

# SMG 유체를 이용한 소형댐퍼의 성능평가

## Performance Evaluation of Small Dampers Using SMG Fluid

허광희<sup>1)</sup> · 전승곤<sup>2)\*</sup> · 서상구<sup>2)</sup> · 김대혁<sup>3)</sup>

Heo, Gwang Hee<sup>1)</sup> · Jeon, Seung Gon<sup>2)\*</sup> · Seo, Sang Gu<sup>2)</sup> · Kim, Dae Hyeok<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>건양대학교 해외건설플랜트학과 교수, 공학박사, <sup>2)</sup>충남도립대학교 건설정보학과 교수, 공학박사 <sup>3)</sup>건양대학교대학원 재난안전소방학과 석사과정

<sup>1)</sup>Professor, Department of International & Plant Engineering, Konyang University, <sup>2)</sup>Professor, Dept. of Civil Engineering and Informatics, Chungnam State University, <sup>3)</sup>Master's Candidate, Department of Disaster Safety & Fire, Konyang University

### / A B S T R A C T /

In this study, SMG(Smart Material with Grease) was developed, which was improved the precipitation minute particle in grease during long term standstill. Also, small-sized cylinder damper equipped with an electromagnet in a piston was developed for using a performance evaluation of the damper with SMG and the dynamic load test, and damping force using Power model and Bingham model was derived in order to compare to the result of that of the damper. The data obtained from the dynamic load test were analyzed and plotted, and then a dynamic range was calculated to evaluate the usability of the damper with SMG. The performance of the damper with SMG was compared to the damping force derived from the Power and Bingham model. The result of this evaluation shown that the usability of SMG damper was demonstrated by this test as a semi-active controlling equipment of small-sized damper.

**Key words:** Small-sized damper, MR damper, Dynamic modeling, Power model, Bingham model, Dynamic range

## 1. 서론

인간 사회가 점차적으로 발전함에 따라 생활에 필요한 건설구조물에 대한 인간의 요구는 복잡하면서도 다양해지고 있다. 단순히 건설구조물로서의 기능적인 부분을 말하는 것이 아니라 보다 경제적이면서도 주변의 경관과 잘 어울릴 수 있는 심미적인 요소 등을 요구하게 되었으며, 건설기술의 비약적인 발전으로 인하여 이와 같은 요구들을 충족시킬 수 있게 되면서 현대의 건설구조물들은 점차 고층화 및 장대형화 되고 있다. 이와 같은 건설구조물은 인류의 생활에 많은 이로움을 주고 있지만 장대형화된 구조물의 특성상 외부의 하중에 보다 민감하게 반응을 함으로써 안전에 대한 취약점을 노출하고 있다. 외부로부터 전달되는 반복적인 유해 진동은 건설구조물의 피로를 증대시키게 되고 때로는 파괴로까지 이어지기도 하면서 사용자에게 불안감을 주어 안전에 대한 신뢰도를 낮춘다. 이러한 유해 진동으로부터 건설구조물의 안전성과 사용성을 확보하기 위하여 많은 연구자가 진동제어 기술에 관한 연구를 진행하고 있다[1-3].

진동을 저감시키기 위한 기존의 방법은 구조물 자체를 추가적으로 보강하여 단순히 강성을 높이는 방법이 사용되었지만, 이러한 방법은 경제적으

로 부담을 주며, 구조물의 변화 및 외부하중의 변화에는 적극적인 대응이 어렵다는 단점을 가지고 있다. 이러한 이유로 최근에는 능동이나 준능동 형태의 제진 장치를 개발하여 건설구조물에 발생하는 진동을 적극적으로 제어하기 위한 수단으로 활용하고 있다[4, 5]. 제진 장치를 적용한 진동제어 연구 사례를 보면 국내에서는 이론을 바탕으로 한 해석적 연구 및 실험실 차원의 소규모 실험을 통한 연구를 진행하고 있으며, 장대형 구조물에 적용하는 제진 기술의 연구는 대부분 미국과 일본이 선도하고 있다[6]. 국내에서는 국제적 흐름에 따라 건설구조물의 진동제어에 대한 필요성이 대두되었으며, 1988년에 한국전산구조공학회, 1990년에는 한국 소음 진동공학회가 설립되었고, 1997년에는 한국지진공학회가 설립되어 구조물의 진동제어에 관한 연구 교류가 이루어지고 있다. 이와 같이 내진 기술에 대한 인식은 과거에 비해 많이 향상되었으나 기존에 건설된 노후화된 건설구조물 및 진동제어장치의 부차이 어려운 구조물의 내진보강 기술에 관한 연구는 이론을 바탕으로 하는 연구로써 실 구조물에 적용 가능한 연구는 극히 취약하다고 볼 수 있다[9]. 2016년 9월 경주에서 발생한 강진을 통해서 알 수 있듯이 국내 역시 지진 안전지대가 아니므로 체계적인 건설구조물의 제진기술의 연구가 시급한 실정이다.

구조물의 진동제어를 위한 개념은 크게 수동형 제어, 능동형 제어 및 준 능동형 제어로 분류할 수 있다. 수동형 제어에서는 점탄성 댐퍼, 마찰 댐퍼, 동조질량 댐퍼 및 기초격리 시스템과 같은 방법을 적용한다. 이러한 수동형 제어는 제어의 방식이 단순하고 실 구조물에 쉽게 적용할 수 있으며 제어장

\*Corresponding author: Jeon, Seung Gon

E-mail: Jeon@cnsu.ac.kr

(Received February 22, 2019; Revised May 13, 2019; Accepted June 12, 2019)

