

통합 면진 시스템 적용을 위한 MR 댐퍼 설계 및 성능 검증

서명원¹, 오종석^{2*}

¹공주대학교 미래융합공학과, ²공주대학교 미래자동차공학과

Design and Performance Evaluation of Magnetorheological Damper for Integrated Seismic Isolation System

Myeong-Won Seo¹, Jong-Seok Oh^{2*}

¹Dep. of Future Convergence Engineering, Kongju National University

²Dep. of Future Automotive Engineering, Kongju National University

요약 본 연구는 지진으로부터 통신 및 전력 시설의 보호를 위해 면진 시스템의 핵심 구성 요소로 하부의 Spring-LM Guide 방식의 면진 장치와 상부의 Spring-LM Guide가 결합된 MR 댐퍼 기반의 제진 장치를 통합하는 통합 면진 시스템을 제안하였다. 통합 면진 시스템의 공간 제약조건에 맞추어 MR 댐퍼를 설계하고 모델을 수립하였다. 또한 자기장 해석을 통해 항복응력을 도출하여 MR 댐퍼의 감쇠력 특성을 예측하고, 실험을 통해 2.5 A 전류 인가 시, 2.61 kN의 감쇠력을 확인하였다. 향후 더 정교한 감쇠력 모델링과 보상 제어 로직을 통해 MR 댐퍼 기반의 통합 면진 시스템을 구축하고자 한다.

Abstract This paper proposes a seismic isolation system to protect communication and power facilities from earthquakes. The system integrated a spring-LM guide seismic isolator with an MR damper-based seismic isolation device, with an upper spring-LM guide as the core component. The design and modeling of the MR damper were customized to fit the space constraints of the integrated system. The damping force characteristics were calculated after obtaining the yield stress through magnetic field analysis. The experimental results showed that the MR damper could generate a damping force of 2.61 kN under a current of 2.5 A. As future work, the overall performance of the integrated seismic isolation system will be evaluated by conducting advanced damping force modeling and compensation control logic.

Keywords : Seismic, Base-Isolation, Magnetorheological Fluid, Magnetorheological Damper, Damping Force, Performance Evaluation

1. 서론

튀르키예·시리아 대지진으로 인한 심각한 피해와 국내 지진 발생 증가로 인해 지진에 대한 국민들의 관심이 높아지고 있다. 지진으로 인한 통신 및 전력 시설의 손상은 통신 마비와 전력 부족과 같은 2차적인 피해를 일으킬 수 있기에 지진에 대비한 중요 설비 보호 대책이 필요

하다.

이를 위한 보호 대책은 내진 설계, 제진 설계, 면진 설계로 구분된다. 내진 설계는 구조물이 지진 진동에 견딜 수 있도록 강화하는 방법이고, 제진 설계는 부가 장치를 활용하여 구조물의 진동을 조절하여 상쇄시키는 방법이다. 면진 설계는 진동이 구조물로 전달되지 않도록 설계하는 방법이다.

이 논문은 행정안전부 재난 안전 보유 기술 성과이음 지원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00253298).

*Corresponding Author : Jong-Seok Oh(Kongju National Univ.)

email: jongseok@kongju.ac.kr

Received March 13, 2024

Revised April 15, 2024

Accepted May 3, 2024

Published May 31, 2024

면진 장치는 구조물 하부에 설치되어 수직 하중을 견디며 수평 방향으로 유연하게 움직일 수 있는 진동 격리 시스템이다. 이 장치를 사용하면 지진으로 인한 진동으로부터 건축물의 수평강성을 낮추지만, 수평 진동에 대한 변위가 허용 기준을 초과할 수 있어 에너지 소산 장치와 함께 사용하는 것이 권장된다. 대표적인 면진 장치로는 Spring-LM Guide(Linear Motion Guide)방식이 있다. Spring-LM Guide 방식은 수평 방향으로 대응 가능하나 수직 방향에 취약하다. 최근에는 Spring-LM Guide 방식에 방진고무를 도입하여 수직 방향에 대한 대응을 강화하는 방법도 제안되고 있다.

