

MR 댐퍼 해석을 위한 유압회로 모델에 대한 연구

A Study of the Hydraulic Circuit Model for a Magnetorheological Damper Analysis

장문석¹ · 변우진¹ · 김수태^{1*} · 안채현²

Moon Suk Chang, Woo Jin Byeon, Soo Tae Kim and Chae Hean An

Received: 26 Aug. 2016, Revised: 11 Nov. 2016, Accepted: 1 Feb. 2017

Key Words : MR Damper(MR댐퍼), Magneto-Rheological Fluid(자기유변유체), Magnetic Field(자기장), Yield Stress(항복응력), Hysteresis Loop(히스테리시스 루프)

Abstract: This paper proposes a hydraulic circuit for a Magnetorheological (MR) damper that can be used for semi-active and active controls. Methods are presented for obtaining reliable damping force displacement and velocity data, and hysteresis loop data corresponding to applied current. In order to get reliable data, analysis using electric and electronic software, a series of tests, and comparative evaluations are required. A hydraulic circuit model is proposed that can be applied to analyze a MR damper without any assumptions where the yield stress data according to the applied current are known. Analysis results of the proposed hydraulic circuit are confirmed by experimental results within acceptable tolerance. This hydraulic circuit model can be applied to various MR dampers and systems.

기호 설명

F_d : Total damping force of MR damper
 F_η : Damping force on orifice
 F_τ : Damping force due to shear stress of MRF
 p_η : Pressure due to viscosity
 p_τ : Pressure due to shear stress
 A_p : Piston area
 A_e : Total area
 A_g : Orifice area
 η : Plastic viscosity
 v_p : Piston velocity

L : Orifice length
 h : Orifice gap
 τ_y : Yield stress of MR fluid
 H : Electric field
 r_e : Total radius
 r_p : Piston radius
 c : Coefficient

1. 서 론

MR 유체(Magneto-Rheological Fluid)는 인가되는 전류 크기에 따라 유체 점성이 변화는 지능유체로 베이스 물질인 오일에 마이크로 사이즈 자성재료입자들이 분산되어 있는 형태이다. 일반적인 환경에서 자성입자는 랜덤 배열이나, 자기장이 인가되면 입자들의 배열에 따른 세기에 의해 유체의 항복응력을 조절할 수 있다.

MR 유체는 제어성이 높고 액상에서 준고체형태로 상태변화가 빨라 실시간 제어가 가능하며 제어를 위해 소모되는 전력이 작아서 반응동 및 능동제어를

* Corresponding author: stkim@changwon.ac.kr
 1 Dept. of Mechanical Engineering, Changwon UNIV, Changwon 51140, Korea
 2 Eigenscope, Cheonan 311-958, Korea
 Copyright © 2017, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

구현하는 하드웨어 요구조건을 잘 만족시키고 있다. 특히 Fig. 1과 같이 넓은 제어영역 및 연속적으로 제어 가능한 특성은 반능동 및 능동제어 시스템에서 요구하는 가장 큰 요구조건을 만족시킬 수 있어서 최근까지 자동차, 토목, 건축, 의료분야, 생활가전 및 군사무기등 여러 분야에서 활용되고 있으며 특히 댐퍼 및 마운트 시스템과 같이 제진 시스템을 필두로 MR 유체를 응용한 설계가 매우 활발히 수행되고 있다. [1~5]

예를 들어 대표적인 진동흡수 구조체인 댐퍼는 차량이나 철도 등의 현가장치로 사용되고 있으며, 세탁기 등의 가전제품이나 건물 등에 적용되어 외부로부터 들어오는 진동을 감쇠시켜 주는 역할을 한다. 그러나 이런 댐퍼들은 대부분 고무나 오일유압식 형태의 수동댐퍼로서, 진동량에 관계없이 일정한 댐핑력을 가져 진동량에 따른 댐핑력 제어가 어렵다는 단점을 가지고 있다. [6]

