

EMRF를 이용한 개선된 Semi-Active Damper 개발

Development of Improved Semi-Active Damper Using EMRF

전승곤^{1)*}

Jeon, Seung gon^{1)*}

¹⁾충남도립대학교 건설안전방재학과 초빙교수

¹⁾Visiting Professor, Dept. of Construction Safety & Disaster Prevention, Chungnam State University

/ A B S T R A C T /

Magneto-Rheological Fluid (MRF) is a functional fluid in which flow characteristics change into magnetic force due to its magnetic particles. When the semi-active control device does not use MRF for a long time, precipitation of magnetic particles and abnormal control force occur. Thus, Electro Magneto-Rheological Fluid (EMRF), which improves the precipitation of magnetic particles for MRF and exhibits existing control performance, was developed in this study. First, the optimal mix proportion ratio was selected by conducting a precipitation experiment and a controlled force test by varying the content of grease based on the existing MRF components. Also, EMRF was applied to the shear-type damper to evaluate the control performance when applied to the control device. The cylinder-type damper was developed to apply to the structure, and control performance evaluation was conducted. The result confirmed that the precipitation of the magnetic particles was improved, while the damper using EMRF exhibited excellent control performance.

Key words: MRF, Grease, Semi-Active Damper

1. 서론

현대사회는 건설기술의 발전으로 인하여 건설구조물이 장대화 및 대형화되고 있다. 또한, 기능적인 부분만을 강조하는 것이 아닌 지역적 특색 및 주변의 경관과 어우러질 수 있는 심미적인 요소들도 요구되고 있다. 따라서 외부에 노출되어있는 건설구조물의 특성상 갑작스러운 외부 하중들로부터 다른 구조물에 비해 더욱 민감하게 반응하여 안정성에서 취약점을 내포하고 있으며, 과거 건설된 구조물들은 노후화로 인하여 구조적 안정성을 확보하기 어렵다. 특히 준공 후 30년이 지난 노후 교량의 경우 국토교통부 도로교량 및 터널 현황정보시스템[1]에 따르면 2020년 기준으로 전국의 36,501개의 도로교량 중 13.7%인 4,998개의 교량이 30년 이상 된 것으로 조사되면서 기존 건설된 노후교량 및 건설구조물의 안전관리를 위한 필요성을 제시하고 있다[2]. 이와 같은 위험 요소들로부터 구조물의 안정성을 확보하기 위하여 효과적인 제어장치를 개발하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다[3-8].

구조물의 진동을 제어하기 위하여 사용되는 Damper는 크게 Passive Damper와 Active Damper 그리고 Semi-Active Damper로 구분할 수 있

다. Passive-Damper는 비교적 낮은 유지비를 사용하지만 다양한 종류의 힘과 진동을 제어하는 데에는 한계가 있으며 Active Damper는 다양한 종류의 힘과 진동을 제어할 수 있으나 유지비가 비싸다. 반면 Semi-Active Damper는 Active Damper보다 유지비가 저렴하며 Passive Damper보다 다양한 종류의 힘과 진동에 대처할 수 있다. Semi-Active Damper 중 하나인 MR(Magneto Rheological) Damper는 전기를 사용해서 제어력을 조절할 수 있는 Damper이다. MR Damper는 자기유변유체(Magneto Rheological Fluid, MRF)를 사용하여 외력이나 진동을 감소시킨다. MRF는 자기력에 반응하여 항복응력을 변화시키는 특징을 가진 기능성 유체(Functional Fluid)이다. 이와 같은 특성을 이용한 MR Damper는 전류의 공급량을 조절하여 자기력의 크기를 변화시킴으로써 필요로 하는 제어력을 발생시킬 수 있는 제어장치이다[9-12]. 1948년 Rabinow는 MRF를 응용한 연구를 수행하였으며[13], 이후 현대에 이르러 2002년 Yang과 Spencer가 피스톤 내부에 전자석을 장착한 $2 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$ 제어력을 가진 MR Damper를 제작하고 그 성능을 검증하는 연구를 진행하였다. 또한 2004년 Sodeyama는 MR Damper에서 Flow Path를 Damper의 밖으로 우회시킨 Bypass형 MR Damper를 개발하였다[7, 14]. 동일 연도에 Heo는 3층 모형 구조물을 통한 진동제어 알고리즘을 제안하는데 MR Damper를 사용하였으며, 2013년에 Heo and Jeon은 $3 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$ 의 용량을 가진 MR Damper를 개발하고 동적 성능을 평가하는 연구를 진행하였다[16].

*Corresponding author: Jeon, Seung gon

E-mail: jeon@cnsu.ac.kr

(Received March 28, 2022; Revised April 19, 2022; Accepted April 20, 2022)

가장 최근에는 2020년인 Muhammad et al.은 우회된 Flow Path에 Serpentine Flux 밸브를 설치한 $6 \times 10^2 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$ 용량의 Bypass형 MR Damper를 개발하는 연구를 진행하였다[7, 15]. 이러한 MR Damper는 구조물에 발생하는 진동과 갑작스럽게 발생할 수 있는 과도한 외력(External Force) 및 충격하중에 동시에 대처할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 MR Damper는 장기간 움직임이 없다가 다시 가동할 때 유체에 함유된 미립자로 인하여 순간적으로 이상 제어력을 발휘하는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 연구로 Heo and jeon은 유체의 미립자 침전을 개선하기 위한 연구를 수행한 바 있다[8, 16].