제진 장치는 건축물 내의 감쇠가 증가함에 따라 스펙트럼 가속도와 변위가 감소한다. 건축물의 내진 성능을 향상시키기 위해 제진 장치의 활용이 활발하게 진행되고 있다 [1-6]. Kato 등은 고정밀 고속 공압 조절기를 개발하여 공압 방진 테이블의 능동 제어 방안을 제안하였다 [1]. 하지만 공압 조절기는 느린 반응속도로 인한 제진 성능에 제한이 있기에, 자기장 변화를 활용하여 내부 유체의 점도를 조절하여 물리적 특성을 제어하고, 빠른 반응속도를 보이는 MR(magnetorheological) 댐퍼의 특성을 이용한 제진 장치의 연구가 활발해지고 있다 [2-8]. Seong 등은 수동형 공기 스프링, 능동형 전자기 작동기, 반 능동 MR 댐퍼를 통합한 초정밀 생산장비용 통합 제진 마운트 제작 및 성능 평가하였다 [2]. Abdeddaim 등은 세 가지 유형의 토양을 고려하여 구조물에 MR 댐퍼 기반의 면진 시스템을 적용하기 위해 파라미터 최적화를 진행하였다 [3]. Bagherkhani & Baghlani 는 불규칙한 구조물의 비틀림 횡 방향 응답을 제어하는 MR 댐퍼의 성능과 신뢰성을 평가하였다 [4]. Christie 등은 가변 공진 MR pendulum tuned mass damper를 설계하고 제안하였다 [5]. 하지만 주로 MR 댐퍼를 건축물과 같은 구조물을 보호하기 위한 연구를 진행하였으며, 통신 및 전력 시설을 보호하기 위한 연구는 거의 제시되지 않았다.

본 연구에서는 Spring-LM Guide를 이용한 바닥 면진 장치와 MR 댐퍼, Spring-LM Guide로 구성된 제진 장치를 통합하여 면진 시스템을 강화하는 것을 목적으로 한다. 목표는 진동을 효과적으로 격리 및 억제하여 지진 발생 시 통신 및 전력 시설의 복원력을 보장하는 응집력 있는 통합 면진 시스템을 개발하는 것이다. 이러한 방식은 MR 댐퍼를 상부 및 하부 플레이트에 체결 시 공간 제약이 발생한다. 결과적으로, 본 연구는 이러한 공간 제약 내에서 MR 댐퍼의 설계 및 성능 평가하는 것에 중점을 두고 있으며, 통신 및 전력 시설을 보호하기 위한 통합 면진 시스템을 제안한다.

2. 통합 면진 시스템

Fig. 1은 본 연구에서 제안하는 통합 면진 시스템의 개념도로, 최상부에는 통신 및 전력 시설의 일종인 서버 랙이 장착된다. 본 연구에서 제안하는 통합 면진 시스템은 최하단의 LM Guide를 이용하여 대 변위 진동을 저감하게 되며, Fig. 2와 같이 Spring-LM Guide와 MR 댐퍼로 이루어진 제진 장치를 통해 미세 진동을 상부로 전달하며, MR 댐퍼의 수평 동작에 대응하기 위해 Spring-LM Guide 구조를 사용한다. 능동형 작동기를 사용하면 큰 크기와 많은 동력이 필요하므로, 상대적으로 작고 적은 동력으로도 효과적인 반 능동형 MR 댐퍼를 적용한다 [9-11]. 지진 발생 시 통합 면진 시스템의 진동은 주로 수평 방향이며, 시스템 내에서는 주로 피치 모션 (pitch motion)으로 나타난다. 이에 따라 수평 방향으로 설치된 MR 댐퍼를 활용하여 효율적으로 제어 가능하다. 적용된 Spring-LM Guide는 THK사의 HSR 15B 와 HSR 15R 모델로서 변위 폭은 ± 140 mm이며, 사용된 스프링의 개수는 8개, 강성계수는 193.06 kN/mm^2 이다. 가로 세로 길이는 $350 \text{ mm} * 350 \text{ mm}$ 이고, 탑재중량은 최대 150 kg 까지 가능하며, 마찰계수는 0.003 이다.