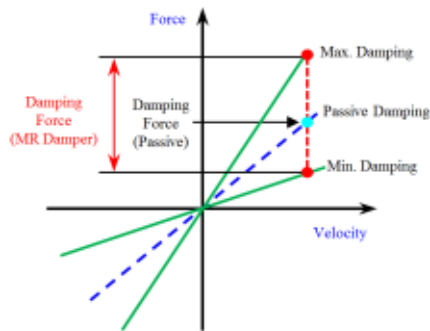


Fig. 1 Dynamic range of force control

MR 댐퍼는 기존의 상용오일 대신 자기장 크기에 따라 가변되는 성질을 갖는 MR 유체를 사용하여 기존 오일댐퍼보다 넓은 영역의 진동 감쇠 기능을 연속적으로 가능하도록 성능을 구현하는 가변댐퍼중 하나이다. 수동댐퍼와 밸브를 기반으로 하는 어댑티브 댐퍼와 비교하여 MR 댐퍼는 훨씬 낮거나 높은 영역에서 작동 가능하고 속도와 상관없이 인가전류의 단독 함수로서 넓은 영역 내에서 감쇠력 제어가 가능하다. 특히 가혹한 외란에 대해서도 저속 감쇠 및 고속 감쇠 양쪽 모두에 적합한 특성을 보유하고 있다.

지금까지 국내·외 연구를 살펴보면 MR 댐퍼 코어 변화에 따른 자기장 해석 및 자성유체가 흐르는 통로의 간극에 대한 자기장 해석에 대해 진행 되었으며, MR 댐퍼 성능 예측을 위해서는 여러 수학적 모델과 전산해석 방법론으로 ANSYS, Matlab 또는 CFD-ACE⁺와 같은 다양한 소프트웨어를 활용하고 있

다. [7,8]

MR 유체 거동을 이해하고 예측하기 위해서는 다양한 수학적 모델을 사용하는데 항복응력과 같은 가변성 있는 기계성질에 의해 복잡하다. 이는 지능유체의 점도가 전기장 인가 여부에 따라 저점도에서 준고체상태까지 변화하기 때문이다. MR 유체에 전기장 인가시 항복점까지는 고체와 유사한 특성으로 가정하면 빙햄플라스틱 모델로 고려될 수는 있지만, 빙햄플라스틱 특성을 정확하게 추종하지는 않는다. 예를 들어 유체에 전기장 인가시 항복응력이하 영역에서는 자계 세기에 영향을 받는 것으로 알려진 복소 탄성율의 점탄성 재질과 같이 작동한다. 하지만, 전기장이 인가되지 않을 때는 비뉴턴 성질이 있고 온도에 종속적이기 때문에 간단한 해석시에는 전단응력과 전달율에 관계된 빙햄플라스틱으로 간주해서 할 수는 있다. 그러나 빙햄플라스틱 모델은 속도와 부하간의 일대일로 매치되는 결과이기 때문에 실험결과와 정확하게 매치시키기는 어려움이 있다. 왜냐하면 실험결과는 히스테리시스 루프 구간이 포함되어 있어서 빙햄플라스틱 모델이후 다양하게 변형된 수학적 모델을 적용하여 근사치를 구해야하는 어려움이 있기 때문이다. [9~13]

본 연구에서는 실험평가를 위한 MR 댐퍼 모델을 제시하고 해석을 위한 유압회로 모델을 구성하였다. 유압회로 모델을 이용하여 변위-댐핑력, 속도-댐핑력에 대한 해석결과를 도출하여 실험결과와 비교하였다. 연구결과에서 유체가 가지고 있는 고유특성 때문에 다수의 가정이 들어있는 수학적 모델 적용 없이 실험결과와 유사한 히스테리시스 루프를 구현할 수 있었다. 연구 결과를 활용하면 어떠한 가정 없이도 실험결과와 유사한 히스테리시스 루프를 포함한 성능을 예측할 수 있어서 다수의 수학적 모델 검토와 실험결과 비교 및 실험을 통해 들어가는 시간과 비용을 절감할 수 있을 것으로 판단된다.

