을 동시에 만족시킬 수 있는 특징의 제어장치이다[2, 3]. MRF 유체(Magneto Rheological Fluid)는 유체(실리콘, 물 등) 내에 미세한 크기의 자성 입자(1~20마이크로미터의 탄소강 미립자)를 혼입함으로써 자기력의 반응이 없을 경우에는 일반 유체처럼 점성거동을 하다가 자기력의 영향을 받으면 극히 짧은 시간 내에 입자들의 자기방향으로 정렬됨에 따라 전단응력을 유발시켜 진동을 제어하도록 설계되었다. 이와 같은 장점으로 준능동형 MR 제어시스템이 각광을 받고 있으며, 미국, 일본, 중국, 유럽 등 건설구조물의 효과적인 제어를 유도하기 위한 많은 연구가 수행되어왔다[4-8]. 그러나 Liu et al.(2008)은 MR 댐퍼가 초기에 충분한 제어력을 나타내지 못하는 것을 보완하기 위해서 스프링장치를 이용하여 초기제어력 문제를 해결하기 위한 연구를 수행하였다. 또한 Zhu (2006)는 이와 같은 초기제어력 문제를 해결하기 위해서 Disk형 댐퍼에

*Corresponding author: Jeon, Seung Gon

E-mail: Jeon@cnsu.ac.kr

(Received November 6, 2018; Revised February 7, 2019; Accepted February 13, 2019)

MR Grease를 이용하여 어느 정도 Rotor형 댐퍼의 제어를 구현하는 연구를 수행하였다. 그리고 MR Grease 댐퍼를 압착 Disk에 적용하여 제어력의 효용성을 높이는 연구를 Zhao et al.(2011)이 FE 모델링을 통한 연구를 수행하였다. 특히 Heo et al.(2013)은 MR 댐퍼에 장기간 피스톤운동이 발생되지 않은 상태에서 감쇠력을 측정하고, 초기 발생하는 감쇠력이 정상적인 사이클에서 확연히 이탈된 것을 검증하면서 MR 유체의 Carbon-powder의 침전문제를 근본적으로 해결하기 위해서 다양한 MR 혼화제에 관한 연구에 관심을 갖게 되었다. 또한 이러한 문제를 극복하고자 Sugiyama et al.(2013)은 MR Grease 댐퍼를 3층 모형 구조에 적용하여 단순한 on-off 제어알고리즘에 적용하여 준능동 제어기기의 사용 가능성을 시험하였다. Yazid et al.(2014)는 비슷한 방법으로 MR 유체에 Grease를 첨가하여 전단방식과 압착방식이 혼합된 댐퍼를 개발하여 시험하였다. 특히 FEMM (Finite Element Method Magnetic) 방식을 이용하여 충분한 성능을 검증하는 시도를 하였다. 그럼에도 불구하고 준능동성을 갖는 MR 유체의 장점을 유지하면서 Carbon-powder의 침전문제를 근본적으로 해결할 수 있는 충분한 능동적인 제어력의 확보가 필요한 상태이고 이 제어기기의 실 구조물 적용을 목적으로 장기적인 방안이 제시를 위한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 MR Grease를 수정 보완하여 SMG(Smart Material with Grease) 유체를 개발하고 이를 이용한 준능동 댐퍼를 개발하여 새로이 개발된 전단형 타입의 SMG 댐퍼에 능동적인 제어력 확보를 위한 동하중 실험 및 동적 모델링을 통해 댐퍼의 성능을 검증하였다. 또한, 이 댐퍼를 실제 건설구조물의 재난 예방에 능동적이고도 효율적인 제어장치로 사용하기 위한 제어방법을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 SMG 유체의 특성

국내의 경우 준능동형 제어시스템에 대한 연구 활용이 진행되고는 있으나[10, 11] 국외에 비해 부족하고, 특히 외국기술력을 수입해 사용하는 실정 등을 감안할 때, 이에 대한 많은 연구와 실용화가 요구된다. 특히 기존 MR 댐퍼의 경우, 그 우수한 성능과 여러 활용 가능성에도 불구하고 MR 댐퍼에 주입된 실리콘 기반의 MR 유체가 장기간 정적상태를 유지하였을 때 실리콘에 섞여 있는 카보닐 아이언(Carbonyl iron) 입자들이 침전되거나 재료 분리가 일어나고 그 결과 유사시 혹은 미소 변위 발생 시 사전에 MR 유체의 충분한 Mixing이 진행되지 않아 즉각적인 제어력을 발휘하는 데 문제가 있음이 지적되었다[11]. SMG 유체는 이러한 MR 유체의 입자침전으로 인한 단점을 극복하기 위하여 기존의 MR 유체에 그리스를 첨가하여 제작되었다.