치 이외의 추가적인 에너지원을 필요로 하지 않는 장점이 있어 지금까지도 대표적으로 사용되고 있는 제어 방식이다. 하지만 이러한 수동형 제어는 설계 당시에 제어하고자 계획하였던 주파수의 진동에서만 효과가 있을 뿐, 변화가 있는 진동에는 제어 효과를 기대할 수 없다는 한계점을 갖는다. 능동형 제어는 능동질량 댐퍼, 혼성질량 댐퍼 및 능동가변강성 시스템과 같은 방식을 적용하여 다양한 외부 하중 조건에 대응함으로써 기존의 수동형 제어가 갖는 한계점을 극복하였다고 볼 수 있다. 그러나 이와 같은 능동형 제어 방식은 초기설치비용이 많이 든다는 문제점과 대용량의 외부 에너지원이 필요하다는 점에서 대중적으로 사용하기에는 한계가 있다[10-11]. 최근에는 수동형 제어와 능동형 제어가 갖는 장점을 극대화 시키면서 이들이 갖는 한계점을 극복할 수 있도록 고안된 제어 방식인 준능동형 제어가 주목을 받고 있다. 준능동형 제어는 외부 하중 조건에 반응하여 진동을 제어 할 수 있지만, 능동형 제어 방식에 비해 적은 양의 외부 전력을 사용한다. 특히 준능동 댐퍼에 사용되는 재료 중 MR(Magneto Rheological)유체가 최근 건설구조물 진동제어 분야에서 많은 관심을 받고 있다[21-24]. MR 유체는 일반적으로 오일과 같은 유체에 마이크로 크기의 자성을 갖는 입자들을 포함한다. MR 유체의 거동은 자기장에 의해 조절될 수 있고, 만약 자기장이 작용하게 되면 MR 유체는 반고체와 같은 상태로 존재하게 된다. 따라서 MR 유체를 사용한 제어장치는 강인성 및 빠른 제어 응답을 가지고 있으며 능동형 제어가 갖는 적응성과 수동형 제어가 갖는 신뢰성을 동시에 만족시킬 수 있다 [12-15]. 이러한 장점 때문에 국외(미국, 일본 등)에서는 약 40년 전부터 MR 유체를 이용한 준능동형 제어장치 개발과 연구를 본격적으로 시작하였다. 최근에는 국내에서도 MR 유체를 자체적으로 개발하여 장치에 활용하고 있다. 이러한 스마트 재료인 MR 유체의 경우, 그 우수한 성능과 여러 활용 가능성에도 불구하고 장기간 유동이 없는 정적상태가 되면 실리콘에 섞여 있는 카보닐 철(Carbonyl Iron) 입자들이 침전되는 재료 분리 현상이 발생하게 된다. 이와 같은 현상은 유사시 제어장치가 즉각적인 진동제어를 할 수 없게 만들며, 만약 예상치 못한 외부의 하중이 발생하게 되면, 유체가 충전되어 있는 댐퍼의 파괴 및 댐퍼가 부착되어 있는 구조물의 파괴를 일으킬 수 있음을 지적하였다[12]. 이러한 침전문제를 개선하기 위해 MR 유체에 다양한 첨가물을 적용한 실험이 진행되었으며, 특히 3차원 섬유구조체를 형성하는 Grease의 첨가물을 활용하여 유체 내부 미립자의 분산 안전성을 확보하려는 연구들이 이루어졌다[29]. 국내에서도 2016년 최승복 등이 이와 같은 연구를 수행하였다[30]. 그러나 유체를 개발하는 데 그치면서 개발된 유체를 이용한 제어장치개발 및 적용 등에 관한 연구는 미비한 상태이다.

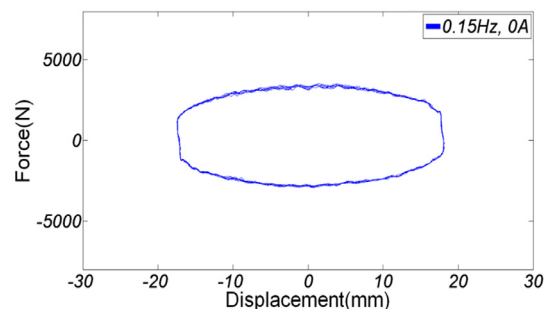
따라서 본 연구에서는 기존 MR 댐퍼의 장점을 극대화하면서도 기존 MR 유체의 단점인 침전에 대한 문제를 효과적으로 극복할 수 있도록, Grease를 활용한 SMG 유체를 개발하여 개발된 SMG 유체를 적용한 SMG 소형댐퍼를 개발하고자 한다. 또한, 개발된 소형 SMG 댐퍼의 동하중 실험 및 동적 모델링을 통해 준능동 제어장치의 활용 가능성을 평가하고 성능을 검증하여, 향후 국내 건설구조물의 재난 예방을 위한 능동적이고도 효율적인 제어장치 및 제어방법을 제시하는 데 목적이 있다.

## 2. 본 론

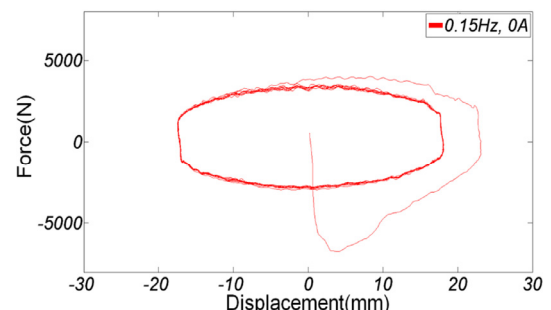
### 2.1 SMG 유체 침전 및 제어성능 평가

스마트 재료인 MR 유체(Magneto-Rheological Fluid)는 유체(실리콘, 물 등) 내에 미세한 크기의 자성 입자(1~5마이크로미터의 탄소강 미립자)를 혼입함으로써 자기력의 작용이 없을 경우에는 일반 유체처럼 점성 거동을 하다가, 자기력의 영향을 받으면 극히 짧은 시간 내에 입자들이 자기방향으로 정렬됨에 따른 항복 전단응력을 유발시킨다. 즉 MR 유체는 낮은 히스테리시스(Hysteresis)를 갖고 있는 고무자율 자성 입자(Magnetic particles)와 비투자율 유체로 구성된 콜로이드 서스펜션(Colloid suspension)이 혼합된 유체이다. 항복 전단응력을 갖는 MR 유체는 Bingham 유체의 거동양상을 보이며, 이방성(Anisotropic)의 역학적 특성을 나타낸다. 이러한 MR 유체는 자기장이 형성되기 전에는 유체의 자성 입자가 방사형으로 자유롭게 유동을 하고 있으나, 전류가 공급되어 자기장이 형성되면 순간적으로 자성 입자 간에 고리를 형성하여 유체의 이동을 방해하는 성질을 이용하여 진동을 제어하게 된다. 이와 같이 자성 입자로 구성된 MR 유체를 이용한 댐퍼는 진동이 발생되지 않아 피스톤 운동을 하지 않고 오랜 시간 동안 움직임이 없는 상태가 되면 유체 내부의 자성 입자가 침전되어 재료 분리 현상이 발생한다. Fig. 1(a) 그래프는 최근 가동을 했던 제어장치를 가지고 제어력을 테스트한 그래프이고 Fig. 2(b) 그래프는 장기간 가동이 없었던 제어장치의 제어력을 테스트한 그래프이다.