2. MR 댐퍼 이론 및 모델

2.1 MR 댐퍼 이론

MR 댐퍼에 의한 감쇠력은 압력강하에 의해 발생하는 것으로 표현하면 다음과 같다.

$$\text{감쇠력 } F_d = F_\eta + F_\tau = (\Delta p_\eta + \Delta p_\tau) A_p$$

여기서 F_d 는 MR 댐퍼의 총 감쇠력, F_η 는 오리피스에 의한 점성 감쇠력으로 속도에 비례하는 항이며

Δp_η 는 점성으로 인한 압력강하를 나타내며, F_τ 는 MR 유체의 전단 저항력으로 발생하는 감쇠력이고 Δp_τ 는 전단 저항력으로 인한 압력강하이다. 각각의 압력강하는 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta p_\eta = \frac{12\eta A_e v_p}{A_g h^2} L,$$

$$\Delta p_\tau = \frac{c\tau_y(H)}{h} L$$

여기서 $A_e = \pi r_e^2$ 으로 $2r_e = r_p + (r_p + h)$, r_p 는 피스톤 반지름, h 는 오리피스 간극이다.

η 는 점성, v_p 는 피스톤 속도, L 은 오리피스 길이이며, 오리피스 단면적 $A_g = 2\pi r_e h$ 가 된다. 항복전단응력 τ_y 는 전기장(H) 혹은 전류의 함수이며, c 는 상수로 다음과 같이 주어진다.

$$c = 2.07 + \frac{12\eta A_p v_p}{12\eta A_p v_p + 0.4A_g h\tau_y(H)}$$

여기서, c 는 $2(\frac{\Delta p_\tau}{\Delta p_\eta} < 1$ 경우)에서 $3(\frac{\Delta p_\tau}{\Delta p_\eta} > 100)$ 사이의 값이다.^[14]

2.2 MR 댐퍼 모델

Fig. 2는 본 연구에서 제안하는 MR 댐퍼 형상 및 크기를 보여주고 있다. 구성은 코일조립체, 마그네틱, 외부하우징, 양단축, 오리피스 및 양단의 실린더 캡으로 구성된다. 코일조립체 내부에 원형 덕트형상으로 오리피스가 구성되어 이 틈새로 MR 유체가 흐르게 되며, 코일조립체에 인가되는 전류 크기에 따라 항복응력이 발생될 수 있도록 외부에 자기회로가 구성된다. 전류가 인가되면 코일조립체에 있는 마그네틱 코일에 자기장이 형성되어 이를 통과하는 유체에 저항이 증가하여 좌측과 우측 챔버간에 압력강하가 발생한다. 그러므로 좌측 또는 우측으로 움직이는 방향에 따라 댐핑력이 발생한다.

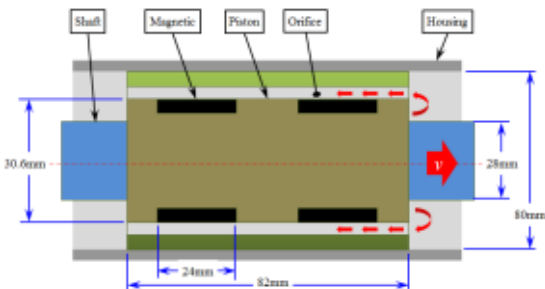


Fig. 2 Configuration of MR damper

MR 댐퍼 사이즈는 실린더 직경 80mm, 오리피스 설치부 길이 82mm, 축직경 28mm, 마그네틱 펠드(오리피스) 간극은 1mm이다. 사용된 MR 유체는 비압축성 유체로 가정하며, 오리피스를 통과시 발생하는 압력은 챔버내부에 전 방향으로 동일하게 작용되며, 디자인 형상에 따른 손실은 없다고 가정하며, 적용 유체 점도는 5,000cP을 적용하였다.

제작 및 해석에 사용된 설계변수는 Table 1과 같다.

Table 1 Design Parameters

Parameter	Value
L	82.0 mm
h	1.0 mm
r_p	15.3 mm
r_e	15.8 mm
η	5,000 cP

Fig. 3은 MR 댐퍼 이론을 적용하여 해석할 수 있도록 구성된 MR 댐퍼의 유압회로도이다. MR 댐퍼의 피스톤, 마그네틱 펠드, 오리피스 간극과 길이를 고려하여 회로를 구성하였다. MR 유체가 자기장에 의해 발생하는 τ_y 에 해당하는 영향을 모사하기 위해 Piloted hydraulic check valve를 이용하여 열리는 압력을 조절하여 성능을 구현하였다. Signal source는 변위와 속도에 대한 절대값을 인가하며, Converter는 인가된 절대값을 실제값으로 변환하여 준다. Actuator는 연구물인 MR 댐퍼를 간략화하여 구동시키기 위함이고, Orifice는 댐퍼에 적용된 실제 사이즈를 적용하였다. Hydraulic check valve와 Accumulator는 회로의 안정성을 위하여 추가되었다.