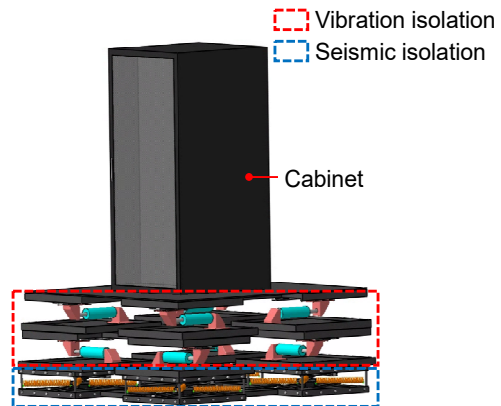


Fig. 1. Integrated Seismic Isolation System

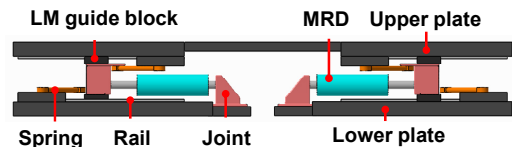


Fig. 2. MR Damper Type Vibration Isolation

3. MR 댐퍼

본 연구에서 제안된 MR 댐퍼는 모노튜브(monotube) 타입으로, 댐퍼 하부에 가스챔버(gas chamber)를 가지게 되며 압축과 신장에 따른 저장질의 체적변화를 보완하게 된다. 이러한 MR 댐퍼의 구성 요소는 Fig. 3(a)에 나타내었으며 피스톤(piston), 피스톤 로드(piston rod), 이너 코어(inner core), 가스챔버와 가스 MR 유체를 분리하면서 스트로크(stroke)에 따른 압력을 보상하기 위한 플로팅 피스톤(floating piston)이 존재한다. 본 연구에서는 공간 제약조건에 맞추어 하우징(housing)의 내경과 길이, 스트로크 조건에 따라 치수를 선정하였으며, 선정된 댐퍼의 하우징 내경은 45 mm이며, 하우징 길이는 225 mm, 최대 스트로크는 ± 50 mm이다. MR 효과를 발생시키는 자기회로는 피스톤 밸브(piston valve)에 포함되어 있으며 피스톤 밸브는 길이 방향으로 환형 오리피스(orifice)를 가지고 있으며, Fig. 3(b)과 같이 0.7 mm의 간극을 가진 4개의 틈새에서 자기장이 인가되었을 때 유체의 항복응력이 변화하게 된다. 증공 로드를 통해 코일에 전류가 인가되면 코어를 따라 자속이 발생되며, 자기회로를 형성시키게 된다. 코어 부분에 자기장을 집중시키기 위해 코어는 강자성체, 코어 주변의 평판과 피스톤 로드는 상자성체로 구성한다.

본 연구에서는 공간제약조건에 맞추어 목표 감쇠력을 위해 더블 코일(double coil) 댐퍼로 설계를 진행하였다. 일반적으로 더블 코일의 경우 싱글 코일(single coil)보다 자속밀도는 낮아지지만 항복 응력이 더 큰 장점이 있기에 이를 적용하였다 [12].

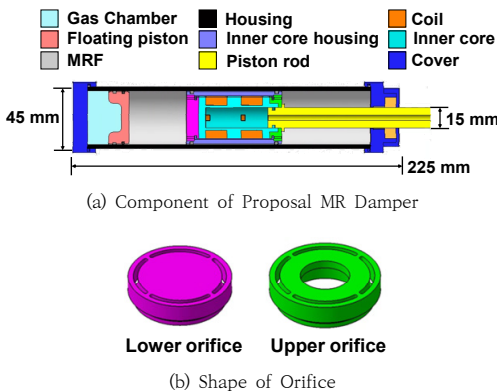


Fig. 3. Schematic of Double Coil MR Damper

이와 같은 MR 댐퍼의 감쇠력 모델링은 다음과 같이

나타낼 수 있다 [2,10].

