

# 자기점성유체 댐퍼의 자기장 및 유동 해석에 따른 성능비교

## Comparison of Performances refer to Magnetic and Fluid Analysis of Magneto-Rheological Flow Damper

송준한†·손성완\*·이규섭\*\*·전종균\*\*\*

Jun-han Song, Sung-Wan Son, Gyu-Seop Lee and Chong-Keun Chun

**KeyWords :** Magneto-Rheological Fluid(자기점성유체), Damper(제진기), Magnetic Analysis(자기장 해석), Flow Analysis(유동 해석), Universal Testing Machine(만능시험장치)

### Abstract

The magneto-rheological fluid expresses different cohesiveness according to the strength of the external electric current. To manufacture the magneto-rheological fluid damper that uses such characteristics of the fluid, a flow analysis of the inner damper was conducted to forecast the damper's capacity. In addition, using the finite element method software, analysis on the characteristics of electromagnetic field around the coil operation unit inside the damper. Based on the result of the analysis, a single core damper and a double core damper were built and tested for their dynamic function. Based on the result of the experiment, the propriety of the flow analysis was demonstrated, and the proposed model was verified.

댐퍼를 제작하는 방법에 관한 연구를 수행하였다<sup>(1-4)</sup>.

### 1. 서 론

산업의 발달과 생활수준의 향상으로 소음과 진동에 대한 관심이 증대되고 있으며 그에 따라 진동을 제어하기 위한 방법에 대한 연구가 다방면에서 진행 중이다. 그 중 능동적인 제어가 가능한 스마트 유체에 관한 연구가 진행 중이다. 스마트 유체 중 가장 각광받고 있는 자기점성유체(Magneto-Rheological Fluid)에 관한 연구는 토목, 건축, 기계, 국방, 의료 등 다양한 분야로의 응용을 위해 대학기관, 기업 연구소 등에서 활발한 연구가 진행되고 있다. MR 유체는 반응 속도가 빠르며 적은 전력의 사용, 불순물의 영향이 적고 정숙한 사용 환경 등의 장점이 있기 때문에 여러 분야의 응용이 기대된다. 본 논문에서는 자기점성유체의 거동 특성을 이용한 MR 댐퍼의 유동 해석과 자기장 해석을 실시하여 댐퍼의 거동 특성을 파악한 후 그 결과를 바탕으로 일단 코어 댐퍼와 이단 코어 댐퍼를 제작하고 성능 실험을 실시하고 실험 결과 비교를 통해 고효율, 대용량의

### 2. MR 댐퍼 해석 및 코어 설계

#### 2.1 MR 유체 및 MR 댐퍼

MR 유체는 Mineral이나 Silicon으로 이루어진 작동 유체와 응고되지 않도록 코팅 처리된 수십 마이크로 크기의 철 입자들로 구성되어 있다. 자기장이 인가되지 않을 때는 Fig. 1의 왼쪽 그림과 같이 Newtonian Fluid와 같은 거동 특성을 가지지만 외부에서 자기장이 인가되면 Fig. 1의 오른쪽 그림과 같이 자기장의 흐름 방향에 따라 Bingham 입자들이 결합하여 일시적으로 점도 변화를 일으키는 유체이다.

빙햄 유체의 거동 특성은 식 (1)과 같이 점성  $\mu$ 와 전단 변형률 속도  $\dot{\gamma}$ 에 의해 생기는 응력과 자기장(H)의 함수 형태로 나타낼 수 있다.

$$\tau = \tau_y(H) + \mu \dot{\gamma} \quad (1)$$

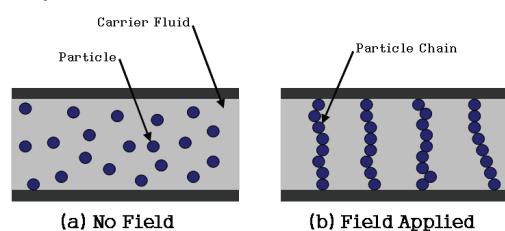


Fig. 1 Behavior of MR fluid

† 교신저자: 알엠에스테크놀러지(주)

E-mail : rmstech@rmstech.co.kr  
Tel : (041) 556-7600, Fax : (041) 556-7603

\* 알엠에스시스템(주)

\*\* 알엠에스테크놀러지(주)

\*\*\* 선문대학교 기계공학부

인가되는 자기장에 반응하는 MR 유체의 거동 특성을 이용하여 주변 환경에 능동적으로 대응할 수 있는 MR 댐퍼의 구현이 가능하다. Fig. 2는 본 연구에서 제작된 관통형 MR 댐퍼의 개념도이다. MR 댐퍼는 크게 Cylinder Body와 Magnetic Core, Piston Rod로 나눌 수 있다. 외부에서 Core 내부의 코일로 전류를 인가하면 코일이 자화하고 그로 인해 자기장이 형성된다. 자기장은 그림에 표시된 점선을 따라 이동한다. 이 때 Orifice Gap을 통과하게 되는데 Orifice Gap은 유체의 이동 통로로서 MR 유체의 결합으로 이 부분에서 일시적인 점도 변화가 일어나고 그로 인해 전단력이 발생한다.