일반적으로 그리스(grease)는 베이스 오일, 고형분, 기타 첨가제(물) 등으로 구성되는 고체 또는 반고체형태의 윤활제로 정의된다. 이들 성분의 배합농도에 의해 그리스의 특성을 조정할 수 있다. 그리스는 기본적으로 내부 고형분은 입체적(3차원)-섬유 구조체를 형성하고 있으며, 이때 베이스 오일(Base oil)은 이들 구조 사이에 유지되기 때문에 그리스는 고체 또는 반고체형태를 갖는다. SMG 유체는 그리스의 이러한 특징을 이용하여 유체 내부의 재료 분리 및 침전을 방지하면서도 기존의 MR 유체의 특성을 비교

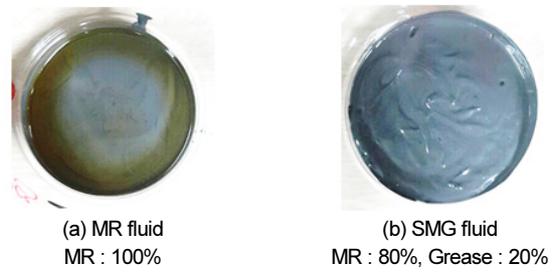


Fig. 1. The state of MR fluid and SMG fluid after 100 days

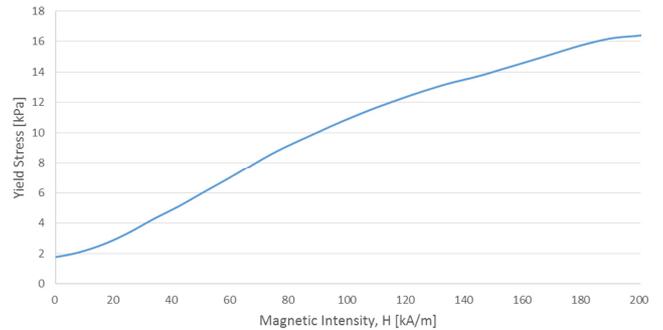


Fig. 2. Yield Stress-Magnetic Intensity Hysteresis curve

적 그대로 보존하기 위해 개발되었다. SMG 유체 내부에서 그리스와 MR 유체간의 혼합비율에 따른 자성 입자의 침강 현상을 확인하기 위하여 다음 Fig. 1와 같이 순수 MR 유체와 MR 유체에 그리스 20%를 혼합한 SMG 유체를 담아, 상온에서 100일 후의 모습을 살펴본 결과이다.

Fig. 1(a)에서 순수 MR 유체의 경우 두 개의 층(오일 및 자성 입자)으로 분리되어 있는 것을 육안으로 관찰할 수 있었다. Fig. 2(b)는 MR 유체 80%에 그리스를 20% 첨가한 SMG 유체로써 그리스가 20%를 넘어가는 순간부터는 재료 분리 및 침전이 전혀 일어나지 않은 것을 확인할 수 있었다[12].

다음으로 앞서 배합비가 선정된 SMG 유체의 재료적 성능평가의 결과이다. 성능평가 결과 자성의 강도가 증가할수록 SMG 유체의 항복강도가 상승하는 것을 확인하였으며, 이를 항복응력-자성강도 이력곡선으로 볼 경우 Fig. 2와 같다. 이러한 실험적, 수치적 특징을 바탕으로 SMG 유체를 외력의 강도에 따른 제어력의 변화가 가능한 준능동형 전단형 댐퍼에 사용될 유체로 선정하였다.

