

MR 댐퍼의 동특성 해석

Dynamic Characteristics Analysis of A Magneto-Rheological Damper

정희경 * · 백운경**

Hee Kyung Jeong and Woon Kyung Baek

Key Words : Magneto-Rheological fluid (MR 유체), Magnetic Field Analysis (자기장 해석)
Herschel-Bulkley Model (허셀 - 버클리 모델), Damping force (감쇠력)

ABSTRACT

MR(Magneto-rheological) fluid is smart fluid that can change its characteristics when magnetic fields are applied. Recently, many researches have been performed on this MR fluid for the application in a variety of areas including automobile shock absorbers. This paper describes the design procedure of a MR damper and the analysis results of its dynamic characteristics. MR fluid in the magnetic field shows initial yield shear stress and increasing resistive viscosity with final saturation thereafter. Herschel-Bulkley model is used to simulate the flow characteristics of MR fluid and magnetic analysis is used to identify the magnetic property of the MR fluid in the orifice of the damper. The dynamic characteristics of the damper was predicted and compared with the experimental results for typical sinusoidal excitations.

1. 서론

MR 유체는 자기장이 가해지면 유체의 특성이 변화하는 지능형 유체이다. 최근 이러한 유체를 이용한 다양한 분야에서의 연구가 활발히 진행되고 있다. 지진과 바람의 피해를 줄이기 위한 유용한 MR 댐퍼의 연구가 Yang et al[1]등에 의해 이루어진 바 있으며, 야지 주행 차량용 MR shock absorber도 Kelso et al[2]에 의해 연구되었다. 또한 승용차용 MR 댐퍼에 관한 연구가 Lindler et al[3]과 Lee & Choi [4]등에 의해 수행되었으며, MR seat damper와 brake를 비롯한 다양한 기구들이 LORD사에 의해 개발되었다.[5]

MR 댐퍼의 성능은 자기장 인가시에 나타나는 MR 유체의 항복 응력 현상에 의존한다. 이러한 MR 유체의 거동은 주로 Bingham 모델로 가정되어 해석되어 왔으나, MR 유체가 나타내는 Shear thinning과 같은 비뉴턴 유체(Non-Newtonian fluid) 유동을 보다 정확히 표현할 수 있는 Herschel-Bulkley 모델이 사용되고 있다.[6-7]

MR 유체의 항복 응력 증감 현상은 유체의 겔보기 점도 변화에 기인한다. 유체의 겔보기 점도는 작용되는 자기장의 형태와 크기에 따라 변화하기 때문에 정확한 댐퍼의 성능을 예측하기 위해서는 먼저 댐퍼내에 형성되는 자기장의 형태와 크기를 알아야한다. 설계된 댐퍼가 가지는 자기 회로의 타당성은 자기장 해석을 이용해 확인할 수 있다.

본 논문에서는 유체의 거동 특성을 Herschel-Bulkley 모델로 표현하였으며, 1차원 유동 해석을 통해 유체의 압력 강하를 계산하였다. 인가되는 전류에 의해 댐퍼 내부 유로에 형성되는

* 부경대학교 대학원 기계설계학과
E-mail : bluezzhk@hanmail.net
Tel : (051)620-1615, Fax : (051) 620-1615

** 부경대학교 기계공학부

자기장의 형상과 크기는 자기장 해석을 통해 알 수가 있으며, 자기장에 따른 걸보기 점도를 계산할 수 있다. 본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 댐퍼의 성능을 예측하였고, 제작된 MR 댐퍼의 실험 결과와 비교 검증하였다.

2. MR 댐퍼의 구조

MR 유체는 자기장이 유체의 흐름 방향과 직각으로 형성되었을 때 가장 큰 효과를 얻을 수 있다. MR 댐퍼내에 형성되는 자기장은 감긴 코일의 횡수, 자기 회로의 형상 그리고 자기 회로를 이루는 부품들의 재질에 영향을 받게 된다. Fig. 1은 본 연구에서 설계한 모노튜브(mono-tube) 댐퍼와 피스톤의 개략도이며, 피스톤에 자기 회로가 포함된다.