Fig. 1(a)의 경우 일정한 제어력을 발휘하며 안정적인 그래프를 그리는 반면 Fig. 2(b) 그래프에서는 처음 시작하는 부분에서 순간 큰 폭의 이상 제어력이 발휘된 후 안정적으로 제어력이 발휘되는 것을 확인하였다. 이와 같은 현상은 오랜 시간 유체의 유동이 없는 상태에서 자성 입자가 침전됨으로



(a) Damping Force of the recently operated MR Damper



(b) Damping Force of MR Damper without Long-term Operation

Fig. 1. The Abnormal Control Force of MR Damper

써 제어장치의 피스톤의 움직임에 마찰력을 부가하면서 발생한다. 따라서 장기간 가동이 없었던 MR 유체를 이용한 제어장치는 급작스럽게 발생하는 큰 규모의 진동에 이상 제어력을 발휘함으로써 댐퍼의 파손 및 일부 구조물의 손상 등과 같은 위험요소를 가지고 있다. 이러한 MR 유체의 단점인 자성 입자 침전을 방지하기 위하여 grease를 혼입한 SMG 유체를 개발하였다. 일반적으로 grease는 베이스 오일, 고흥분, 기타 첨가제(물) 등으로 구성되는 고체 또는 반고체 형태의 윤활제로 정의된다. 이들 성분의 배합농도에 의해 grease의 특성을 조정할 수 있다. grease는 기본적으로 내부 고흥분이 입체적(3차원)-섬유 구조체를 형성하고 있으며, 이때 베이스 오일(Base oil)은 이들 구조 사이에 유지되기 때문에 grease는 고체 또는 반-고체 형태를 갖는다. MR 유체의 재료 분리 및 침전에 대한 단점을 보완하기 위하여 반고체형 리튬 비누가 포함되어 있는 ZIC 사의 'ZIC ROYAL GREASE 2'를 Load사의 MR 유체와 혼합하여 재료 분리 및 침전 문제를 보완한 SMG 유체를 개발하기 위한 연구를 수행하였다. 먼저 혼합비율에 따른 자성 입자의 침전 현상을 확인하기 위하여 다음 Fig. 2와 같이 MR 유체와 MR grease를 각각 일정 용기에 0~30% grease의 혼합비율을 10% 씩 증가시켜 혼합한 후 상온에서 50일간 보관한 후의 모습을 나타낸 것이다.

Fig. 2(a)의 경우 100% MR 유체로써 두 개의 층(오일 및 자성 입자)으로 구분되어 상호 재료 분리된 것을 육안으로 관찰할 수 있었으며, 총 유체의 부피 중 약 5% 정도의 침전을 확인할 수 있다. Fig. 2(b)는 MR 유체

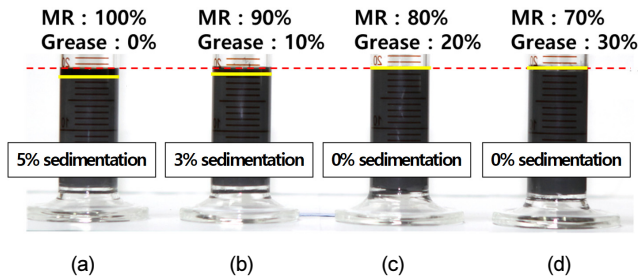


Fig. 2. The state of MR fluid and SMG fluid after 100 days

90%에 grease를 10% 첨가한 SMG 유체로써 Fig. 2(a)의 MR 유체에 비해 재료 분리가 크게 나타나지는 않았지만 총 유체의 부피 중 약 3% 정도의 침전으로 인한 재료 분리로 유체의 상부에 오일이 떠오른 것을 확인할 수 있다. Fig. 2(c)의 경우 MR 유체 80%에 grease를 20% 첨가한 SMG 유체로써 재료 분리 및 침전이 전혀 일어나지 않은 것을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 2(d)의 MR 유체 70%에 grease를 30% 첨가한 SMG 유체 역시 침전이 전혀 일어나지 않았다. 따라서 MR 유체에 20% 이상의 grease를 혼합한 SMG 유체에서는 재료 분리 및 침전이 발생하지 않는 것을 확인하였으며, SMG 유체가 오일 내 자성 입자의 분산 안정성과 관련하여 종래의 MR 유체보다 우수한 것을 확인하였다. 결과적으로 기존 MR 유체의 재료 분리에 따른 침전에 따른 단점을 보완할 수 있는 대안으로 SMG 유체의 사용 가능성을 확인하였다.