$$F_{total} = F_{MR} + F_{vis} + F_{gas} + F_{friction} \quad (1)$$

여기서 F_{MR} 과 F_{vis} 는 각각 MR 효과에 의한 감쇠력과 점성력에 의한 감쇠력이며, F_{gas} 는 가스챔버에서의 탄성력, 마지막 항은 마찰력을 뜻한다. MR 효과에 의한 감쇠력, 점성력에 의한 감쇠력, 가스챔버에서의 탄성력과 마찰력의 총합을 F_{total} 로 나타낸다. MR 효과에 의한 감쇠력은 다음과 같다.

$$F_{MR} = (A_p - A_r)\Delta P_{MR} \text{sgn}(\dot{x}_p) \quad (2)$$

A_p 와 A_r 은 각각 피스톤과 피스톤 로드의 면적이다. \dot{x}_p 는 피스톤의 속도, ΔP_{MR} 는 피스톤 상부와 하부의 압력 차이에 따른 압력 강화로 생성되며 자기장에 따라 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta P_{MR} = \frac{cL_p}{h}\tau_y \quad (3)$$

c 는 유속계수이며, L_p 는 effective pole의 총길이, h 는 오리피스 간극, τ_y 는 자기장에 따른 항복응력으로, 자기장 해석을 통해 추후 도출된다.

점성력에 의한 감쇠력은 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 여기서 η 는 점성계수, L 은 이너 코어의 길이, b 는 피스톤에서 오리피스 간극을 제외한 원주이다.

$$F_{vis} = (A_p - A_r)^2 \frac{12\eta L}{bh^3} \dot{x}_p \quad (4)$$

가스챔버에 의한 탄성력은 아래와 같이 표현된다. P_a 는 가스의 압력과 피스톤 로드의 면적의 곱이다.

$$F_{gas} = P_a A_r \quad (5)$$

여기서 P_0 와 V_0 는 어큐뮬레이터(accumulator)의 초기압력과 부피이다. γ 는 1.4 ~ 1.7 사이의 값을 갖는 열팽창 계수이다.

$$P_a = P_0 \left(\frac{V_0}{V_0 + A_r x_p} \right)^\gamma \quad (6)$$

마지막으로 마찰력은 실험변수이기에 모델링과정에서는 포함하지 않았다.

4. 자기장 해석

MR 효과에 의한 감쇠력을 구하기 위한 방법중 하나로 자기회로에 대한 FEM 해석을 진행하였다 [12]. 이를 위해 ANSYS Maxwell 소프트웨어를 사용하여 자기장 해석을 수행하였으며, MR 유체의 $B-H$ curve를 고려하여 최종적으로 인가 전류에 따른 MR 댐퍼의 τ_y 를 도출할 수 있으며, 파라미터는 Table 1과 같이 설정하였다. 또한 해석 시간을 단축하기 위해 Fig. 4와 같이 해석 모델을 단순화하여 이너 코어, 코일, MR 유체, 이너 코어 하우징으로 구성하였다. 또한 오리피스 부분의 MR 유체 두께가 0.7 mm로 매우 얇기에 해당 부분 MR 유체의 Mesh는 2 단계로 설정하였다. 더블 코일 이너 코어 내의 EP(effective pole)은 총 세 군데의 섹터로 나눌 수 있다. Fig. 4에서 EP의 길이를 표시하였으며, EP의 자계강도는 이너 코어 내 sector의 평균 자계강도를 구하고 해당하는 값을 통해 항복응력을 도출하였다. sector 1과 sector 3은 값은 거의 동일하기에 항복응력 값을 동일하게 가정하여 진행하였다. 도출된 sector 1, 2, 3의 항복응력의 평균을 통해 이너 코어의 총 항복응력을 도출하였다. Fig. 5는 더블 코일 이너 코어에 각각 1.0 A, 1.5 A, 2.0 A, 2.5 A의 전류를 인가했을 때 자속밀도 결과이고, Fig. 6은 전류 입력에 따른 자계강도 결과이다. Fig. 5와 Fig. 6에서 컬러바(colorbar)는 각각 B field와 H field에 대한 분포를 나타내는데, Fig. 5에서는 0.0003 tesla ~ 1.9302 tesla 값을 나타내며, Fig. 6에서는 0.0349 kA/m ~ 235.2536 kA/m 값을 파란색부터 빨간색 사이의 색으로 표현하고 있다. sector 1의 A-B 거리에 따른 자계강도 결과는 Fig. 7(a)과 같으며 Fig. 7(b)는 sector 2에 대한 자계강도 결과이다. Fig. 8(a)은 본 연구에서는 RMS Technology사의 MR 유체에 대한 $B-H$ curve를 나타낸다. Fig. 8(b)은 τ_y-H 그래프이다. 이러한 과정을 통해 얻을 수 있는 τ_y 를 이용하면 Eq. (1)의 MR 댐