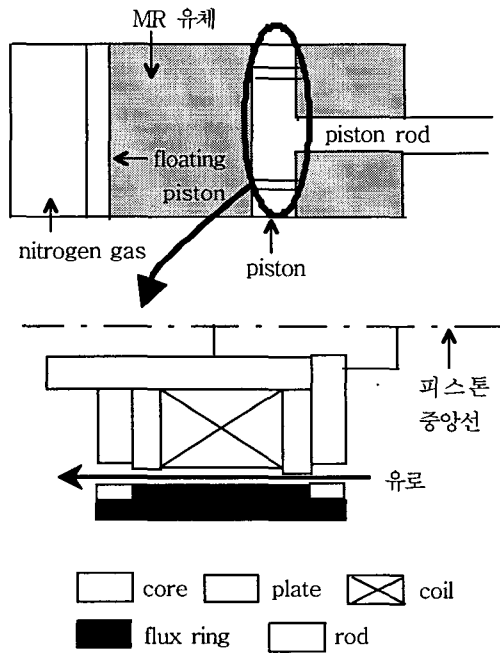


Fig.1 schematic configuration of the MR damper

Core와 flux ring은 강자성체로서 피스톤 내에 자기 회로가 형성되는 부분이다. Plate는 비자성체로서 코일에 인가된 전류로 인해 발생하는 자기장이 MR 효과가 발생하는 틈새 영역에서 유로와 수직으로 폐회로를 이룰 수 있게 한다. Rod도 비자성체로서 코어에서 발생한 자속이 rod로 누설

되지 않도록 한다.

Fig. 2와같은 자기장 해석을 통해 피스톤내에 생성되는 자속선을 확인할 수 있으며, 피스톤 중앙선으로부터 r의 거리에 있는 환형 유로 틈새에 자속선이 수직으로 집중됨을 알 수 있다.

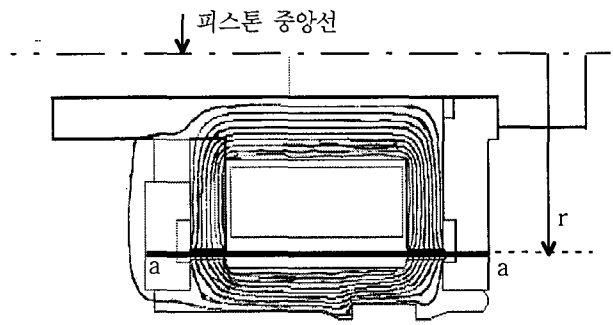


Fig. 2 Magnetic Flux lines in the piston

3. MR 댐퍼의 유동 해석

본 연구에서 사용한 MR 유체는 LORD사의 MRF 132LD 로서, 제공되는 자료를 통해 shear thinning 현상을 보인다. 이러한 거동과 항복 응력을 기술할 수 있는 Herschel-Bulkley 모델의 구성 방정식은 다음과 같다.

$$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

τ : shear stress , τ_0 : yield stress

k : consistency coefficient

$\dot{\gamma}$: shear rate (), n: flow behavior index

피스톤 내의 환형 유로는 유로 간격이 피스톤의 반경 r에 비해 아주 작으므로 환형 유로를 통과하는 유동을 1차원 평행 평판 사이의 유동으로 근사화할 수 있다. MR 댐퍼가 일정한 속도로 움직이며 유동이 충분히 발달된 정상 상태라는 가정하에, 연속 방정식 Eq. (2)와 Navier-Stokes 방정식 Eq. (3)을 적용할 수 있으며, 정리된 결과에 Eq. (1)을 대입하면 관내의 유속을 Eq. (4)와 같이 얻을 수 있다.