본 연구에서는 MRF를 이용한 Damper에서 발생하는 자성미립자 침전 현상으로 인한 이상제어 현상을 개선하기 위하여 기존의 MRF에 Grease를 혼합한 EMRF(Electro Magneto Rheological Fluid)를 개발하였다. 다음으로 개발된 EMRF의 제어 성능을 평가하기 위하여 제어성능평가용 전단형 댐퍼를 개발하여 EMRF의 제어성능평가를 진행하였다. 마지막으로 개발된 EMRF를 이용한 실린더형 댐퍼를 개발하여 실구조물 적용 가능성을 평가하기 위한 제어성능평가 실험을 진행하였으며, 실험 결과값과 Power Model, Bingham Model 해석 결과값을 상호 비교/분석하여 제어장치의 제어력에 대한 신뢰도를 확보하였다.

2. 자기유변유체

2.1 MRF(Magneto Rheological Fluid)

MRF는 Semi-Active Damper에 사용되는 Functional Fluid 중 하나로써 자기력에 반응하여 Yield Stress가 변화하는 성질을 지니고 있다. 평상시의 MRF는 Fig. 1(a)와 같이 자성미립자와 비자성 유체가 혼합되어 흐른다. 그러나 자기력의 영향을 받으면 Fig. 1(b)처럼 자기력 방향으로 자성미립자가 사슬과 같은 형태를 형성한다. 이때 유체는 Yield Stress가 증가하게 되어 가해지는 힘에 Fig. 1(c)처럼 저항하며, 가해지는 자기력의 세기에 비례하여 Yield Stress를 변화시킨다.

이와 같은 특성을 지닌 MRF를 사용하는 Damper는 대부분 전자석을 사용하여 자기력을 생성하는데 전자석에 가하는 전류를 조절하여 극히 짧은 시간 안에 Damper의 제어력을 조절할 수 있다. 따라서 이러한 Damper는 다양한 힘과 진동에 대처가 가능하며, 이를 이용하여 일정한 주기로 가해지는 힘과 진동의 대처뿐 아니라 갑작스러운 충격과 공진현상(Resonance Phenomenon)으로 인하여 발생하는 힘이나 진동의 대처에도 효과적이다.

MRF는 지름이 1~20 μm 인 자성미립자와 광유나 식물성기름 등의 비자

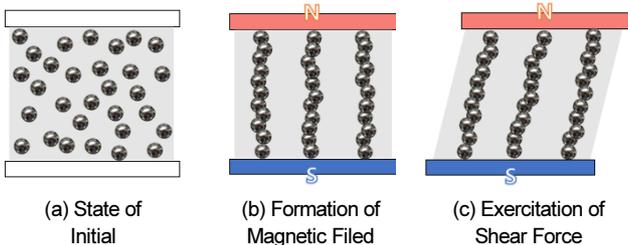


Fig. 1. Changes in Magnetic Particles of MRF

성 유체, 그리고 기타 혼합물로 구성되어 있다. Fig. 2는 MRF의 구성 성분 중 무기질의 함량을 나타낸 표이며 이를 볼 때 MRF는 상당한 비율의 철을 포함하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 MRF의 Control Force를 담당하는 자성미립자가 대부분 카보닐철(Carbonyl Iron)과 같은 Fe를 포함하는 입자로 구성되어 있기 때문이다. MRF를 구성하는 비자성 유체는 자성미립자보다 밀도가 작다. 이러한 밀도차에 의해서 혼합 후 시간이 지난 MRF는 자성미립자와 비자성 유체 간의 분리가 발생하게 된다.

Fig. 3은 MRF를 50일간 실온상태에서 보관하였을 때의 구성요소의 상태를 개념도로 설명하였다.

Fig. 3(a)는 MRF를 혼합한 직후의 사진이며, 미립자와 유체 간에 분리 현상이 발생하지 않은 것을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 3(b)와 같이 50일간 유체를 실온에 보관하였을 때 자성 입자가 가라앉게 되면서 유체 미립자 간의 분리 현상이 발생하게 된다. 이러한 분리 현상이 발생하게 되면 MRF를 사용하는 제어장치의 온전한 제어력을 발휘하기 어려우며, 이상 제어력을 발생시키게 된다. 이로 인하여 제어장치뿐만 아니라 제어장치가 부착된 구조물에도 데미지를 주게 된다.

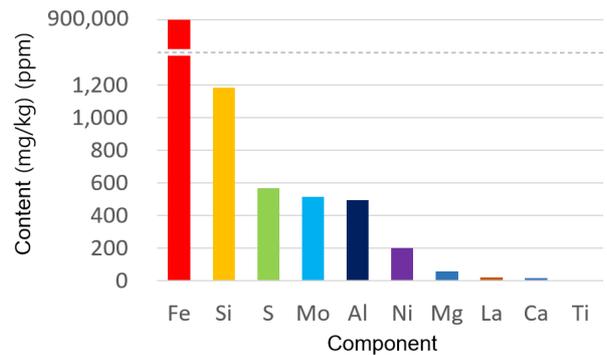


Fig. 2. Inorganic Component of MRF [MRF-132DG]