2.2 전단형 댐퍼 개발

본 연구에서는 SMG 전단형 댐퍼를 개발하기 위하여 기존 MR 댐퍼를 제작하였던 Lord사에서 제공한 기술자료를 참조해 수치 해석적 방법으로 전단형 댐퍼를 개발하였다. 전단형 댐퍼를 설계함에 있어 수치 해석적 방법을 이용할 경우, 기본가정 사항으로부터 결정될 수 있는 설계요소는 크게 전체 제어력 및 전자석 코일의 권선(Turns)수 등으로 구분되며, SMG 전단형 댐퍼의 전체 감쇠력은 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = F_{\eta} + F_{\tau}(H) \tag{1}$$

여기서, SMG 전단형 댐퍼의 전체 제어력 F 는 MR 그리스의 점성으로 인

한 제어력 F_η 과 자력에 의한 제어력 $F_r(H)$ 의 합으로 정의할 수 있다. 이때 H 는 전자석으로부터 발생된 자기장의 세기(자기강도)이다. 여기서, MR 그리스의 점성으로 인해 발생된 제어력 F_η 는 다음 식 (2)와 같다.

$$F_\eta = \frac{\eta SA}{g} \quad (2)$$

여기서, η 는 MR 그리스의 소성 점성계수, S 는 자극의 상대속도, A 는 자기장이 작용하는 면적, 그리고 g 는 자기장이 통과하는 MR 그리스의 유로 간격(Gap)이다. 다음으로 자력에 의해 발생된 제어력 $F_r(H)$ 는 다음 식(3)과 같다.

$$F_r(H) = \tau_y A \quad (3)$$

여기서, τ_y 는 적용된 MR 그리스의 항복응력이고, A 는 자기장이 작용하는 면적이다. 상기 식(2) 및 식(3)을 식(1)로 정리하면, SMG 댐퍼의 전체 제어력은 다음 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F = F_\eta + F_r(H) = \frac{\eta SA}{g} + \tau_y A \quad (4)$$

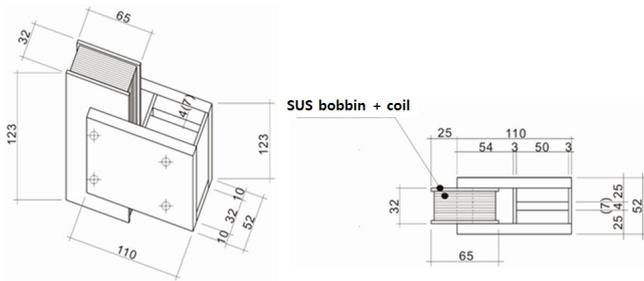


Fig. 3. Concept of MR Damper

Table 1. Design Specification of MR Damper

Stroke(max)	20 mm (± 10 mm)
Maximum force(nominal)	60 N
Coil diameter	∅0.75 mm
Coil turns	630 turns
Gap	1.0 mm



Fig. 4. Developed of MR Damper

여기서, MR 그리스의 소성 점성계수 η 과 MR 그리스의 항복응력 τ_y 는 사용된 MR 그리스의 성적서(Typical Property Sheet)를 참조할 수 있고, 자극의 상대속도 S , 자기장이 통과하는 MR 그리스의 유로 간격(Gap) g , 자기장이 작용하는 면적 A 는 설계조건으로부터 가정 혹은 결정할 수 있다. 다음으로, 일반적인 전자석 코일의 권선수 결정은 다음 식 (5)를 따른다.

$$H = \frac{NI}{g} \quad (5)$$

여기서, H 는 전자석으로부터 발생된 자기장의 세기(자기강도), N 는 전자석에 감긴 코일의 권선수, I 는 공급된 전류의 세기, 그리고 g 는 자기장이 통과하는 SMG 유체의 유로 간격(Gap)이다. 이때, NI 는 키르히호프(Kirchoff's Law) 법칙을 따른다. 이와 같은 수식을 통해 개발된 댐퍼는 Fig. 3와 같으며, 설계 제원은 Table 1에 나타내었다.

제작된 전자석에 권선된 코일의 권선 수는 630회이며, 권선된 코일의 두께(지름)는 0.75 mm, gap 사이즈는 1 mm로 하였으며, 최대 제어력 60 N을 목표로 제작하였다. 제작된 댐퍼는 Fig. 4와 같다.

2.3 SMG 유체를 이용한 준능동 댐퍼의 동적실험

본 연구에서는 개발된 전단형 SMG 댐퍼의 성능을 평가하기 위하여 계측 센서 및 지그 등을 Fig. 5와 같이 구성하였다.

실험 조건은 1 Hz(변위 2 mm, 속도 12.49 mm/s)의 조건으로 외부마찰 판을 가진하였다. 또한, 전류의 공급량에 따른 제어력을 확인하기 위하여 0~3 Ampere의 출력범위를 갖는 Kikusui 사의 PMC18-3A의 전류공급장치를 사용하여 0~2.5 Amp까지 0.5 Amp씩 증가하며 실험을 진행하였다. 가진기의 진동을 발생시키기 위한 가진입력 신호는 dSPACE를 이용하였으며, 발생하는 변위 및 하중 계측은 DRA-30A로 획득하여 활용하였다.