성능 해석을 위해 실린더에 진폭 15mm, 주기 1Hz의 사인파 형태 변위를 인가하여 변위-댐핑력, 속도-댐핑력 특성을 해석하였다.

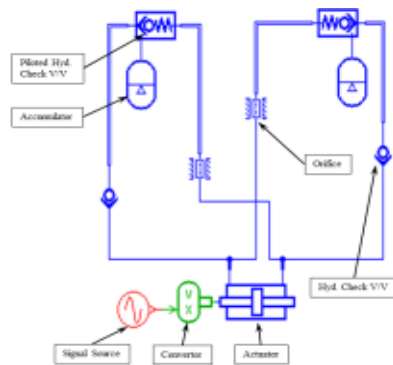


Fig. 3 Hydraulic circuit model for MR damper

3. 해석 및 실험결과

3.1 해석결과

Fig. 2에서 제안된 치수와 Fig. 3과 같은 유압 회로 모델을 이용하여 해석을 수행하였다. 상응하는 전류는 0A, 0.4A, 0.8A, 1.2A, 1.6A로 5가지 조건에 대해 해석을 수행하였다. 해석결과로 변위 및 속도에 대한 댐핑력값을 Fig. 4와 Fig. 5에 제시하였다.

Fig. 4는 MR 댐퍼의 변위-댐핑력에 대한 해석결과이다. 전류를 인가하지 않은 상태에서 최고 댐핑력은 30kN이고, 전류 1.6A를 인가할 때 최고 댐핑력은 140kN임을 확인하였다.

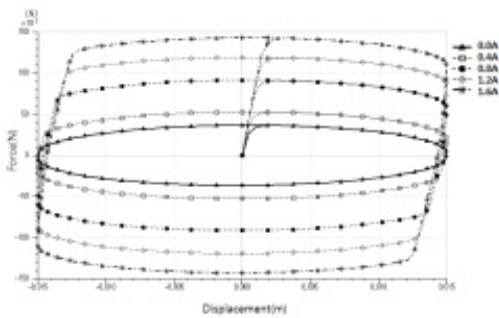


Fig. 4 Damping force vs. displacement

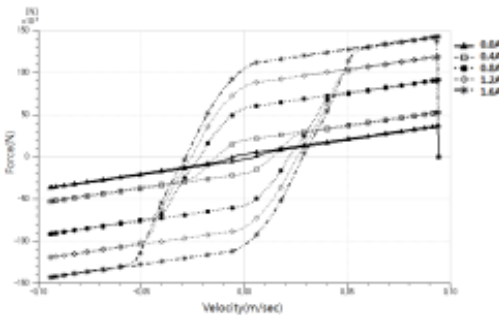


Fig. 5 Damping force vs. velocity

Fig. 5는 MR 댐퍼의 속도-댐핑력에 대한 해석결과이다. 전류를 인가하지 않은 상태에서 최고 댐핑력은 30kN이고, 전류 1.6A를 인가할 때 압축방향 140kN, 인장방향 140kN의 최고 댐핑력을 확인하였고 히스테리시스 현상이 구현되는 것을 알 수 있었다.

3.2 실험결과

해석결과와 비교하기 위해 Fig. 2에서 제시된 모델에 의해 제작된 MR 댐퍼 구성품 및 조립품은 Fig. 6과 같다. 오리피스 형상이 가공된 피스톤 내경에 마그네틱이 설치된 코일조립체를 조립후 좌, 우측에 축

을 끼워 하우징 내부에 설치한다. 실린더 하우징의 양쪽 끝단에 캡을 조립하여 고정 및 내부가 밀봉되도록 하면 조립체 형상이 완성된다.