(a) Molecular Structure of Mixed MRF



(b) Molecular Structure of Mixed MRF for After 50 days

Fig. 3. Changes of Molecular Structure for MRF

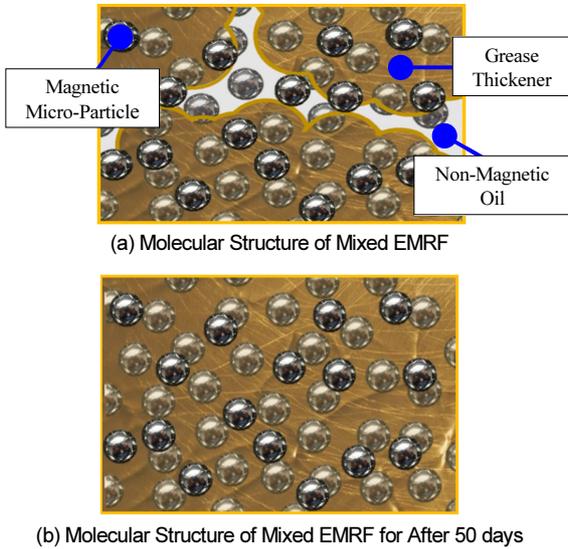


Fig. 4. Molecular Structure of Magnetic Particle Precipitation for EMRF

2.2 EMRF(Enhanced Magneto Rheological Fluid)

EMRF는 기존 MRF와 같은 원리로 유체에 혼합되어 있는 자성미립자로 인하여 자기력의 세기에 따라 Yield Stress가 증가하는 특성을 지니고 있다. 그러나 EMRF는 혼합된 Grease의 Thickener(증주제)로 인하여 장기간 유동이 없더라도 기존 MRF와 비교하였을 때 자성미립자의 침전율이 현저히 낮아진다. EMRF에 포함된 Grease의 Thickener는 유체 내에 고루 분포되면서 섬유가 얽혀있는 듯한 3차원 구조적 형태를 형성하게 된다. 이와 같은 형태로 인하여 EMRF가 유동이 없을 때 중력으로 인하여 아래로 가라앉으려는 자성미립자를 Grease Thickener가 직접적으로 간섭하게 되어 자성미립자의 분리로 인한 침강 현상을 억제하게 된다.

Fig. 4는 눈금 실린더 안에서 충격이나 진동, 혼합이 없이 50일이 지난 EMRF의 구성요소상태를 그림으로 나타낸 개념도이다.

EMRF가 혼합된 직후의 모습인 Fig. 4(a)를 살펴보면 기존 MRF와 마찬가지로 자성미립자와 유체 간에 분리 현상이 발생하지 않고 상태가 유지된다. 다음으로 혼합 후 50일간 실온에 보관된 유체인 Fig. 4(b)는 자성미립자와 유체 간의 재료 분리 현상이 발생하지 않은 것을 확인할 수 있다. 이는 유체가 오랫동안 움직임이 없더라도 자성미립자 사이에 증주제가 그물망을 형성함으로써 미립자의 침전을 방지하게 되어 미립자와 유체 간의 재료 분리 현상을 막아주게 된다. 이와 같은 결과를 바탕으로 EMRF를 사용하는 Semi-Active Damper의 경우 장기간 가동되지 않은 경우에도 설계 당시의 제어 성능을 기대할 수 있다.

3. EMRF 개발

3.1 샘플 제작

EMRF의 제작과정에서 Grease와 MRF의 적절한 배합비를 결정하기 위해 다음과 같이 실험을 준비하였다. Grease는 SK 루브리컨츠사의 ZIC

Table 1. Specification of Grease

NLGI Grade (Consistency)	2
Worked Penetration	270
Soap Type	Lithium Soap
Dropping Point	210°C
Oxidation Stability	0.10
Copper Corrosion	No Corrosion
Oil Separation (100°C %)	2.1

Table 2. Mix Proportion Ratio of Each Sample

Sample	MRF (wt%)	Grease (wt%)	Volume
A	100	0	20 ml
B	90	10	20 ml
C	80	20	20 ml
D	70	30	20 ml



Fig. 5. Production Process of Sample

ROYAL GREASE 2를 사용하였으며 Grease의 제원은 Table 1과 같다.

먼저 MRF와 Grease의 혼합 중량비를 Table 2와 같이 Grease의 함량을 10%씩 증가하며 혼합하였으며, Fig. 5와 같이 Grease와 MRF를 혼합비에 맞게 용기에 담고 교반기(Agitator)를 통하여 혼합하였다. 이때 교반기를 이용하여 공기를 빼는 과정을 거쳐 A, B, C, D 4개의 샘플을 제작하였다. 각각의 샘플별 혼합비는 중량비로 (a): MRF 100%, (b): MRF 90% Grease 10% (c): MRF 80% Grease 20% (d): MRF 70% Grease 30%이다. 이후 상온에서 충격이나 진동을 가하지 않은 채 15주(105일)간 관찰하면서 각각 분리된 유체의 부피를 측정하여 침강도를 확인하였다.

3.2 시간에 따른 침전을 비교

각각의 샘플들을 15주(105일)간 1주일에 1회 관찰하였으며, 관찰 시 재료 분리로 발생한 자성미립자의 침전 부피를 측정하였다. 측정값을 바탕으로 침전율을 Fig. 6과 같은 방법으로 계산하였다. Fig. 7은 실온 유지상태 15주차의 상태이다. 계산된 각각의 샘플 침전율은 Fig. 8에 그래프로 나타내었다.

Fig. 8의 그래프를 보면 105일이 지나고 Grease를 혼합하지 않은 (a)의 경우 16.5% 부피의 유체가 분리되어 떠오른 것을 확인하였다. Grease를 10% 혼합한 (b)의 경우 8.5%, Grease를 20%를 혼합한 (c)의 경우 4%, Grease를 30% 혼합한 (d)의 경우에는 3% 부피의 유체가 분리되어 떠오른 것을 확인하였다.