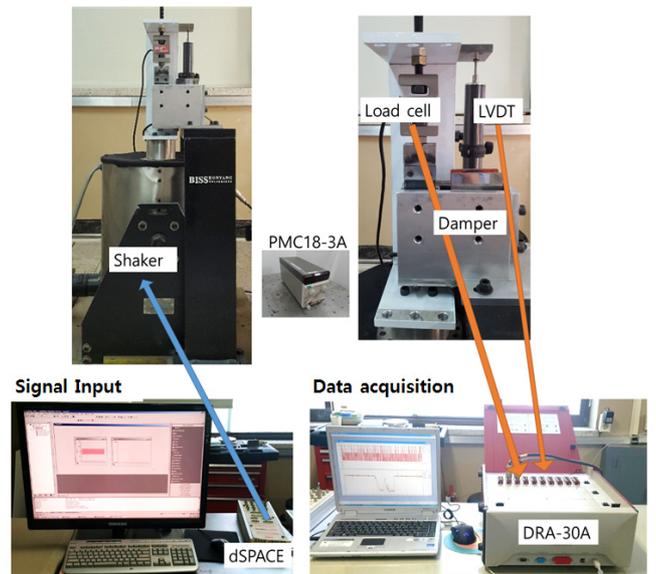


Fig. 5. Dynamic Loading Test Setup

2.4 동적모델의 선정

MR 감쇠기의 특성 분석을 위한 동적모델은 Bouc-Wen Model (Spencer, 1997; Yang, 2002), Power 모델 (Involution Model by Sodeyama, 2003) 그리고 Bingham 모델 (Stanway et al., 1987)이 연구 개발되어 사용되고 있다 (Fig. 6 참조).

Bouc-Wen Model은 Spencer(1997)와 Yang(2002)이 MR 유체의 비선형 거동을 예측하기 위해서 모델이 개발되었고 Bingham 모델은 Stanway et al.(1987)가 MR 유체의 소성 거동을 모델링하기 위해서 개발 되었다. 그 외에도 비선형 거동을 나타낸 Power 모델과 Iwata와 Gavin et al. 등이 다양한 거동 특성을 나타내는 모델을 개발하여 사용하고 있다. Power 모델은 힘-속도 관계에서 점성을 갖는 유체로 이루어진 감쇠기의 동적 거동을 표현하기에 적합한 모델로 힘-속도 관계는 식 (6)과 같이 표현된다 (Sodeyama et al., 2003).

$$F = C_f \cdot V^n \tag{6}$$

여기서, F 는 MR 감쇠기의 전체 감쇠력이고, C_f 는 비선형 감쇠계수이며, V 는 감쇠기의 피스톤 속도, 마지막으로 n 은 지수이다. 기본 가정으로부터 변수 C_f 및 n 은 진폭과 주파수에 대해 독립적이고, 이 변수들은 실험값과 해석 값 사이의 최소자승오차법에 의해 결정된다. 또한, n 이 영(zero)으로 수렴하는 상태에서도 지정한 한계 내에 감쇠력이 잔존하므로, MR 감쇠기의 선형 거동을 모사하는 경우에 적절하게 사용할 수 있다.

Bingham 모델은 MR 감쇠기의 선형 거동을 모사하기 위한 대표적인 동적 모델 중의 하나이다 (Gavin, 1994). 여기서, 감쇠장치(Dashpot) 및 마찰장치(Coulomb friction slider)는 서로 평행하게 연결되어 있다고 간주한다. 이 경우 Bingham 모델의 힘-속도 관계는 식 (7)과 같이 표현된다 (Spencer et al., 1996).

$$F = F_f \operatorname{sgn}(\dot{x}) + c_0 \dot{x} \tag{7}$$

여기서, F 는 감쇠기의 전체 감쇠력이고, \dot{x} 는 감쇠기의 피스톤 속도이며, c_0 는 감쇠계수, sgn 은 수의 부호를 반환하는 함수이며 마지막으로 F_f 는 마찰력이다. 이들 두 모델들은 모두 그 관계식이 간단하면서도 MR 감쇠기의 거동 특성을 수치적으로 모사할 수 있다는 장점이 있다 (Heo, 2009). 그러므로 본 동적특성 평가에 Power 모델과 Bingham 모델을 적용하여 동적특성을 평가 하였다.