퍼의 총감쇠력을 얻을 수 있게 된다. 이때 제진 장치의 요구 감쇠력인 2.5 kN을 얻기 위하여 피스톤 내부의 자기회로에 대한 설계 변수를 통해 MR 댐퍼를 제작하게 되면 Fig. 9와 같다.

Table 1. Parameter of FEM Model

Specification	Dimensions
Height of Inner Core	50 mm
Diameter of Inner Core	30 mm
Total Length of Magnetic Pole	20 mm
Diameter of Coil	0.5 mm
Coil Turn Number	200 turns

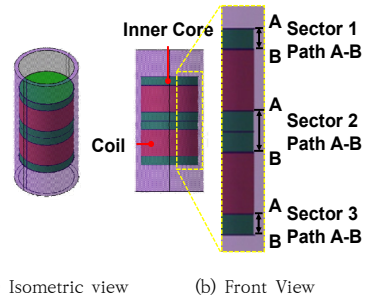


Fig. 4. FEM Modeling of MR Damper

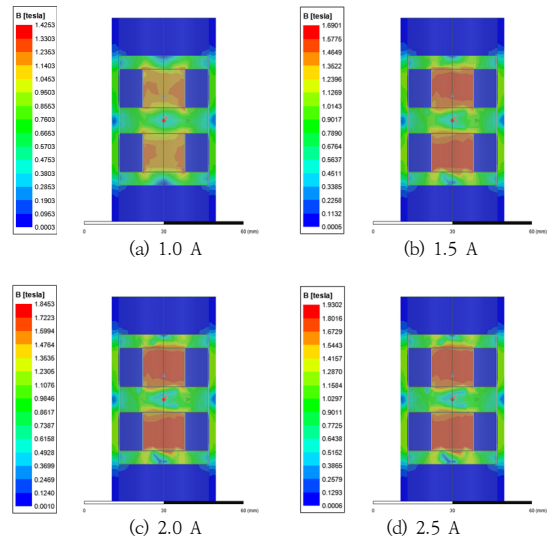


Fig. 5. Magnetic Flux Density Result of MR Damper

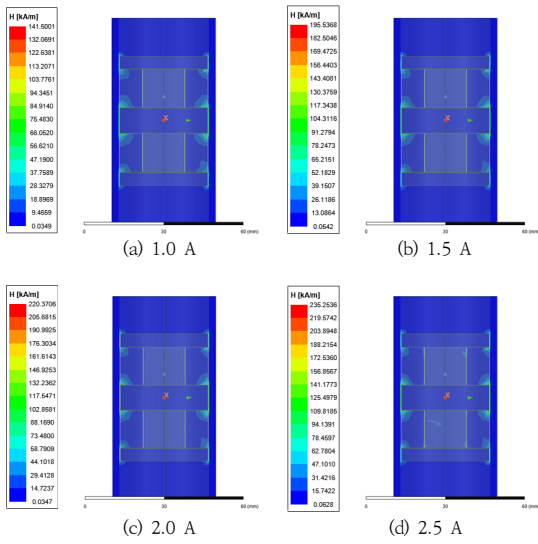
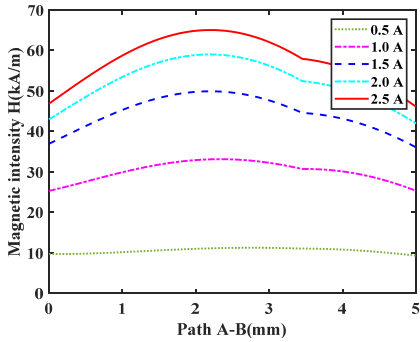
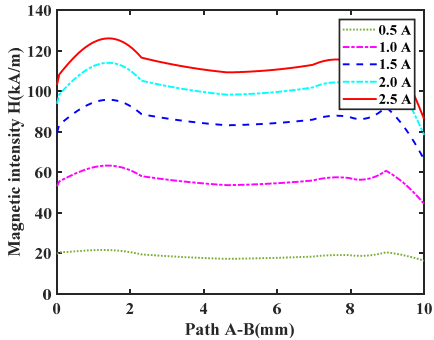