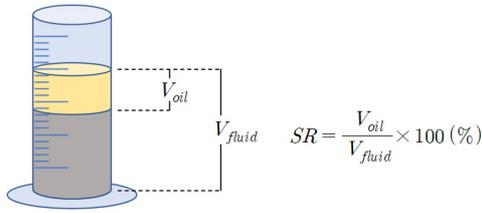


Fig. 6. Sedimentation Rate (SR)

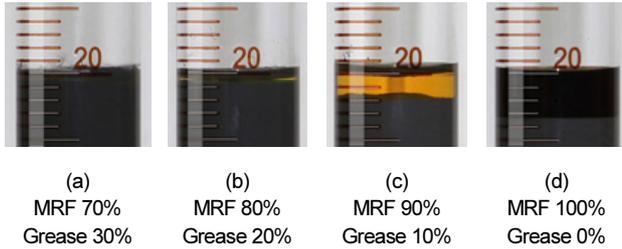


Fig. 7. Precipitation State of Samples for 105 days

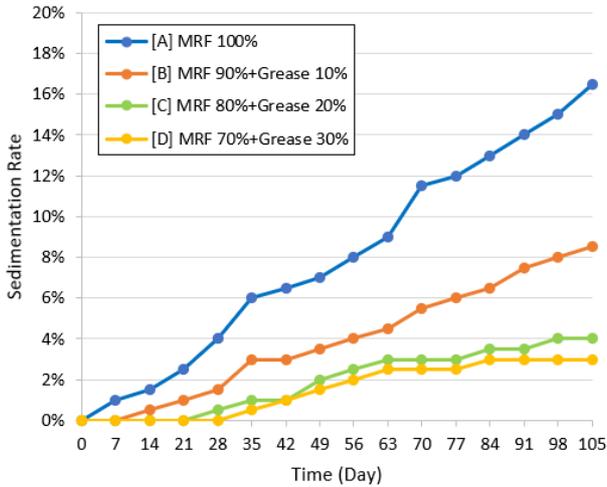


Fig. 8. Precipitation Ratio of Samples for 105 days

3.2.1 Prototype EMRF Damper 설계

앞서 각각의 비율로 혼합된 샘플들의 제어 성능을 비교하기 위하여 Damper의 Control Force를 측정하기 위한 Prototype EMRF Damper를 설계하였다. Damper의 내부에 전자석을 설치하였으며 전자석에 가하는 전류를 조절하는 것으로 전자석이 발생시키는 자기력을 조절할 수 있도록 하였으며, Prototype EMRF Damper의 개념도는 Fig. 9에 나타내었다. 또한, Damper의 작동원리를 Fig. 10에 그림으로 나타내었다. Damper는 크게 전자석(요크)과 내부 Shear Plate, Flow Path(Gap), 외부 Shear Plate로 구성되어 있다. 내부 Shear Plate 사이에 EMRF 유체를 충전한 후 내부 Shear Plate 사이를 외부 Shear Plate가 수직 방향으로 왕복운동을 하는 시스템이다. 이때 전자석에 전류를 가하게 되면 전자석은 자기력을 EMRF 유체에 전달되어 Yield Stress를 증가시키면서 Damper의 제어력을 상승시키게 된다.

Prototype EMRF Damper를 설계하기 위하여 미국의 MR Damper 제작사인 Lord사에서 제공하는 기술자료를 바탕으로 다음 식 (1)을 이용하

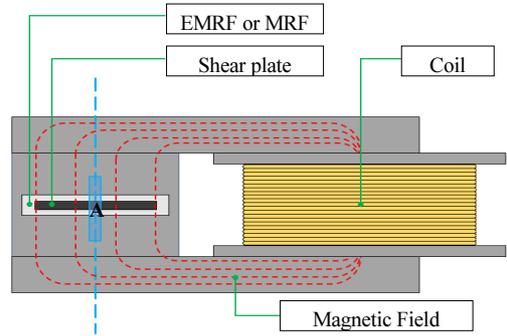


Fig. 9. Structure of Shear-Type Damper

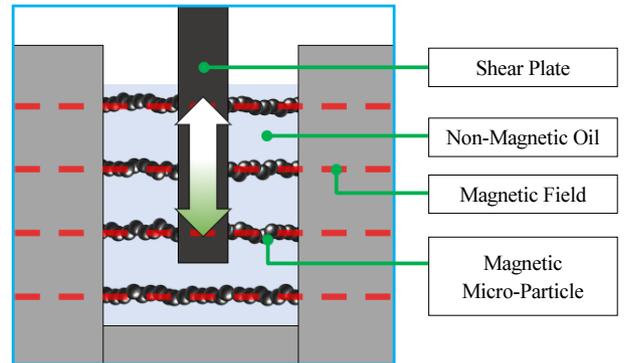


Fig. 10. Principle of Shear-Type Damper

여 설계하였다[18].

$$F = F_{\mu} + F_{\sigma}(B) \tag{1}$$

여기서, Prototype EMRF Damper의 Control Force F 는 EMRF의 점성으로 인해 발생하는 Control Force F_{μ} 와 자기력에 의해 증가한 Control Force $F_{\sigma}(B)$ 의 합으로 정리할 수 있다. 여기서 B 는 전자석이 발생시킨 자기장의 세기(자기 강도)를 가리킨다. EMRF의 점성으로 인해 발생하는 Control Force F_{μ} 는 다음 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$F_{\mu} = \frac{\mu VA}{W_{Gap}} \tag{2}$$

이때, μ 은 유체의 점성계수, V 는 Shear Plate가 왕복하는 속도이며 A 는 자기장의 작용면적, 그리고 W_{Gap} 는 자기장이 작용하고 있는 Flow Path의 간격(Gap)이다. 다음으로 자기력에 의해 증가하는 Control Force $F_{\sigma}(B)$ 는 다음 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$F_{\sigma}(B) = \sigma_Y A \tag{3}$$

여기서, σ_Y 는 유체의 Yield Stress를 뜻하며, A 는 자기장의 작용면적이다. 상기 식 (2)와 식 (3)을 식 (1)로 정리할 경우, Prototype EMRF Damper의 Control Force는 다음 식 (4)로써 나타낼 수 있다.