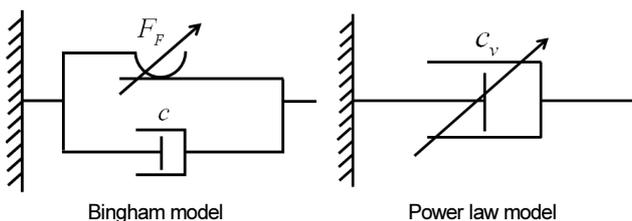


Fig. 6. Analytical Models of MR Damper

3. SMG 준능동 댐퍼의 동적실험 평가

3.1 SMG를 이용한 준능동 댐퍼의 동적실험

SMG 유체를 이용한 댐퍼의 제어 성능을 평가하고자 두 가지 기본조건을 제시하고 충격 여부를 확인함으로써 제어 성능을 평가하였다. 첫 번째는 가진 속도를 달리하여 발생하는 제어력을 확인하였다. 두 번째는 댐퍼에 공급되는 전류의 세기에 따른 최대 제어력의 차이를 관찰하였다. 실험에서 획득한 데이터를 Fig. 7에 그래프로 나타내었다. Table 2의 실험 결과를 보면 SMG 유체를 이용한 전단형 댐퍼의 제어력은 0.5 Hz에서 최대 7.655 kgf, 1 Hz에서 최대 8.245 kgf, 2 Hz에서 8.095 kgf이며, DR(Dynamic Range)은 0.5 Hz에서 8.95, 1 Hz에서 6.46, 2 Hz에서 4.95를 나타내었다. DR의 수치를 보면 속도가 증가할수록 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 전단형 댐퍼의 특징인 속도 증가에 따른 초기 점성력 증가로 인한 것으로 0A 조건에서 속도가 증가하면서 제어력도 증가하는 것을 확인할 수 있다. 단, 2 Hz에서의 DR의 수치가 약 5인 것을 보면 개발된 SMG 유체를 준능동 진동 제어 장치에 활용되는 재료로서 사용 가능성을 확인하였다. 또한 전류의 세기에 따른 제어력의 증가하는 것을 확인한 결과 1.5 A 이상의 전류 공급에서는 크지 않은 제어력의 증가 폭을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제작된 댐퍼를 사용할 경우 0 A에서 1.5 A 범위 내에서 댐퍼를 활용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

3.2 동적모델링 실험 및 분석

동적특성 평가를 위한 모델 실험은 Power(Involution) 모델과 Bingham 모델을 적용하여 해석 (Analytical) 모델과 실험 결과의 성능을 비교/평가하였다. 동적모델링은 1 Hz의 경우를 대표적 성능으로 선정하였다. 이 경우를 적용하여 계산한 동적모델 별 변수(Parameters)는 Table 3과 같이 계산되었다.

이들 변수를 동적모델에 적용하여 산출된 결과와 동적하중 실험을 통해 얻어진 결과를 Fig. 8와 같이 힘-속도 관계곡선으로 표현하여 각 동적모델 별 경향을 파악하였다.

Fig. 8(a)는 Power 모델을 적용하여 얻어진 데이터를 동적하중 실험 결과와 비교한 그래프이다. Power 모델은 유체의 실질적인 거동과 유사한 비선형성 거동을 하도록 고려된 동적 모델로서 동적 하중 실험 결과 데이터와 비교하였을 때 유사한 선형을 나타내므로 MR 유체를 사용하는 MR 감쇠기에 효율적인 모델이다. Fig. 8(b)는 Bingham 모델을 적용하여 얻어진 데이터를 동적하중 실험 결과와 비교한 그래프이다. Bingham 모델은 선형 거동이 고려된 모델로서 MR 유체의 항복 이후의 특성이 일정하게 나타난다고 가정한다. 따라서 비선형적 특성을 보이는 MR 유체의 항복 이후의 동적 거동 특성 모사에서 다소 오차가 발생할 수 있지만, 본 연구에서는 MR 유체의 항복점 이전까지를 고려하였으므로 동적모델 결과와 동적 하중 실험 결과와 비교하였을 때 근소한 오차를 갖는 선형성 거동을 보였다. 이와 같은 결과를 정량적으로 평가하고자 동적 하중 실험 결과와 동적 모델 해석 결과의 오차율을 계산하였고, 이를 Table 4와 Table 5에 각각 나타내었다. 여기서, Table 4의 Power 모델 해석 결과는 실험 결과와 비교하였을 때 많게는