다음으로 앞서 선정된 최적 배합비로 개발된 SMG 유체의 재료적 성능 평가를 실시하였다. 성능평가를 위하여 건양대학교에서 보유하고 있는 전단형 성능평가 실험 장비를 활용하였다. 실험 장비의 실제 구성은 Fig. 3(a)와 같으며, Advanced Test Equipment Rentals 사의 Vibration Test Systems 모델 가진기에 연결된 마찰판을 상하 방향으로 움직일 때 마찰판

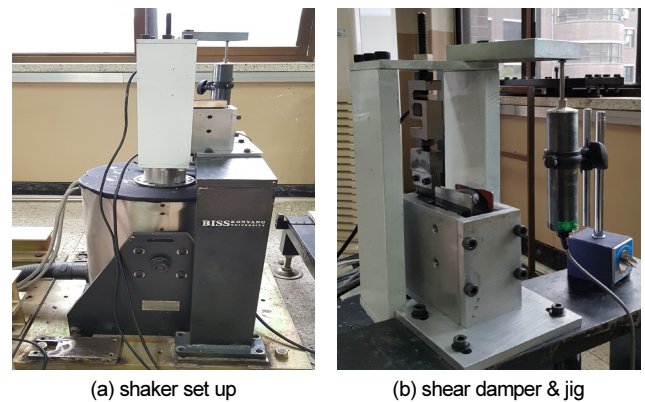


Fig. 3. Dynamic Loading Test Setup

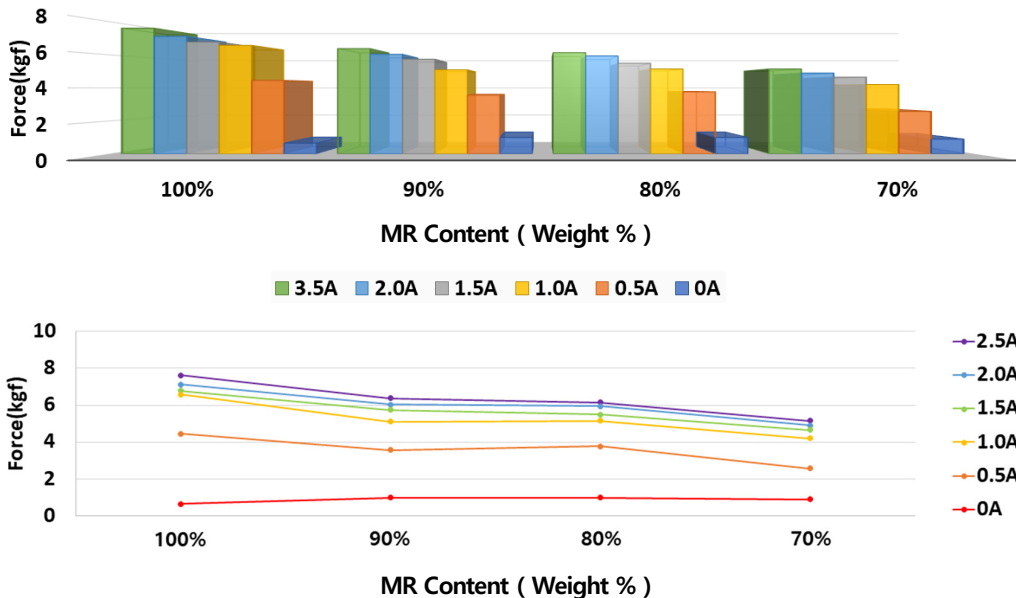


Fig. 4. Shear Type Damper Control Force Curve according to the Content of MR Fluid in SMG Fluid

로드에 부착된 로드셀을 이용하여 제어력을 측정하였으며, 댐퍼와 마찰판의 구조는 Fig. 3(b)를 통하여 자세히 확인할 수 있다.

실험 case는 MR 유체가 100%, MR 유체 90%에 grease를 10%, MR 유체 80%에 grease를 20%, MR 유체 70%에 grease를 30%일 경우로 총 4개로 진행되었다. 각 case 별로 공급 전류의 세기에 따른 제어력을 평가하기 위해 0.0 A에서 2.5 A까지 0.5 A씩 증가하며 전류를 공급하였다. 실험 결과 Fig. 4에서 보는 바와 같이 함유된 MR 유체의 총 중량이 감소함에 따라 제어력이 감소되는 것을 확인할 수 있다.

개발된 SMG유체(MR 유체 80%, grease 20%)는 본 연구를 수행하는 기간 동안 자성 입자의 침전이 발생하지 않고 우수한 제어력을 발휘하며 기존 MR 유체보다 침전에 대한 단점을 보완한 것으로 확인되었다.

## 2.2 소형 SMG 댐퍼 개발

### 2.2.1 소형 SMG 댐퍼 설계

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

$$y = y_{\eta} + y_{\tau}(H) \tag{1}$$

여기서, SMG 댐퍼의 전체 제어력  $y$ 는 MR grease의 점성으로 인한 제어력  $y_{\eta}$ 과 자력에 의한 제어력  $y_{\tau}(H)$ 의 합으로 정의할 수 있다. 이때  $H$ 는 전자석으로부터 발생된 자기장의 세기(자기강도)이다. 여기서, MR grease의 점성으로 인해 발생된 제어력  $y_{\eta}$ 는 다음 식 (2)와 같다.

$$y_{\eta} = \frac{\eta SA}{g} \tag{2}$$

여기서,  $\eta$ 는 MR grease의 소성 점성계수,  $S$ 는 자극의 상대속도,  $A$ 는 자기장이 작용하는 면적, 그리고  $g$ 는 자기장이 통과하는 MR grease의 유로 간격(Gap)이다. 다음으로 자력에 의해 발생된 제어력  $y_{\tau}(H)$ 는 다음 식 (3)과 같다.

$$y_{\tau}(H) = \tau_y A \tag{3}$$

여기서,  $\tau_y$ 는 적용된 MR grease의 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.

$$y = y_{\eta} + y_{\tau}(H) = \frac{\eta SA}{g} + \tau_y A \tag{4}$$

여기서, MR grease의 소성 점성계수  $\eta$ 과 MR grease의 항복응력  $\tau_y$ 는 사

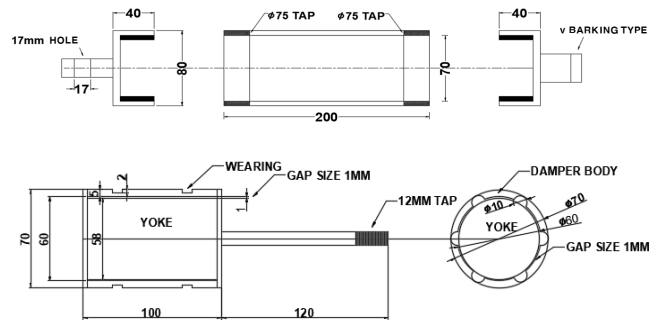


Fig. 5. Concept of Damper

Table 1. Design Specification of Damper

Stroke (max)	20 mm (± 10 mm)
Maximum force (nominal)	300 kgf
Coil diameter	∅0.37 mm
Coil turns	1750 turns
Gap	1.0 mm