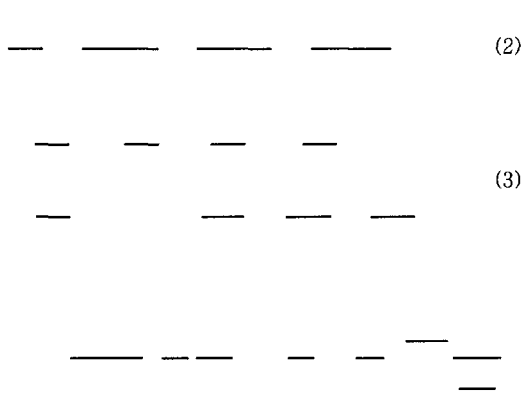


Fig.3 velocity profile & boundary condition between two parallel plates

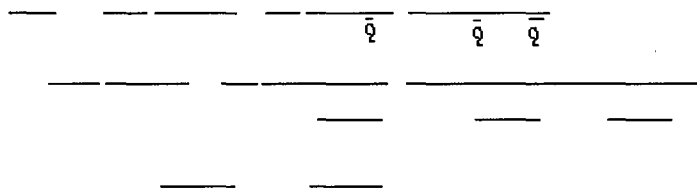
4. MR댐퍼의 자기장 해석

관내의 유속 profile과 경계 조건은 Fig. 3과 같다. Region 1과 Region 3은 전단 응력이 항복 전단 응력보다 큰 영역이며, Region 2는 전단 응력이 항복 응력보다 작은 영역으로 유체의 속도가 일정한 plug 유동을 한다. 무차원화 된 Eq. (5)의 \bar{q} 를 이용하여 환형 유로를 통과하는 총 유량 Q와 압력 손실 Δ 는 각각 Eq. (6)과 압력 손실 Eq. (7)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\bar{q} = \frac{Q}{\pi d} \quad (5)$$

$$\Delta = \frac{12 \mu L}{d^3} \left(\frac{Q}{\pi d} \right)^2 \left(\frac{1}{3} + \frac{2}{3} \frac{d}{h} \right) \quad (6)$$

(b: 평균원주)



비선형 대수 방정식인 Eq. (7)에서 Δ 는 뉴턴-랩슨(Newton-Raphson)법을 이용한 수치해석을 통해 구할 수 있다.

일반적으로 자기장 세기는 Biot & Savart 법칙에 따르면 피스톤의 중심으로부터 멀어질수록 약해진다. 그러나 본 연구에서 설계된 피스톤의 경우, 자기장이 형성되는 틈새가 0.6mm로서 피스톤 반경에 비해 매우 작기 때문에 틈새의 자기장 세기가 일정하다고 볼 수 있다. 피스톤 길이 방향의 자기장 세기를 자기장 해석 프로그램인 MAXWELL을 이용하여 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 r은 피스톤 중앙선으로부터의 거리이며, Distancet는 Fig. 2에 그려진 a-a선의 길이이다. 따라서 MR 유체가 통과하는 틈새 유로내의 자기장의 세기는 틈새 중앙의 값으로 취할 수 있으며, 자기장에 의존하는 항복 응력값도 틈새 내에서 일정한 값을 갖는다고 할 수 있다.

LORD사로부터 제공된 자료에서 MRF 132LD의 항복 응력은 ($a=-1.36129$, $b=0.35928$, $c=-8.23391E-4$, $d=4.67969E-7$, H = 자기장 세기(kA/m))의 관계를 가짐을 curve fitting을 통해 구하였다.

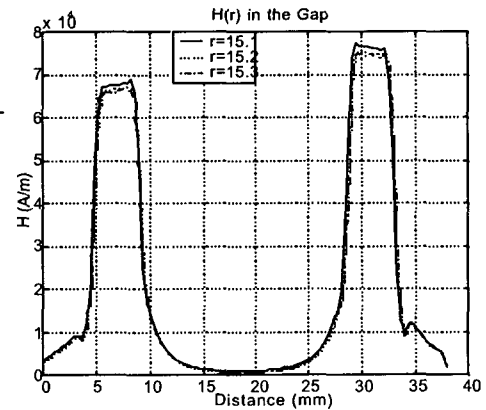


Fig. 4 H(r) in the toroid gap (0.4A)

감쇠력을 구하는 계산 과정은 Fig. 8과 같이 요약할 수 있다.