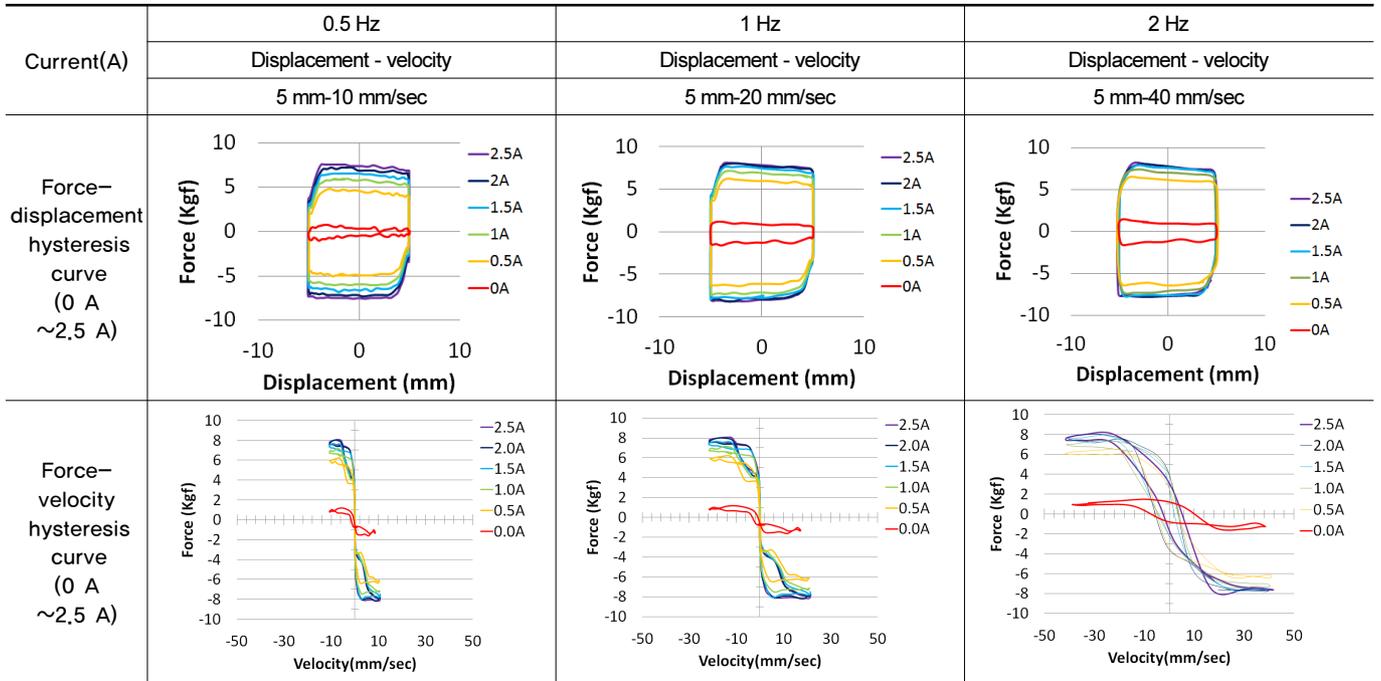


Fig. 7. Experiment Results of MR Damper

Table 2. Experiment Results of MR Damper

Frequency	Current(A)	0,0 A	0,5 A	1,0 A	1,5 A	2,0 A	2,5 A	DR (Dynamic Range)
0.5 Hz	Force(kgf)	0.855	4.85	5.785	6.635	7.230	7.655	8.95
	Displacement(mm)	5						
	Velocity(mm/sec)	10						
1.0 Hz	Force(kgf)	1.275	6.205	7.225	7.735	8.075	8.245	6.46
	Displacement(mm)	5						
	Velocity(mm/sec)	20						
2.0 Hz	Force(kgf)	1.635	6.310	7.33	7.925	8.095	8.095	4.95
	Displacement(mm)	5						
	Velocity(mm/sec)	40						

Table 3. Model Parameters of MR Damper

Current(A)	Power Model		Bingham Model	
	C_i (N/(mm/sec))	n	c_o (N/(mm/sec))	F_F (N)
0	0.299	0.468	0.025	0.675
0.5	3.255	0.190	0.042	4.798
1.0	4.042	0.171	0.045	5.733
1.5	5.047	0.128	0.038	6.540
2.0	6.102	0.082	0.025	7.220
2.5	7.085	0.040	0.012	7.730

7.9%, 적게는 1.4%의 오차율을 보였고, Table 5의 Bingham 모델의 해석 결과는 실험결과 대비 많게는 9.9%, 적게는 1.2%의 미소한 오차율을 보였다. 따라서 본 연구에서 적용한 두 가지 동적모델은 그 해석 결과와 성능평가를 위한 동적 하중실험 결과와 우수한 일치도를 보임으로써, 본 SMG 준능동 댐퍼의 동적거동특성이 잘 반영된 모델임을 평가하였다.