Fig. 6. Magnetic Field Intensity Result of MR Damper

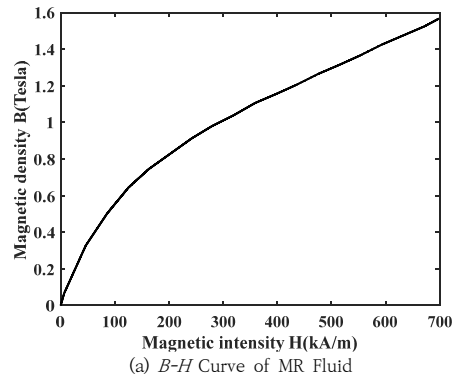


(a) Magnetic Intensity of Sector 1 Path A-B

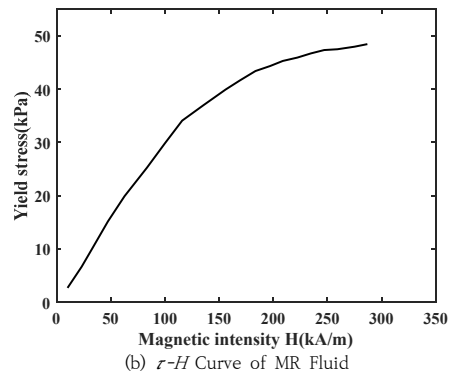


(b) Magnetic Intensity of Sector 2 Path A-B

Fig. 7. Value of Magnetic Intensity along Path A-B



(a) $B-H$ Curve of MR Fluid



(b) $\tau-H$ Curve of MR Fluid

Fig. 8. Properties of MR Fluid



(a) Component of MR Damper



(b) Assembly of MR Damper

Fig. 9. Manufacture of MR Damper

5. 성능 평가

Fig. 10은 MR 댐퍼의 감쇠력 특성을 측정하기 위한 실험 장치이다. 인가된 가진 신호에 의해 유압 가진기가 작동하여 MR 댐퍼를 가진시킨다. 이때 가진 속도는 0 m/s부터 0.2 m/s씩 증가시켜 0.8 m/s까지 속도를 증가시켰고, 전류 입력은 0.0 A부터 0.5 A씩 증가시켜 2.5 A까지 전류 입력 조건을 부여하였다. 제안된 MR 댐퍼의 최대 작동 변위는 ± 50 mm이므로 안전계수를 고려하여 ± 30 mm의 변위를 결정하였다. 또한 파워 서플라이(power supply)에서 MR 댐퍼에 인가할 전류를 결정하여 인가하면 인가 전류가 MR 댐퍼에 전달된다. 이때 MR 댐퍼의 감쇠력은 로드셀(load cell)에 의해 측정되어 컴퓨터로 전달되며, 변위는 LVDT(linear variable differential transformer)에 의해 측정된다. 또한 Fig. 11(a)에 도시된 바와 같이 전류가 인가됨에 따라 감쇠력이 증가되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 11(b)은 측정된 MR 댐퍼의 F-D(force-displacement) 그래프이다. 2.5 A의 자기장 인가 시 최대 감쇠력은 2.52 kN, 최소 감쇠력은 -2.69 kN으로 확인할 수 있다. 따라서 MR 댐퍼의 감쇠력은 2.61 kN이다. Fig. 11(c)은 측정된 MR 댐퍼의 F-V(force-velocity) 그래프이며, 속도에 따른 전류 인가 시의 감쇠력을 확인할 수 있다. Fig. 11에서 확인할 수 있듯이 MR 댐퍼는 전류인가에 따라 감쇠력이 적절하게 변화되었고 요구 감쇠력을 달성할 수 있었다. 하지만 전류를 인가하게 되면, F-D 그래프에서 완벽하게 좌우 대칭이 되지 않았다. 이는 가스챔버 내의 충전된 질소가스의 압력이 조금 더 높아지면 가스의 압력으로 인한 복원력을 통해 좌우 대칭이 될 것으로 판단된다. 또한 일그러지는 양이 시뮬레이션 결과 대비 10 %보다 작기에 해당 결과는 어느정도 무시할 수 있다고 판단되며, 향후 제어 로직 설계 시 보상 제어 로직을 적용하여 해결하고자 한다.