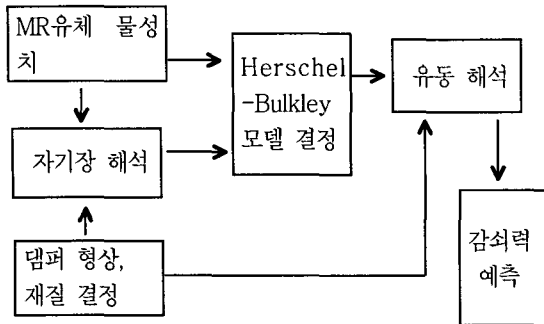


Fig.8 Computation procedure of the damping force

6. MR 댐퍼의 동특성 실험 결과를 통한 검증

본 연구에서 제작된 MR 댐퍼와 시험 장치를 Fig. 9에 나타내었다.

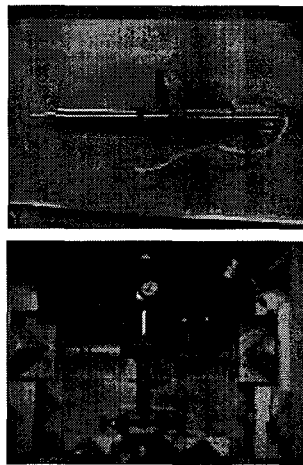


Fig. 9. MR damper and test equipment

댐퍼는 50mm의 진폭을 가지고 10(최대 0.0524 m/s), 50(최대 0.2618 m/s), 100(최대 0.5236 m/s) CPM(cycle/min)으로 가진되었다. 전류를 가하지 않았을 때와 1.0A의 전류를 인가했을 때의 실험 결과와 예측된 댐핑의 F-V 선도를 Fig. 10에, F-D 선도를 Fig. 11에, F-V 이력 현상을 Fig. 12에 나타내었다. 실선은 실제 실험 결과를 점선은 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