$$F = F_{\mu} + F_{\sigma}(B) = \frac{\mu VA}{W_{Gap}} + \sigma_Y A \tag{4}$$

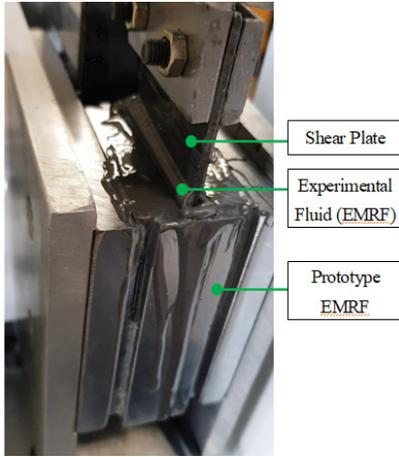


Fig. 11. Shear-type Damper

Table 3. Design Specification of shear type EMRF Damper

Maximum force (nominal)	60 kg·m/s ²
Max Stroke	20 mm (± 10 mm)
Gap size	1.0 mm
Coil turns	630 turns
Coil diameter	∅0.75 mm

여기서, μ 는 유체의 점성계수이며, σ_y 는 유체의 Yield Stress를 나타낸다. 또한, Shear Plate가 왕복하는 속도 V 와 자기장이 작용하는 Flow Path의 간격(Gap) W_{Gap} 및 자기장이 작용하는 면적 A 는 설계 과정에서 설계조건으로부터 가정하거나 결정할 수 있다.

다음으로, Prototype EMRF Damper에 장착된 전자석의 보빈 속 코일이 감긴 횟수는 다음 식 (5)에 따라 결정된다.

$$B = \frac{n_c I}{W_{Gap}} \quad (5)$$

위 식 (5)에서 B 는 전자석이 발생시킨 자기장의 세기(자기 강도)이며, n_c 는 전자석의 보빈 속 코일이 감긴 횟수를 가리킨다. 또한 I 는 공급된 전류의 세기를 뜻하며 W_{Gap} 는 자기장이 작용하는 Flow path의 간격(Gap)이다. 여기서 $n_c I$ 는 Kirchoff's Law가 적용된다.

이러한 수식을 적용한 설계를 바탕으로 Fig. 11과 같이 Prototype EMRF Damper를 제작하였으며, 제작된 Damper의 제원은 Table 3과 같다. 최대 제어력은 60 kg·m/s²로 최대 Stroke는 ±10 mm, Gap size는 1.0 mm로 하였으며, 코일 권선수는 630회 권선하였으며, 이때 사용된 코일의 직격은 ∅0.75 mm로 제작하였다.

3.2.2 인가전류에 따른 유체의 제어 성능 변화 비교

제작한 Prototype EMRF Damper에 각각의 샘플들을 사용하여 제어 성능평가를 위한 실험을 진행하였다.

실험조건은 0.5 Hz, 1.0 Hz, 1.5 Hz의 3가지 주파수로 상하 반복운동을 하도록 하였다. 또한, 각 주파수 조건에서 0.0 A, 0.5 A, 1.0 A, 1.5 A, 2.0

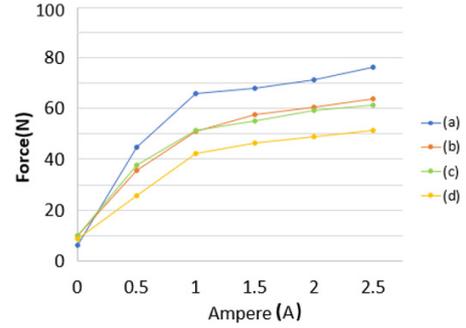
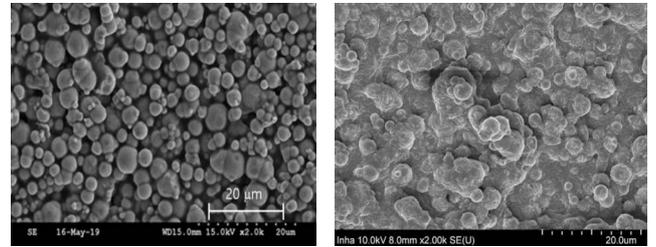


Fig. 12. Control Performance of Different Application Currents by Samples



(a) MRF (SEM x2000)

(b) EMRF (SEM x2000)

Fig. 13. Comparison of SEM Results for MRF and EMRF

A, 2.5 A로 전류의 공급량을 변화시켜 전류 공급량에 따른 EMRF Damper의 제어력을 측정하였다.

실험을 통하여 획득한 데이터를 바탕으로 각 조건에서의 제어력 성능을 분석하기 위하여 Fig. 12와 같이 그래프로 나타내었다. Fig. 12의 그래프를 살펴보면 Grease의 함량이 증가함으로써 MRF의 함량이 감소하게 되면 제어력도 감소하는 것을 확인하였다. 이는 EMRF 유체 속의 MRF 함량이 감소함과 동시에 자기력에 반응하는 자성미립자수도 함께 감소하기 때문에 발생하는 현상으로 판단된다.

이 결과를 바탕으로 침전을 대비 자성미립자의 혼합률이 높아 상대적 제어력이 뛰어난 Grease 20%를 혼합한 유체를 EMRF로 선정하였다. 선정된 EMRF의 혼합 후 Grease 증주체와 자성 입자 간에 혼합 상태를 확인하기 위하여 SEM 촬영을 진행하였다. Load 사에서 제공하는 MRF의 SEM 촬영 사진과 본 실험을 통하여 개발한 EMRF의 SEM 촬영 사진을 비교하였다. 그 결과 Fig. 13과 같이 미립자별 독립적으로 구성되어 있는 MRF와 달리 EMRF에서는 자성미립자마다 Grease Thickener에 둘러싸여 있는 것으로 확인되었다. 따라서 EMRF의 침전율이 낮은 이유는 Grease Thickener로 인하여 각각의 미립자가 간의 점성으로 끌어당김 현상으로 인하여 미립자의 침전을 방해하는 것으로 판단된다.