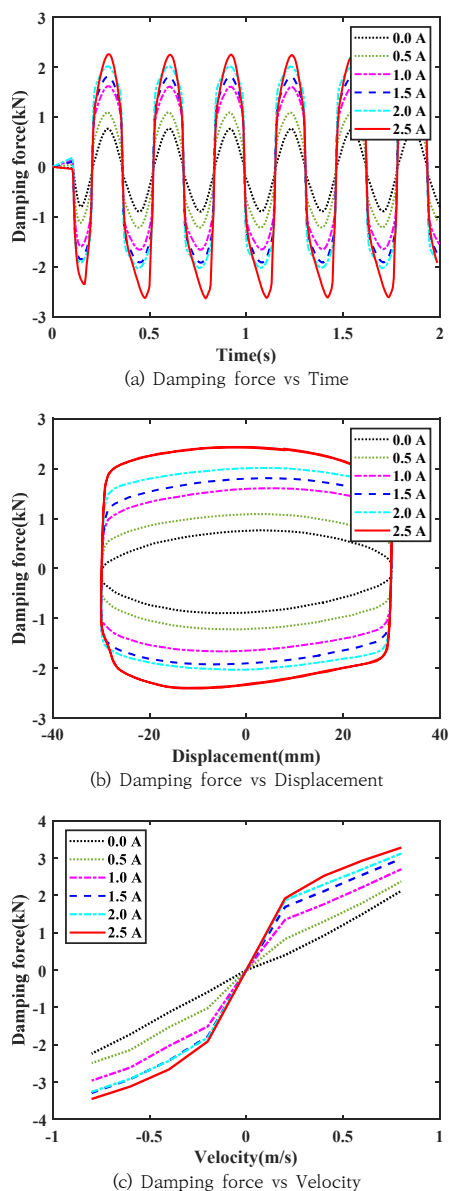


Fig. 11. Damping force characteristics

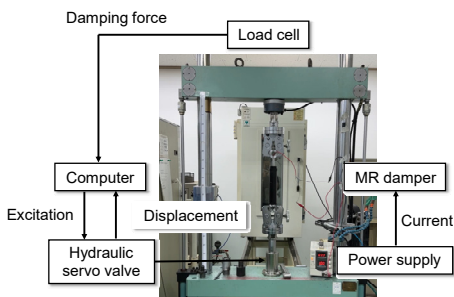


Fig. 10. Experimental Configuration of MR Damper

6. 결론

본 연구에서는 통신 및 전력 시설용 통합 면진 시스템을 위한 MR 댐퍼 설계를 진행하였다. 이를 위해 하부의 면진 장치와 상부의 제진 장치를 결합하는 방법을 제안하였다. 또한 Spring-LM Guide가 결합된 MR 댐퍼 기반의 제진 장치를 위해 설계 및 모델 수립을 진행하였다.