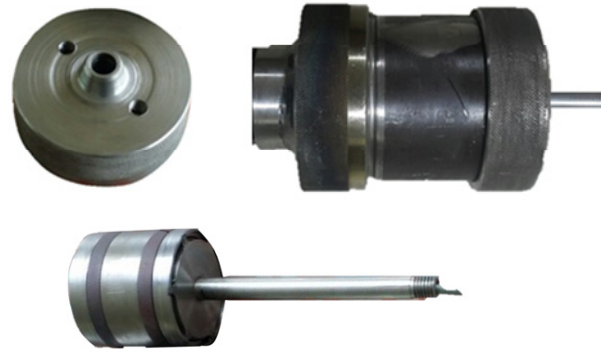


Fig. 6. Developed of Damper

용된 MR grease의 성적서(Typical Property Sheet)를 참조할 수 있고, 자극의 상대속도  $S$ , 자기장이 통과하는 MR grease의 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.

$$H = \frac{NI}{g} \tag{5}$$

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[16]. 이와 같은 수식을 통해 개발된 댐퍼는 Fig. 5와 같이 설계하였으며, 제원은 Table 1에 나타내었다.

제작된 전자석에 권선된 코일의 권선수는 630회이며, 권선된 코일의 두께(지름)는 0.75 mm, gap 사이즈는 1 mm로 하였으며, 최대 제어력 300 kgf를 목표로 제작하였다. 제작된 댐퍼는 Fig. 6과 같다.

### 2.2.2 SMG 유체를 이용한 소형댐퍼의 동적 실험

본 연구에서는 개발된 소형 SMG 댐퍼의 성능을 평가하기 위하여 계측 센서 및 지그 등을 Fig. 7과 같이 구성하였다. 개발된 소형 SMG 댐퍼의 성능평가를 위하여 공인인증기관인 계명대학교 첨단건설재료실험센터에서 성능평가 시험을 진행하였다. 시험 장비는 Fig. 7에 나타난 250 kN의 용량을 가진 피로 시험기를 사용하였으며, 실험 조건은 0.5 Hz와 1.0 Hz의 조건으로 재하실험을 진행하였다. 또한, 전류의 공급량에 따른 제어력을 확인하기 위하여 0~3 Ampere의 출력범위를 갖는 Kikusui 사의 PMC18-3A의 전류공급 장치를 사용하여 0~0.4 Amp 까지 0.1 Amp 씩 증가하며 실험을 진행하였다.



Fig. 7. Dynamic Loading Test Set up

### 2.2.3 SMG 준능동 댐퍼의 동적 실험 평가

SMG 유체를 이용한 댐퍼의 제어성능을 평가하고자 두 가지 기본조건을 제시하고 충족 여부를 확인함으로써 제어성능을 평가하였다. 첫 번째는 가진 속도를 달리하여 발생하는 제어력을 확인하였다. 두 번째는 인가전류의 증가에 따른 제어력의 증가를 확인하였다. 제어성능을 평가하기 위하여 2가지 주파수 영역에서 변위를 고정하고 속도를 달리하여 실험을 수행하였다. 제어 성능평가를 위하여 소형 댐퍼에 SMG 유체를 충전하여 0 A~0.4 A 까지 전류를 공급한 상태에서 동하중 실험을 수행하였다. Fig. 8은 SMG 댐퍼의 동하중 실험결과를 그래프로 나타낸 것이며, 이를 Table 2에 수치적으로 나타내었다. 실험결과, SMG 유체를 이용한 소형 댐퍼의 제어력은 0.5 Hz에서 최대 304 kgf, 1 Hz에서 최대 303.5 kgf를 나타내었다. 또한, 다음 식 (6)을 통하여 DR (Dynamic Range)을 구하였다. DR은 제어장치의 제어 가능 범위로서 준능동 댐퍼의 성능지표이다.

$$DR = \frac{F_{max}}{F_{min}} \quad (6)$$

여기서  $F_{max}$ 은 해당 준능동 제어장치의 최대 제어력이고,  $F_{min}$ 은 해당 준능동 제어장치의 최소 제어력이다. 식 (6)에 실험결과를 적용하여 계산한 결과 DR 값은 0.5 Hz에서 2.47, 1 Hz에서 2.69를 나타내었다. DR의 수치를 보면 속도가 증가하면서 유체의 마찰력으로 인하여 제어력이 상승한 것을 확인할 수 있다. 이는 소형 댐퍼의 특징인 속도 증가에 따른 초기 점성력 증가로 인한 것으로 0 A 조건에서는 유사한 제어력을 발휘하다가 전력을