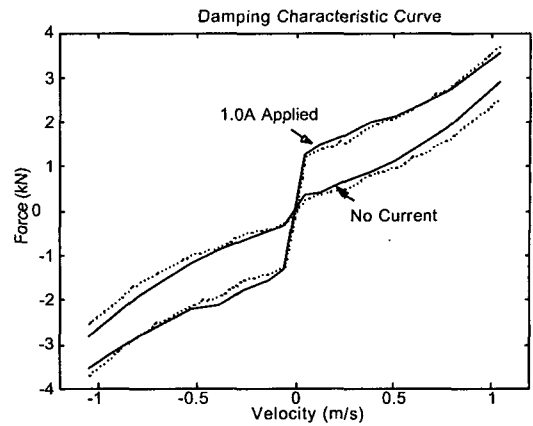


Fig. 10 Damping characteristic curve

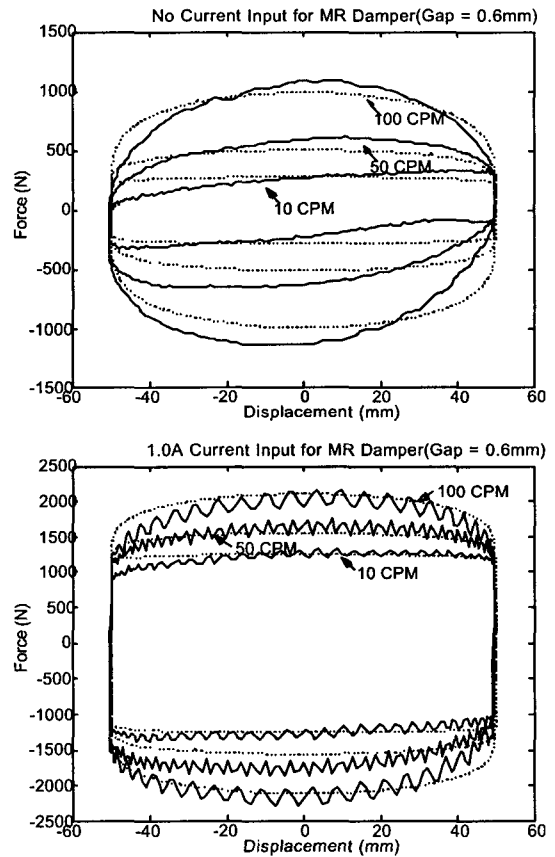


Fig. 11 F - D diagram

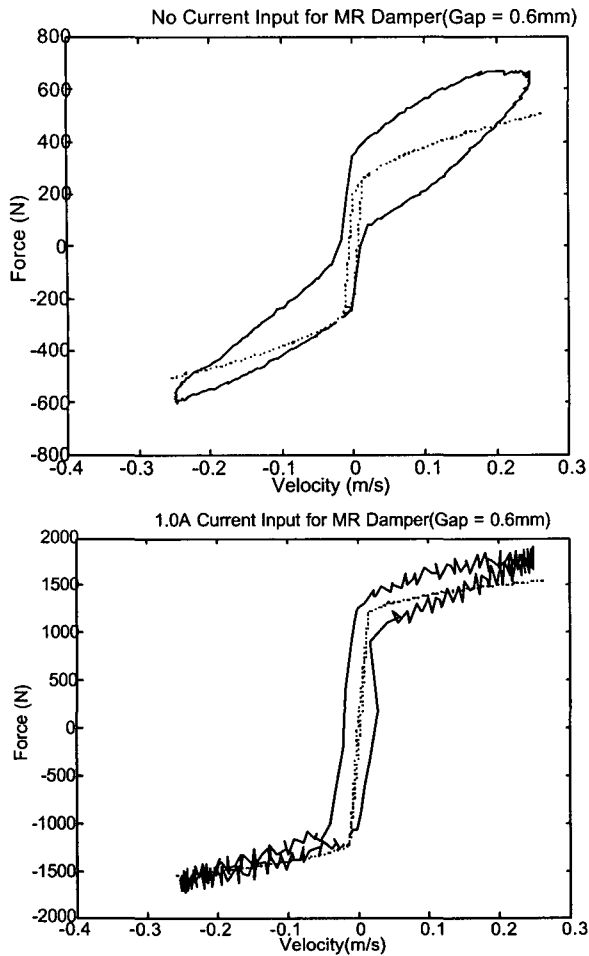


Fig. 12 F - V hysteresis loop for 50 CPM

4. 결론

본 논문에서는 설계 단계에서 MR 댐퍼의 동특성을 예측할 수 있는 해석 방법을 제시하였다. 또한, 실험을 통해 그 결과를 검증하였으며, 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) MR 유체의 유동해석에는 Herschel-Bulkley 모델이 잘 적용되나, shear thinning 현상과 댐핑력을 정확히 구현하기 위해서는 K , n 값이 정확해야 한다.
- 2) 자기장 해석을 통해 정확한 자기장 세기(H)를 구하면 전류에 따른 MR 유체의 항복응력을 구할 수 있다.
- 3) 본 연구에서 제안된 해석 과정을 통해 MR 댐퍼의 감쇠력을 예측할 수 있다.

참고 문헌

- (1) G. Yang, B.F. Spencer, Jr., J.D. Carlson and M.K.Sain , , "Large-scale MR Fluid dampers : modeling, and dynamic performance considerations, " Engineering Structures, Vol. 24 pp. 309-323, 2002
- (2) Shawn P. Kelso and Faramarz Gordaninejad , "Magneto-Rheological Fluid shock Absorbers for Off-Highway, High-Payload Vehicles, " SPIE Vol. 3672, 1999
- (3) Jason E. Lindler, Glen A. Dimock and Norman M. Wereley , " Design of a Magnetorheological Automotive Shock Absorber, " Proceeding of SPIE Vol. 3985, 2000
- (4) HWAN-SOO LEE and SEUNG-BOK CHOI , " Control and Response Characteristics of a Magneto - Rheological Fluid Damper for Passenger Vehicles," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 11, 2000
- (5) <http://www.rheonetic.com>
- (6) Xiaojie Wang and Faramarz Gordaninejad, " Study of field-controllable, electro- and magneto-rheological fluid dampers in flow mode using Herschel-Bulkley theory, " Proceedings of SPIE Vol. 3989, 2000
- (7) Dug-Young Lee and Norman M. Wereley , "Analysis of electro- and magneto-rheological flow mode dampers using Herschel-Bulkley model," Proceedings of SPIE Vol. 3989, 2000
- (8) KWANGJIN LEE , " Numerical Modelling for the Hydraulic Performance Prediction of Automotive Monotube Dampers," Vehicle System Dynamics, Vol. 28 , pp. 25-39 , 1997