이후 자기장 해석을 통해 감쇠력 특성을 예측하고, 실험을 통해 2.5 A의 자기장 인가 시 MR 댐퍼의 감쇠력은 2.61 kN 성능을 확인하였다. 향후 더욱 정교한 감쇠력 모델링과 보상 제어 로직을 통해 MR 댐퍼 기반의 통합면진 시스템을 구축하여 시험할 예정이다.

References

- [1] Kato, T., Kawashima, K., Funaki, T., Tadano, K. and Kagawa, T., 2010. "A new, high precision, quick response pressure regulator for active control of pneumatic vibration isolation tables," Precision Engineering. Vol.34, pp. 43~48.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2009.01.008>
- [2] Seong, M. S., Choi, S. B., & Kim, C. H. (2011). Design and performance evaluation of MR damper for integrated isolation mount. Journal of intelligent material systems and structures, 22(15), 1729-1738.
DOI: <https://doi.org/10.1177/1045389X11421820>
- [3] Abdeddaim, M., Djerouni, S., Ounis, A., Athamnia, B., & Farsangi, E. N. (2022, April). Optimal design of Magnetorheological damper for seismic response reduction of Base-Isolated structures considering Soil-Structure interaction. In Structures (Vol. 38, pp. 733-752). Elsevier.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.02.039>
- [4] Bagherkhani, A., & Baghlani, A. (2021). Reliability assessment and seismic control of irregular structures by magnetorheological fluid dampers. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 32(16), 1813-1830.
DOI: <https://doi.org/10.1177/1045389X20977913>
- [5] Christie, M. D., Sun, S., Deng, L., Ning, D. H., Du, H., Zhang, S. W., & Li, W. H. (2019). A variable resonance magnetorheological-fluid-based pendulum tuned mass damper for seismic vibration suppression. Mechanical Systems and Signal Processing, 116, 530-544.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.07.007>
- [6] Oh, J. S., Lee, T. H., & Choi, S. B. (2018). Design and analysis of a new magnetorheological damper for generation of tunable shock-wave profiles. Shock and Vibration, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/8963491>
- [7] Yang, G., Spencer Jr, B. F., Carlson, J. D., & Sain, M. K. (2002). Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations. Engineering structures, 24(3), 309-323.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(01\)00097-9](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00097-9)
- [8] Wereley, N. M., & Pang, L. (1998). Nondimensional analysis of semi-active electrorheological and magnetorheological dampers using approximate parallel plate models. Smart materials and structures, 7(5), 732.
DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/7/5/015>
- [9] Oh, J. S., & Choi, S. B. (2019). A review on the development

of dampers utilizing smart magnetorheological fluids. Current Smart Materials, 4(1), 15-21.

DOI: <https://doi.org/10.2174/2405465804666190408153926>

- [10] Sohn, J. W., Oh, J. S., & Choi, S. B. (2015). Design and novel type of a magnetorheological damper featuring piston bypass hole. Smart Materials and Structures, 24(3), 035013.
DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/3/035013>
- [11] Han, C., Kim, B. G., Kang, B. H., & Choi, S. B. (2020). Effects of magnetic core parameters on landing stability and efficiency of magnetorheological damper-based landing gear system. Journal of intelligent material systems and structures, 31(2), 198-208.
DOI: <https://doi.org/10.1177/1045389X19862639>
- [12] Hao, J., Wang, Y., Peng, Y., Ma, H., & Wei, X. (2023). Design and Structure Optimization of Arresting Gear Based on Magnetorheological Damper. Aerospace, 10(12), 1019.
DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace10121019>

서명원(Myeong-Won Seo)

[준회원]



- 2023년 2월 : 공주대학교 기계자동차공학부 (공학사)
- 2023년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 미래융합공학과 석사과정

<관심분야>

기계 및 자동차 구동기 설계

오종석(Jong-Seok Oh)

[정회원]



- 2009년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학사)
- 2011년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2015년 8월 : 인하대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2017년 2월 : 현대모비스 미래기술연구팀 (책임연구원)
- 2021년 2월 : 공주대학교 기계자동차공학부 조교수
- 2021년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 미래자동차공학과 부교수

<관심분야>

기계 및 자동차 계측 제어 시스템 설계