4. EMRF Damper 개발

4.1 EMRF Damper 설계

EMRF를 이용한 Damper가 실제 구조물에 적용 시 효과적으로 제어할 수 있는지를 제어 성능을 평가하기 위하여 Fig. 14와 같이 실린더 형태의 Damper를 설계하였다. 실린더형 Damper에 들어가는 전자석은 피스톤 내

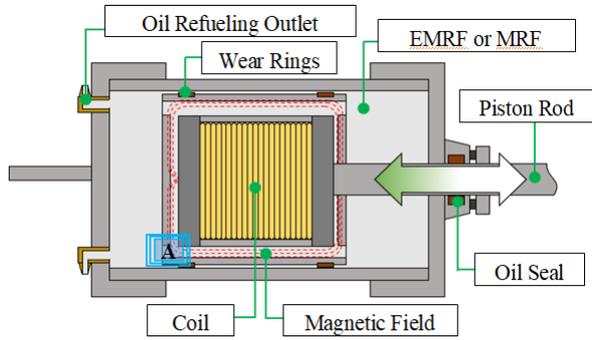


Fig. 14. Structure of Cylinder-type Damper



Fig. 15. Cylinder-type Damper

Table 4. Design Specification of Damper

Stroke (max)	20 mm (± 10 mm)
Maximum force (nominal)	3000 N
Coil diameter	∅0.37 mm
Coil turns	1750 turns
Gap	1.0 mm

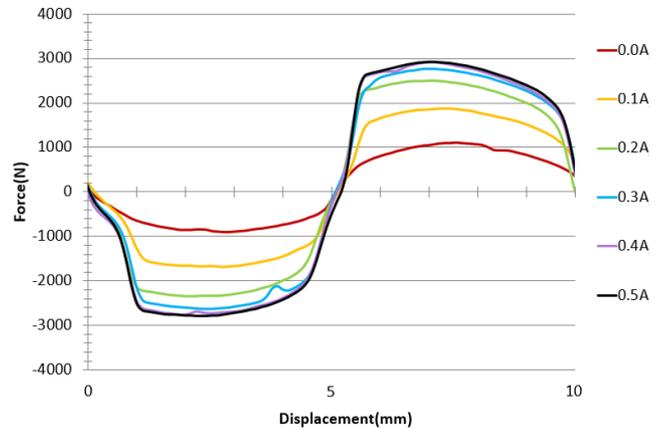
부에 장착하였고, 전류 공급을 위하여 피스톤Rod를 통하여 전선을 배선하는 형식으로 설계하였다. 또한, Damper의 EMRF 유체의 이동 유로는 피스톤 가장자리에 따로 형성하였다. 이와 같은 설계를 바탕으로 제작한 EMRF Damper의 외형은 Fig. 15와 같다. 또한, 제작된 실린더형 EMRF Damper의 제원은 Table 4에 표기하였다. 최대 제어력은 3000 N으로 최대 Stroke는 ± 10 mm, Gap size는 1.0 mm로 하였으며, 코일 권선수는 1750회 권선하였으며, 이때 사용된 코일의 직격은 ∅0.37 mm로 제작하였다. Damper의 설계에 사용된 식은 Prototype EMRF Damper를 설계한 식과 마찬가지로 미국의 Lord사에서 MR Damper 제작에 사용하는 식을 참고하였다.

4.2 EMRF Damper의 제어 성능평가

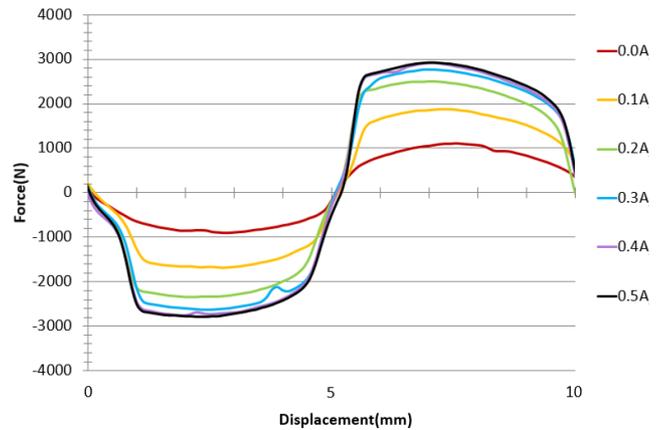
제작한 EMRF Damper의 제어 성능을 평가하기 위하여 계명대학교 첨단건설재료 시험센터에서 제어성능시험을 진행하였다.

제어 성능평가를 위한 시험 조건은 0.5 Hz, 1.0 Hz의 2가지 주파수로 수직 왕복운동을 진행하였으며, 각 주파수에 0.0 A, 0.1 A, 0.2 A, 0.3 A, 0.4 A의 전류를 공급하여 전류 공급량에 따른 EMRF Damper 제어 성능을 확인하였다.

EMRF Damper의 제어성능평가를 위한 시험결과 Fig. 16과 같다. 가진 조건이 0.5 Hz 일 때 공급 전류가 0 A인 초기 제어력은 1206.2 N을 나타내었으며, 공급 전류가 0.5 A인 최대 제어력은 2981.2 N의 제어력을 발휘하였다. 또한, 가진 조건이 1.0 Hz 일 때 공급 전류가 0 A인 초기 제어력은 112.5 N을 나타내었으며, 공급 전류가 0.5 A인 최대 제어력은 2976.3 N의



(a) 0.5 Hz-Force-Displacement



(b) 1 Hz-Force-Displacement

Fig. 16. Experiment Results of Damper

Table 5. Damper Control Force by Experimental Conditions

Applied Current (A)	Displacement [10 mm]	
	0.5 Hz [10 mm/s]	1 Hz [20 mm/s]
0.0	1206.2	1201.3
0.1	1956.4	1936.8
0.2	2589.0	2608.6
0.3	2848.8	2907.7
0.4	2981.2	2976.3
DR	2.47	2.69

제어력을 발휘하였다.