제안된 MR 댐퍼의 댐핑력 측정을 위해 Fig. 7과 같이 실험장치를 구성하였다. 실험장치는 MR 댐퍼를 작동시키기 위한 가진 실린더와 이를 위한 유압구동기, MR 댐퍼를 수직선상에 위치시키기 위한 상, 하단 고정용 치구와 리그장치, 변위를 확인하기 위한 LVDT, 부하를 계측하기 위한 Load cell로 구성되어 있다.



Fig. 6 Photograph of MR damper

실험시 가진 실린더 변위는 $\pm 150\text{mm}$ 이며, 속도는 0.1m/sec 까지로 설정하였다. 컴퓨터에서 MR 댐퍼에 전류를 0A, 0.4A, 0.8A, 1.2A, 1.6A 5가지로 인가되도록 명령을 인가하면서 실험을 실시한다. 전류앰프를 통해 MR 댐퍼에 해당 전류가 인가되면, 가진 실린더와 MR 댐퍼 사이에 설치된 Load cell에 의해 댐핑력은 계측이 되어 컴퓨터로 전달되며, 가진 변위는 LVDT에 의해 확인된다.

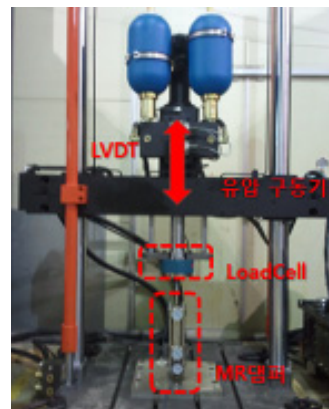


Fig. 7 Bench setup for measuring the damping force

Fig. 7과 같은 실험장치에서 실험된 결과를 Fig. 8과 Fig 9에 제시하였다.

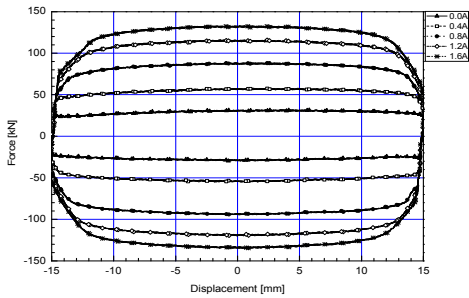


Fig. 8 Damping force vs. displacement

Fig. 8은 작동변위에 따른 댐핑력을 나타낸 MR 댐퍼의 변위-댐핑력에 대한 실험결과이다. 전류를 인가하지 않은 상태에서 최고 댐핑력은 30kN이고, 전류 1.6A를 인가할 때 최고 댐핑력은 140kN임을 확인하였다.

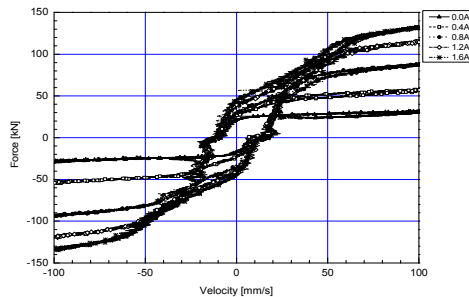


Fig. 9 Damping force vs. velocity

Fig. 9는 속도변화에 따른 MR 댐퍼의 속도-댐핑력에 대한 실험결과이다. 전류를 인가하지 않는 상태에서 최고 댐핑력은 30kN이고, 전류 1.6A를 인가할 때 압축방향 140kN, 인장방향 140kN의 최고 댐핑력을 확인하였다.

해석과 실험결과가 크래킹 위치에서 조금 상이함을 보이거나 MR 유체를 이용한 일반적인 실험에서는 해석과 유사한 경향을 보이고 있다.^[11,12]

변위 및 속도에 대한 부하 해석결과가 실험결과를 비교적 잘 예측하고 히스테리시스 현상도 구현하고 있어서, 유압회로를 이용한 MR 댐퍼 해석이 가능하다는 것을 확인하였다.

4. 결 론

MR 댐퍼를 해석하기 위하여 유압회로 모델링을 수행하고 해석 결과와 실험결과를 비교하여 다음과

같은 결론을 얻었다.