4. 결론

본 연구에서는 MR 댐퍼의 장점을 극대화하면서도 기존 실리콘 기반으로 이루어진 MR 유체의 단점을 효과적으로 극복할 수 있도록 그리스(Grease)를 베이스 오일로 채택하여 SMG 유체를 개발하였다. 또한, 개발된 SMG 유체를 이용한 준능동 댐퍼의 동하중 실험 및 동적 모델링을 통해 준능동 댐퍼의 성능을 검증하였다. 특히 변위를 고정된 상태에서 다양한 주파수(0.5 Hz, 1 Hz, 2 Hz)를 적용하여 전류의 세기를 달리하는 실험을 통하여 속도에 따른 제어력의 변화 추이를 확인하였다. 상기와 같은 목적으로 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

MR 유체의 단점을 효과적으로 극복하기 위하여 개발된 SMG 유체는 MR 유체에 20% 이상의 그리스를 혼합한 경우 재료 분리 및 침전이 발생하지 않는 것을 확인하였으며, 개발된 SMG 유체가 오일 내 자성 입자의 분산 안정성과 관련하여 종래의 MR 유체보다 우수한 것을 확인하였다. 또한 개발된 SMG 유체의 성능분석 결과 자력세기에 따라 일정한 간격으로 제어

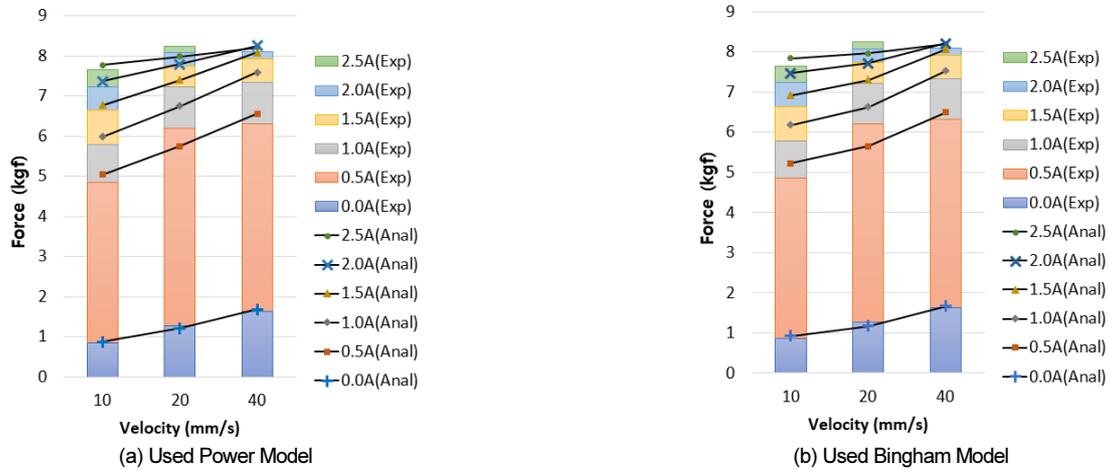


Fig. 8. Force-Velocity Relationship Curves

Table 4. Analysis Results of Power Model

Current(A)		0.0 A		0.5 A		1.0 A		1.5 A		2.0 A		2.5 A	
Displacement (mm)	Velocity (mm/s)	Force (kgf)	Error rate (%)										
5	10	0.878	2.7	5.041	3.8	5.992	3.5	6.777	2.1	7.370	1.9	7.769	1.5
	20	1.215	4.9	5.751	7.9	6.746	7.1	7.406	4.4	7.801	3.5	7.987	3.2
	40	1.680	2.7	6.561	3.8	7.595	3.5	8.093	2.1	8.257	2.0	8.211	1.4

Table 5. Analysis Results of Bingham Model

Current(A)		0.0 A		0.5 A		1.0 A		1.5 A		2.0 A		2.5 A	
Displacement (mm)	Velocity (mm/s)	Force (kgf)	Error rate (%)										
5	10	0.924	7.4	5.222	7.1	6.181	6.4	6.922	4.1	7.469	3.2	7.845	2.4
	20	1.172	8.8	5.647	9.9	6.630	9.0	7.304	5.9	7.717	4.6	7.960	3.6
	40	1.669	2.0	6.496	2.9	7.528	2.6	8.068	1.8	8.214	1.4	8.190	1.2

력의 증감을 보임으로써 준능동 제어장치에 활용되는 스마트 재료로서의 사용가능성을 확인하였다.