다음으로 본 제어성능평가 결과를 바탕으로 준능동 제어장치로서의 성능을 평가하기 위하여 성능지표인 DR(Dynamic Range)를 이용하여 개발된 EMRF 실린더형 댐퍼의 준능동 제어 성능을 평가하였다. EMRF Damper의 DR(Dynamic Range)는 다음 식 (6)을 통하여 확인하였다.

$$DR = \frac{F_{max}}{F_{min}} \tag{6}$$

여기서 F_{max} 은 EMRF Damper가 자기력을 사용하여 발생시킨 최대의 Control Force이고, F_{min} 은 EMRF Damper가 자기력을 사용하지 않고

발생시키는, 즉 최소한의 Control Force이다.

가진 조건별 주파수에 따라 DR을 계산해 본 결과 Table 5와 같이 0.5 Hz 조건에서 2.47, 1.0 Hz 조건에서는 2.69로 우수한 성능을 확인하였다. 이 결과를 바탕으로 개발된 EMRF Damper의 준능동제어장치 활용 가능성을 확인하였다.

4.3 동적 모델링 비교

EMRF Damper의 실험결과에 대한 신뢰성을 검증하기 위하여 Fig. 17에 나타낸 Power Model과 Bingham Model[17]를 사용하여 Damper의 Dynamic Behavior를 모델링하고 이를 실험데이터와 비교하였다.

Power Model은 점성을 가진 액체를 사용하는 Damper의 힘-속도 관계에서 Damper의 Dynamic Behavior를 힘과 속도의 관계로 표현하기에 적합한 Model이며 식 (7)과 같이 표현된다.

$$F = C_i \cdot V^n \quad (7)$$

여기서, Damper의 Control Force F 는 비선형 감쇠계수(Nonlinear Damping Coefficients) C_i 및 Damper의 피스톤 속도 V 와 지수 n 으로 정리할 수 있다.

이때 기본 가정으로부터 변수 C_i 및 n 은 주파수 및 진폭에 대하여 독립적이며 실험값과 해석 값 사이의 최소자승오차 법을 통하여 결정된다. 또한, n 이 0에 수렴하는 값을 나타낼 때에도 C_i 으로 인하여 F 가 0이 되지 않기 때문에 MR Damper의 선형거동(Linear Damping Behavior)에 대한 모사에 사용될 수 있다.

Bingham Model은 MR Damper의 Linear Damping Behavior를 모사하기 위한 대표적인 동적 Model 중의 하나로써 MRF의 항복점 이후의 흐름특성이 일정하게 나타난다고 가정한다[18]. Fig. 17에 나타낸 바와 같이 마찰장치(Coulomb Friction Slider)와 감쇠 장치(Dashpot)는 서로 평행한 상태로 연결되어 있다고 가정한다. 이 경우 Bingham Model의 힘-속도 관계는 식 (8)과 같이 표현된다[19].

$$F = F_f \operatorname{sgn}(\dot{x}) + c_0 \dot{x} \quad (8)$$

여기서, Damper의 전체 Control Force F 는 마찰력 F_f 와 부호 변환함수인 sgn , Damper의 피스톤 속도 \dot{x} 와 감쇠 계수 c_0 로 나타낼 수 있다. 이들 두 Model은 모두 그 관계식이 간단하면서도 MR Damper의 거동특성을 수치적으로 모사할 수 있다는 장점이 있다[20]. 실험을 통하여 획득한 데이터의 적정성을 검증하기 위하여 Power Model과 Bingham Model을 적용한 Model 해석(Analysis)을 수행하여 실험결과와 비교를 통한 Damper의 성능을 평가하였다. 동적 모델링은 1Hz의 가진 조건을 기준으로 진행하였다. 1Hz 조건에서의 동적 모델별 변수(Parameters)는 Table 6에 표기하였다.

Table 7은 Power Model의 해석결과는 실험결과 대비 9.3%의 오차를 보이며 우수한 일치도를 확인하였다. Table 8의 Bingham Model의 해석결과는 실험결과 대비 8.9%의 오차를 보였으며, 1 Hz에서 두 해석결과 모두 0 A 조건에서 각각 최대 오차를 나타내었다. 그 외의 조건에서는

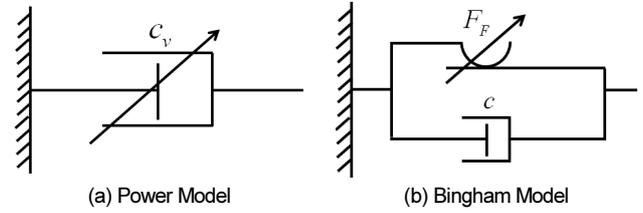


Fig. 17. Analytical Models of MR Damper

Table 6. Model Parameters of Damper

Applied Current (A)	Power Model		Bingham Model	
	C_i kg · m/s ² / (mm/s)	n	C_o kg · m/s ² / (mm/s)	F_f kg · m/s ²
0.0	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

Table 7. Analysis Results of Power Model

Power Model	Displacement [10 mm]			
	0.5 Hz [10 mm/s]		1 Hz [20 mm/s]	
Applied Current (A)	Force (kg · m/s ²)	Error rate (%)	Force (kg · m/s ²)	Error rate (%)
0.0	1202.7	0.3	1099.0	9.3
0.1	1976.9	1.0	1963.3	1.3
0.2	2583.7	0.2	2601.6	0.3
0.3	2852.2	0.1	2912.1	0.2
0.4	2997.6	0.5	2997.6	0.7