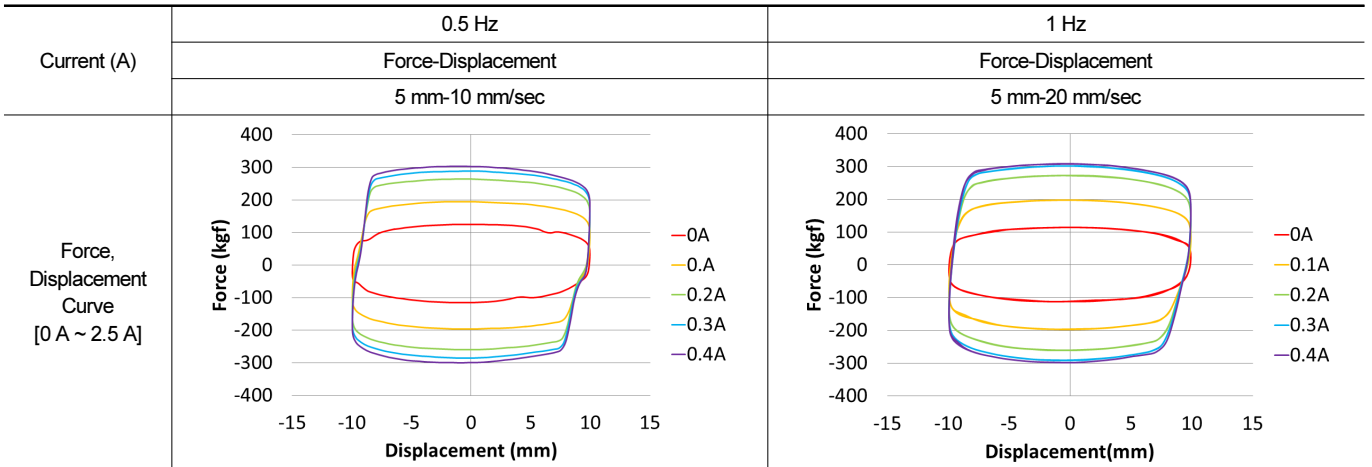


Fig. 8. Experiment Results of Damper

Table 2. Experiment Results of Damper

Frequency	Current (A)	0.0 A	0.1 A	0.2 A	0.3 A	0.4 A	DR (Dynamic Range)
0.5 Hz	Force (kgf)	123	199.5	264	290.5	304	2.47
	Displacement (mm)	10					
	Velocity (mm/sec)	10					
1.0 Hz	Force (kgf)	112.5	197.5	266	296.5	303.5	2.69
	Displacement (mm)	10					
	Velocity (mm/sec)	20					

증가시키면서 제어력도 증가하는 것을 확인할 수 있다. DR의 수치가 최대 2.69를 나타내면서 개발된 SMG 유체를 준능동 진동제어장치에 활용되는 재료로서 사용 가능성을 확인하였다. 또한, 전류의 세기에 따른 제어력의 증가하는 것을 확인한 결과 0.4 A까지는 안정적인 제어력을 보임으로써 300 kgf 이내의 제어를 필요로 하는 구조물에 사용이 용이할 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서 제작된 소형 댐퍼를 사용할 경우 0 A에서 0.4 A 범위 내에서 댐퍼를 활용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

### 2.3 동적 모델링 분석

#### 2.3.1 동적 모델의 선정

MR 감쇠기의 특성 분석을 위한 동적 모델은 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. 9 참조).

Bouc-Wen Model은 Spencer(1997)와 Yang(2002)이 MR 유체의 비선형거동을 예측하기 위해서 모델이 개발되었고 Bingham 모델은 Stanway et al.(1987)가 MR 유체의 소성 거동을 모델링하기 위해서 개발되었다. 그 외에도 비선형거동을 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 (7)과 같이 표현된다(Sodeyama et al.,2003).

$$y = C_i \cdot x^n \tag{7}$$

여기서,  $y$  는 MR 감쇠기의 전체 감쇠력이고,  $C_i$ 는 비선형 감쇠계수이며,  $x$  는 감쇠기의 피스톤 속도, 마지막으로  $n$ 은 지수이다. 기본 가정으로부터 변수  $C_i$  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 선형거동을 모사하는 경우에 적절하게 사용할 수 있다.

Bingham 모델은 MR 감쇠기의 선형거동을 모사하기 위한 대표적인 동적 모델중의 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 (8)과 같이 표현된다 (Spencer et al.,1996).

$$y = Fsgn(x) + c_0\dot{x} \tag{8}$$

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

#### 2.3.2 동적 모델링 실험 및 분석

동적특성 평가를 위한 모델 실험은 Power(Involution) 모델과 Bingham 모델을 적용하여 해석(Analytical) 모델과 실험결과의 성능을 비교/평가하였다.

동적모델 별 변수(Parameters)는 수식을 통하여 Table 3과 같이 계산되었으며, 이들 변수를 동적 모델에 적용하여 산출된 결과와 동적하중 실험을 통해 얻어진 결과를 Fig. 10과 같이 힘-속도 관계 곡선으로 표현하여 각 동적모델 별 경향을 실험값과 비교하여 분석하였다. Fig. 10(a)는 Power 모델을 적용하여 얻어진 데이터를 동적하중 실험결과와 비교한 그래프이다. Power 모델은 유체의 실질적인 거동과 유사한 비선형성 거동을 하도록 고려된 동적 모델로서 동적 하중실험 결과데이터와 비교하였을 때 유사한 선형성을 나타내므로 MR 유체를 사용하는 MR 감쇠기에 효율적인 모델이다.

Fig. 10(b)는 Bingham 모델을 적용하여 얻어진 데이터를 동적하중 실험결과와 비교한 그래프이다. Bingham 모델은 선형거동이 고려된 모델로서 MR 유체의 항복 이후의 특성이 일정하게 나타난다고 가정한다. 따라서 비선형적 특성을 보이는 MR 유체의 항복 이후의 동적 거동특성 모사에서 다소 오차가 발생 할 수 있지만, 본 연구에서는 MR 유체의 항복점 이전까지를 고려하였으므로 동적 모델 결과와 동적 하중실험 결과를 비교하였을 때 근소한 오차를 갖는 선형성 거동을 보였다.

이와 같은 결과를 정량적으로 평가하고자 동적 하중실험 결과와 동적 모델해석 결과의 오차율을 계산하였으며, 이를 Table 4와 Table 5에 각각 나타내었다. 여기서, Table 4의 Power 모델 해석결과는 실험결과와 비교하였을 때 많게는 1.3%, 적게는 0%의 오차율을 보였고, Table 5의 Bingham 모델의 해석결과는 실험결과 대비 0%의 오차율을 보였다. 따라서 본 연구에서 적용한 두 가지 동적모델은 그 해석결과와 성능평가를 위한 동적 하중실험 결과와 우수한 일치도를 보임으로써, 본 SMG 소형댐퍼의 동적 거동특성이 잘 반영된 모델임을 평가하였다.