SMG 유체를 이용한 댐퍼의 제어성능을 평가하고자 속도와 공급전류의 세기에 따른 제어성능을 평가하였다. 그 결과 준능동 댐퍼의 성능지표인 DR이 최대 속도 조건인 2 Hz 에서 약 5인 것을 확인하였다. 또한 전류의 세기에 따른 제어력의 증가하는 것을 확인한 결과 1.5 A 이상의 전류 공급에서는 크지 않은 제어력의 증가폭을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제작된 SMG 댐퍼는 0 A에서 1.5 A 범위 내에서 준능동 댐퍼로서의 활용 가능성을 확인하였다.

또한 SMG 댐퍼의 효과적인 동적모델링을 위해 적용된 Power 모델과 Bingham 모델, 모두 해석모델과 실험결과 사이에 우수한 일치도를 보임으로써 준능동 댐퍼의 대표적인 거동특성을 확인하였다. SMG 유체의 비선형 거동을 확인할 때 사용되는 Power 모델은 MR 감쇠기를 모델링하기에 적합 하였으며, 선형거동 특성을 보이는 Bingham 모델 역시 MR 감쇠기의 성능평가실험에서 나타난 동적 거동특성과 근사치에 가까운 결과를 보임으로써 우수한 결과를 확인하였다.

/ 감사의 글 /

이 논문은 2016년도, 2017년도, 2018년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구사업(NRF-2016R1A2 A1A05005499, NRF-2018R1A6A1A03025542, NRF-2017R1 D1A1 B03035678, NRF-2018R1D1A1B07050590)임. 본 연구가 이루어지도록 지원하여 준 한국연구재단에 대단히 감사합니다.

/ REFERENCES /

1. Kin HS, Roschke PN, Numerical Study of Hybrid Base-isolator with Magnetorheological Damper and Friction Pendulum System, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2005;9(2):7-15.
2. Datta TK, A State-of-Art Review on Active Control of Structures, ISET Journal of Earthquake Technology, Paper 2003 Mar;40(1): 1-17.
3. Heo GH, Jeon JR, Jeon SG, Real-time Semi-active Vibration

- Control in Cable-stayed Bridges by Shear-type MR damper and Clipped-optimal Control Algorithm, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 2016;20(2):113-123.
4. Sodeyama H, Sunakoda K, Fujitani H, Soda S, Iwata N, Hata K, Dynamic Tests and Simulation of Magneto-Rheological Dampers, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2003;(18): 45-57.
 5. Sodeyama H, Suzuki K, Sunakoda K, Development of Large Capacity Semi-Active Seismic Damper Using Magneto-Rheological Fluid, *Transactions of the ASME Journal of Pressure Vessel Technology* 2004 Feb;126:105-109.
 6. Spencer Jr BF, Dyke SJ, Carlson JD, Phenomenological Model for Magnetorheological Dampers, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 1997;123(3):230-238.
 7. Yang G, Large-Scale Magnetorheological Fluid Damper for Vibration Mitigation: Modeling, Testing and Control, Ph. D Dissertation, University of Notre Dame, c2001.
 8. Yang G, Spencer Jr BF, Carlson JD, Sain MK, Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations, *Engineering Structures*, 2002;24(3):309-323.
 9. Lee KH, Kim GC, Lee ES, A Control Method of Semi-active TMD for Vibration Control, *Journal of the Korean Association for Spatial Structures*, 2007;7(2):53-61.
 10. Heo GH, Lee G, Lee WS, Lee DG, 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*, 2005 Mar;5757(1):587-593.
 11. Heo GH, Jeon SG, Characteristics and Dynamic Modeling of MR Damper for Semi-active Vibration Control *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 2013 Nov; 17(6):72-80.
 12. Heo GH, Jeon SG, Control Performance Evaluation of Cylinder Type Damper using SMG Fluid, *The Korea Institute For Structural Maintenance and Inspection 2018 Spring Conference*, 2018 Apr; 141-142.