Table 8. Analysis Results of Bingham Model

Bingham Model	Displacement [10 mm]			
	0.5 Hz [10 mm/s]		1 Hz [20 mm/s]	
Applied Current (A)	Force (kg · m/s ²)	Error rate (%)	Force (kg · m/s ²)	Error rate (%)
0.0	1206.2	0	1103.2	8.9
0.1	1956.4	0	1936.8	0
0.2	2589.0	0	2608.6	0
0.3	2848.8	0	2907.7	0
0.4	2981.2	0	2976.3	0

평균 0.25%를 보이며, 최종 오차율 1.14%를 보이며, 우수한 일치도를 확인하였다. 따라서 본 연구에서 적용한 두 가지 동적 모델은 그 해석결과와 성능평가를 위한 동적 하중 실험 결과와의 우수한 일치도를 확인하면서 동적 거동특성이 잘 반영된 Model임을 평가하였다.

5. 결론

본 연구에서는 MRF를 사용하는 준능동형 Damper에서 발생하는 MRF의 자성미립자와 비자성 유체의 분리 현상으로 인한 이상 제어 현상을 완화

하기 위하여 Grease를 적용한 EMRF를 개발하였다.

기존의 MRF에 Grease를 10%, 20%, 30%의 중량비로 혼합하여 100일간 분리 현상을 관찰한 결과 Grease를 중량비 20% 이상 첨가하였을 때 분리 현상이 발생되지 않는 것을 확인하였다. 또한, 준능동제어장치에 활용되기에 적합한 제어력 발휘 여부를 확인하기 위하여 전단형 댐퍼를 이용한 자기장에 따른 항복 응력 실험을 진행하였다. 각각의 제어력을 테스트해본 결과 Grease의 혼합비율이 낮을수록 제어력이 높은 것을 확인하였다. 따라서 분리 현상이 적으면서 높은 제어력을 보인 Grease 20%의 중량비로 혼합된 유체를 EMRF로 선정하였다.

개발된 EMRF를 이용하여 실제 구조물을 제어하는 제어장치로서의 활용 가능성을 평가하기 위하여 실린더 타입 EMRF Damper를 제작하여 제어 성능 실험을 진행하였다. 그 결과 Damper에 인가한 전류량에 따라 초기 제어력이 122.6 N을 나타냈으며, 최대 0.4 A의 전류를 공급하였을 때 2986.1 N의 제어력을 발휘하면서 준능동 제어장치의 성능지표인 DR을 확인한 결과 최대 2.69까지 발휘되는 것을 확인하였다. 또한, EMRF Damper의 동적 모델링을 위해 적용된 Power Model과 Bingham Model, 모두 해석 Model과 실험결과를 비교한 결과 최대 9.3%의 오차를 보이며, 우수한 일치도를 확인하였다.

최종적으로 본 연구에서 개발한 EMRF Damper는 준능동 제어장치로서의 미립자 침전으로 인한 제어장치의 이상 제어력 성능이 개선된 우수한 제어장치임을 평가하였다.

/ 감사의 글 /

이 논문은 2018년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구사업(NRF-2018R1A6A1A03025542)임. 본 연구가 이루어지도록 지원하여 준 한국연구재단에 대단히 감사합니다.

/ REFERENCES /

1. Bridge and Tunnel Information System: Country Bridge present condition[Internet].Goyang: Korea Institute Of Civil Engineering And Building Technology; c2019. Bridge and Tunnel Information System launches exclusive research by years;2021; Available from: <https://bti.kict.re.kr/bti/publicMain/main.do>
2. Chai W, Feng MQ. Vibraton control of super tall buildings subjected to wind loads. *Non-Linear Mechanics*, 1997;32(4):657-668.
3. Ko JM, Ni YQ. Technology developments in structural health monitoring of large scale bridges. *Engineering Structures*, 2005; 27:1715-1725.
4. Soong TT, Constantinou MC. *Passive and Active Structural Vibration Control in civil Engineering*. Springer-Verlag Wien-New York, c1994.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Datta TK. A State-of-Art Review on Active Control of Structures. *ASET Journal of Earthquake Technology*. Paper, 2003 Mar;40(1): 1-17.
11. 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.
12. Rabinow J. The magnetic fluid clutch. *Electrical Engineering*, 1948;67(12):1167-1167.
13. Yang G, Spencer Jr. BF, Carlson JD, SainHeo MK. Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations. *Engineering Structures*, 2002;24(3):309-233.
14. 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(1):105-109.
15. Muhammad HI, Fitriani I, Ubaidillah, Saiful AM and Choi SB, A Concentric Design of a Bypass Magnetorheological Fluid Damper with a Serpentine Flux Valve. *Actuators*, 2020 Mar;9(1):16.
16. LORD Technical Data, MR Damper RD-8040-1, 2009 LORD Corporation OD DS7016 (Rev.0 6/09).
17. Sodeyama H, Sunakoda K, Fujitani H, Soda S, Iwata N, Hata K. Dynamic Tests and Simulation of Magneto-Rheological Dampers. *Computer-Aiided Civil and Infrastructure Engineering*, 2003;18(1): 45-57.
18. Gavin HP, Hose YD, Hanson RD. Design and Control of Electro-rheological Dampers. *Proceeding of the First World Conference on Structural Control*, Pasadena, Ca, 1994 Aug;1(3-5):WP3-83-WP3-92.
19. Carlson JD, Spencer Jr. BF. Magneto-Rheological Fluid Dampers for Semi-Active Seismic Control. *Proceeding of the 3rd International Conference on Motion and Vibration Control*, Chiba Japan, 1996;3:35-40.
20. Heo GH, Jeon JY. Dynamic Modeling of Semi-active Squeeze Mode MR Damper for Structural Vibration Control. *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 2009;13(2): 172-180.