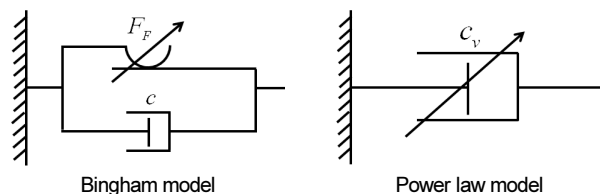


Fig. 9. Analytical Models of SMG Damper

Table 3. Model Parameters of Damper

Current (A)	Power Model		Bingham Model	
	$C_i$ (N/(mm/sec))	$n$	$c_0$ (N/(mm/sec))	$F_F$ (N)
0	165.44	-0.13	-1.05	133.5
0.1	206.29	-0.01	-0.2	201.5
0.2	257.46	0.01	0.2	262
0.3	271.43	0.03	0.6	284.5
0.4	305.67	0	-0.05	304.5

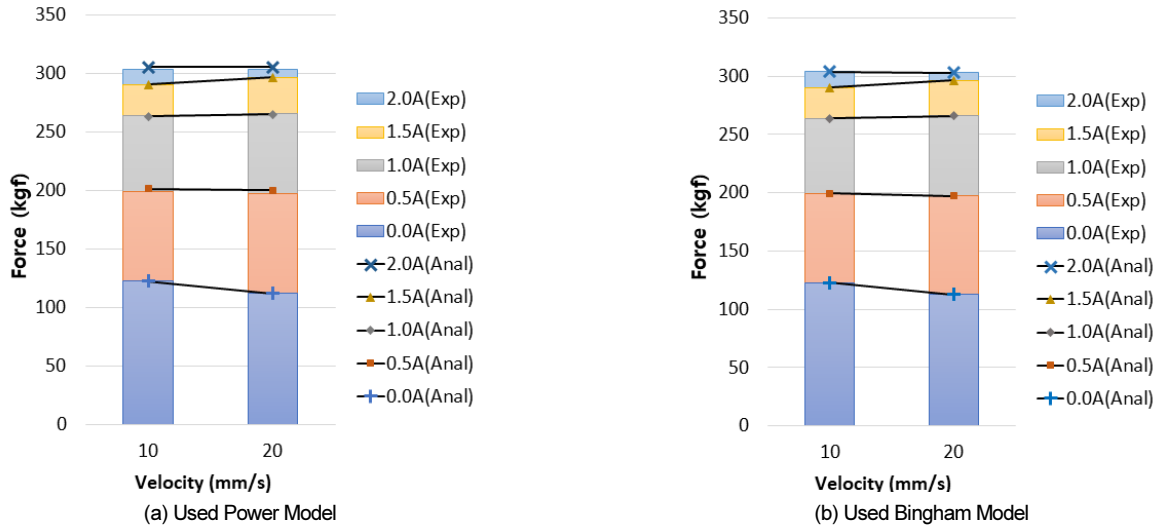


Fig. 10. Force-Velocity Relationship Curves

Table 4. Analysis Results of Power Model

Current (A)		0.0 A		0.1 A		0.2 A		0.3 A		0.4 A	
Displacement (mm)	Velocity (mm/s)	Force (kgf)	Error rate (%)	Force (kgf)	Error rate (%)	Force (kgf)	Error rate (%)	Force (kgf)	Error rate (%)	Force (kgf)	Error rate (%)
10	10	122.64	0.3	201.59	1.0	263.46	0.2	290.84	0.1	305.67	0.5
	20	112.07	0.0	200.20	1.3	265.29	0.3	296.95	0.2	305.67	0.7

Table 5. Analysis Results of Bingham Model

Current (A)		0.0 A		0.1 A		0.2 A		0.3 A		0.4 A	
Displacement (mm)	Velocity (mm/s)	Force (kgf)	Error rate (%)	Force (kgf)	Error rate (%)	Force (kgf)	Error rate (%)	Force (kgf)	Error rate (%)	Force (kgf)	Error rate (%)
10	10	123	0	199.5	0	264	0	290.5	0	304	0
	20	112.5	0	197.5	0	266	0	296.5	0	303.5	0

#### 4. 결론

본 연구에서는 MR 댐퍼의 장점을 극대화하면서도 기존 실리콘 기반으로 이루어진 MR 유체의 단점을 효과적으로 극복할 수 있도록 개발된 SMG 유체를 이용한 소형 댐퍼를 개발하였다. 개발된 소형 댐퍼의 성능을 검증하기 위하여 동하중 실험 및 동적 모델링을 통해 준능동 댐퍼의 사용성을 검증하였다. 실험 조건은 변위를 고정된 상태에서 주파수 0.5 Hz, 1 Hz의 조건을 적용하였으며, 댐퍼에 공급되는 전류의 세기를 달리하는 실험을 통하여 속도에 따른 제어력의 변화 추이와 공급 전류에 따른 제어력의 변화를 확인하였다. 상기와 같은 목적으로 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

MR 유체의 단점인 미립자의 침전을 방지하기 위하여 개발된 SMG 유체는 MR 유체에 20% 이상의 grease를 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, 개발한 SMG 유체의 성분분석 결과 grease의 혼입량이 증가할수록 제어 성능이 저하되는 현상을 확인하였다. 따라서 미립자의 침전이 발생하지 않는 상태에서의 최대 제어력을 발생시키는 MR 유체에 grease 20% 상

태의 SMG 유체를 본 연구에 적용하였으며, 제어 성능 분석 결과 공급 전류의 세기에 따라 일정한 간격으로 제어력의 증감을 보임으로써 준능동 제어 장치에 활용되는 스마트 재료로서의 사용 가능성을 확인하였다. 그러나 아직 개발된 SMG 유체의 관찰 기간이 오래되지 않아 침전에 대한 신뢰도가 부족하며, 동일 제어장치에 기존 MR 유체를 활용한 제어력과 SMG 유체를 활용한 최대 제어력을 비교한 결과 개발된 SMG 유체가 낮게 나오는 것을 확인할 수 있다. 따라서 SMG 유체를 제어장치에 활용할 경우 기존 MR 유체를 활용한 제어장치보다 전자석의 용량을 향상시켜 사용해야 한다는 제약사항이 있다.