1) MR 댐퍼 해석에 적용 가능한 유압 회로 모델을 제안하였다.

2) 유압회로 모델을 이용한 해석결과가 변위-댐핑력, 속도-댐핑력에 대한 실험결과를 예측할 수 있는 것을 확인하였고, 특히 히스테리시스 루프를 잘 구현하고 있는 것을 알 수 있었다.

3) MR 댐퍼 해석에 유압회로 모델링을 적용한 해석이 가능하므로, 다양한 입력에 의한 MR 댐퍼 응답 특성에 대한 해석이 가능할 것으로 판단된다.

4) 향후 MR 댐퍼를 장착한 다양한 시스템에 대해, 본 연구에서 제안한 유압회로 모델을 활용한 해석을 수행하여 실험결과와 비교할 예정이다.

후 기

이 논문은 2017~2018년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원에 의하여 연구되었음

References

- 1) Sung Hoon Ha, Hyung, Seob Kim, Seung Bok Choi, Je-Kwan Woo, "Optimal Design of MR suspension Unit for Tracked Vehicle", KSNVE, Vol. 21, pp. 499~505, 2011
- 2) Lee, H. S., Choi, S. B. and Lee, S. K., "Vibration Control of Passenger Vehicle Featuring MR Suspension Units", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 11, No. 1, pp. 41~48, 2001
- 3) Lai, C. Y. and Liao, W. H., Vibration Control of a Suspension System via a Magneto-Rheological Damper, Journal of Vibration and Control, Vol. 8, No. 4, pp. 527~547, 2002
- 4) Woo-Cheul Park, Hyun-Chang Lee and Il-Gyoun Kim, "Study on the Compact MR Fluid Brake for the Training and sporting Equipment for Leg Rehabilitation", Journal of Korea Academia-Industrial, Vol. 13, No. 7, pp. 2878~2885, 2012
- 5) Luo Yiping, Xu Biao, Ren Hongjuan, "Summarization of Magneto-Rheological Fluid and its Application in Engineering", American Journal of Mechanics and Applications, Vol. 2, No. 1, pp. 1~5, 2014

- 6) Jong-Woo Lee, Min-Sang Seong, Je-Kwan Woo and Seung-Bok Choi, "Modeling and Vibration Control of Small-sized Magneto-Rheological Damper", KSNVE, 22(11), pp. 1121~1127, 2012
- 7) June-Han Song, Sung-Wan Son, Chong-Keun Chun, Young-Chul Kweon, and Yang-Soo Ma, "Electro-Magnetic Field Analysis for Optimal design of Magneto-Rheological Fluid Damper Core", KAIS, Vol. 9, No. 6, pp. 1511~1517, 2008
- 8) Hae-Lan Kim, Young-Shin Lee, Eun-Yup Lee, Gyu-Seop Lee, and Boo-Jin Oh, "Design of Direct-Shear Mode Mr Damper", KSME, Vol. 2007, No. 5, pp. 727~732, 2007
- 9) Norman M. Wereley, Jason Lindler, Nicholas Rosenfeld and Young-Tai Choi, "Biviscous Damping behavior in Electrorheological Shock absorbers", Smart Material Structures, Vol. 13, No. 1, pp. 743~752, 2004
- 10) L. Bitman, Y. T. Choi, S. B. Choi and N. M. Wereley, "Electrorheological Damper analysis using an Eyring-plastic model", Smart Materials and Structures, Vol. 14, No. 1, pp. 237~246, 2005
- 11) T. Butz, O. von Stryk, "Modeling and simulation of Electro- and Magnetorheological Fluid Dampers", Vol. 82, Issue 1, pp. 3~20, 2002
- 12) M. Braz Cesar, R. Carneiro de Barros, "Properties and Numerical Modeling of MR Dampers", 15th ICEM, pp. 1~17, 2012
- 13) Jolly, Bender, Carlson, Properties and applications of commercial Magneto- Rheological Fluids (Load Corporation)
- 14) Emanuele Guglielmino, Tudor Sireteanu, Charles W. Stammer, Gheorghe Ghita, Marius Giuclea, "Semi-active Suspension Control", Springer, 2012