SMG 유체를 이용한 소형댐퍼의 제어 성능을 평가하고자 변위를 고정된 상태에서 주파수 0.5 Hz, 1 Hz의 조건으로 공급 전류의 세기를 달리하여 제어 성능을 평가하였다. 그 결과 준능동 댐퍼의 성능 지표인 DR이 최대 속도 조건인 1 Hz에서 약 2.69인 것을 확인하였다. 또한 전류의 세기에 따라 제어력이 증가하는 것을 확인한 결과 0.3 A 이상의 전류 공급에서는 크지 않은 제어력의 증가 폭을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제작된 SMG 댐퍼는 0 A에서 0.3 A 범위 내에서 준능동 댐퍼로서의 활용 가능성을 확인하였다. 또한, SMG 댐퍼의 효과적인 동적 모델링을 위해 적용된 Power 모델과 Bingham 모델, 모두 해석 모델과 실험 결과를 비교한 결과 우수한 일

치도를 보임으로써 준능동 댐퍼의 대표적인 거동특성을 확인하였다. SMG 유체의 비선형 거동을 확인할 때 사용되는 Power 모델은 MR 감쇠기를 모델링하기에 적합하였으며, 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-2016R1A2A1A05005499, NRF-2018R1A6A1A03025542, NRF-2017R1D1A1B03035678, NRF-2018R1D1A1B07050590)임. 본 연구가 이루어지도록 지원하여 준 한국연구재단에 대단히 감사합니다.

/ REFERENCES /

1. Chai W, Feng MQ. Vibraton control of super tall buildings subjected to wind loads. *Non-Linear Mechanics*. 1997;32(4):657-668.
2. Ko JM, Ni YQ. Technology developments in structural health monitoring of large scale bridges. *Engineering Structures*. 2005; 27:1715-1725.
3. Soong TT, Constantinou MC. *Passive and Active Structural Vibration Control in civil Engineering*. Springer-Verlag Wien-New York, c1994.
4. Singh MP, Matheu EE, Suarez LE. Active and semi-active control of structures under seismic excitation. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*. 1997;26(2):193-213.
5. Xu YL, Qu WL, Ko JM. Seismic response control of frame structures using magnetorheological/electrorheological dampers. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*. 2000;29(5):557-575.
6. Casciati F, Rodellar J, Yildirim U. Semi-active control systems for seismic protection of structure, a state of the art review. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2012;23(11):1181-1195.
7. Kobori T, Takahashi M, Nasu T, Niwa N, Ogasawara K. Seismic response controlled structure with active variable stiffness system. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 1993;22:925-941.
8. Heo GH, Lee G, Choi MY. Magneto-Rheological Fluid Dampers for Smart Semi-Active Control System. *The 1st International Conference on Advanced Nondestructive Evaluation*. 2005(b):234.
9. Jolly MR, Bender JW, Carlson JD. Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids. *J. Intelligent Material Systems and Structures*. 1999;10(1):5.
10. Dyke SJ, Spencer Jr BF, Sain MK, Carlson JD. An Experimental Study of MR Dampers for Seismic Protection. *Smart Materials and Structures: Special Issue on Large Civil Structures*. 1998;7:693-703.
11. Spencer Jr BF, Dyke SJ, Sain MK, Calson JD. Phenomenological Model of a Magnetorheological Damper. *Journal of Engineering*

12. Heo GH, Jeon SG. Control Performance Evaluation of cylinder Type Damper using SMG Fluid. *Korean Society for Structural Maintenance and Inspection 2018 Spring Conference*. 2018 Apr;141-142.
13. Kim 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.
14. Datta TK. A State-of-Art Review on Active Control of Structures. *ISET Journal of Earthquake Technology*. Paper. 2003 Mar;40(1): 1-17.
15. 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.
16. Jeon SG. Development of Smart MR Damper for Semi-active Control System. Master's thesis on Civil Engineering and Structural Engineering at Kunyang University. 2011 Feb;14-19
17. Sodeyama H, Sunakoda K, Fujitani H, Soda S, Iwata N, Hata K. Dynamic Tests and Simulation of Magneto-Rheological Dampers. *Computer-Aided Civil and Intrastructure Engineering*. 2003;(18): 45-57
18. 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.
19. Spencer Jr BF, Dyke SJ, Carlson JD. Phenomenological Model for Magnetorheological Dampers. *Journal of Engineering Mechanics*. ASCE, 1997;123(3):230-238.
20. Yang G. Large-Scale Magnetorheological Fluid Damper for Vibration Mitigation: Modeling, Testing and Control. Ph. D Dissertation, University of Notre Dame. c2001.
21. Yang G, Spencer Jr BF, Carlson JD, Sain MK. Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations. *Engineering Structures*. 2002;24(3):309-233.
22. 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
23. 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.
24. 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.
25. Nam YJ. Design and Applications of Magneto-Rheological Fluid Actuators. Pusan national university Doctoral thesis 2008. 2.
26. Chang MS, Byeon WJ. A Study of the Hydraulic Circuit Model for a Magnetorheological Damper Analysis. *Journal of Drive and Control*. 2017 Mar;14(1):8-13.



27. Maddah AA, Hojja Y. Reduction of magneto rheological dampers stiffness by incorporating of an eddy current damper. *Journal of Sound and Vibration*. 2017;396:51-68
28. Lee JW, Seong MS, Woo JK, Choi SB. Modeling and Vibration Control of Small-sized Magneto-rheological Damper : Korean Society for Noise and Vibration Engineering. 2012 Oct; 344-349.
29. Yusuke S, Hiroshi S, Makoto H, Shin M. An Experimental Study On Basic Characteristics of a Magnetorheological Grease Damper. *Proceedings of the ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference*. July 19-23, 2015. Boston, Massachusetts, USA.
30. Mohamad N, Mazlan SA, Ubaidillah, Choi SB, Nordin MFM. The Field-Dependent Rheological Properties of Magnetorheological Grease Based on Carbonyl-Iron-Particles. *Smart Materials and Structures*. 2016 Aug;25(9).
31. Hahm DG, Koh HM, Park WS, Park KS. A Study on Cost-Effectiveness Evaluation and Optimal Design of MR dampers for Cable-Stayed Bridge. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*. 2006;10(6):47-56.
32. Cho SW, Jo JS, Kim CH, Lee IW. Smart Passive System Based on MR Damper. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*. 2005;9(1):51-59.