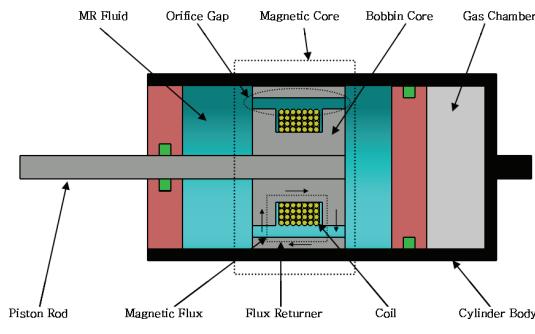


Fig. 2 Schematic of MR damper

## 2.2 MR 댐퍼 유동해석

전류가 인가되지 않을 시 MR 댐퍼의 댐핑력을 계산해보기 위해 Orifice Gap을 통과하는 MR 유체의 유동해석을 실시하였다<sup>(5-7)</sup>. 본 연구를 통해 제작하고자 하는 관통형 MR 댐퍼는 Flow Mode와 Shear Mode를 결합한 형태이다. 해석을 위해 Fig. 3과 같이 모델을 정의하였다. 해석의 편의성을 위해 환형 덕트의 형상이 아닌 정상유동 사각 덕트에 대한 해석을 실시하였다. 자기장이 인가되면 Orifice Gap 내부에서는 유체의 전단응력이 댐퍼의 항복 전단 응력을 초과하는 항복 전 영역(Pre-yield Region) 한 구간과 댐퍼의 항복 전단 응력이 유체의 전단응력을 초과하는 항복 후 영역(Post-yield Region)이 두 구간 존재한다고 가정하였다.

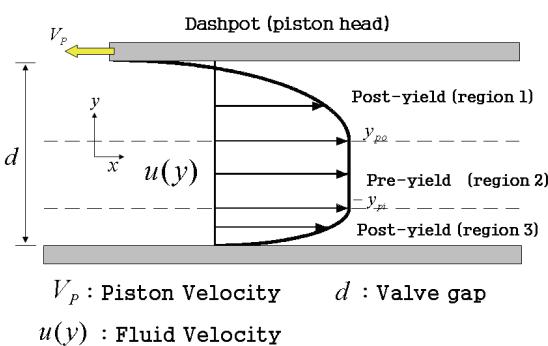


Fig. 3 Velocity Function of Moving Piston in Orifice Gap

덕트 내부에서 일어나는 MR 유체의 압력 강하에 관한 식은 덕트의 길이  $L$ 과 유속의  $y$ 축 좌표로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 이 식과 모델에서 고려할 수 있는 경계조건을 이용하여 식 (3)과 같이 각 구역에서의 유속 함수를 나타낼 수 있다.

$$\Delta P = -\frac{d\tau}{dy} L \quad (2)$$

$$u_1 = -\frac{\Delta P}{2\mu L} [(y - y_{po})^2 - (\frac{d}{2} - y_{po})^2] - V_p \quad (3)$$

$$u_2 = \frac{\Delta P}{2\mu L} (\frac{d}{2} - y_{pi})^2 - V_p$$

$$u_3 = -\frac{\Delta P}{2\mu L} [(y + y_{pi})^2 - (\frac{d}{2} - y_{pi})^2]$$

각 구역의 유속 함수의 합으로 덕트를 흐르는 유량을 식 (4)와 같이 표현할 수 있으며 유량과 속도, 단면적의 관계인 식 (5)를 이용하여 피스톤의 상대 속도를 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_d = \frac{\Delta Pb}{6\mu L} [2(\frac{d}{2} - y_{pi})^3 + 3(\frac{d}{2} - y_{pi})^2 (\frac{d}{2} + y_{pi}) - (\frac{d}{2} - y_{po})^3] \quad (4)$$

$$Q_d = A_p V_p = A_d \bar{A} V_p, A_d = bd \quad (5)$$

$$V_p = \frac{\Delta P d^2}{12\mu L A} [(1 - \bar{\delta})^2 (1 + \frac{\bar{\delta}}{2}) - 6(1 - \bar{\delta}) \bar{y}_c + 6 \bar{\delta} \bar{y}_c^2] \quad (6)$$

피스톤의 속도를 이용하여 전류 입력이 없을 시의 댐퍼의 등가점성 계수를 식 (7)과 같이 표현할 수 있으며 전류입력이 없는 상태의 댐퍼와 전류 입력에 따른 댐퍼의 성능 비를 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$C_o = \frac{12A_p^2 \mu L}{bd^3} (1 + \frac{1}{2A}) \quad (7)$$

$$\frac{C_{eq}}{C_0} = \frac{1 - \frac{\bar{\delta}}{6(1+2\bar{A})^2} (1 + \frac{\bar{\delta}}{2})}{(1 - \bar{\delta})^2 (1 + \frac{\bar{\delta}}{2})} \quad (8)$$

## 2.3 자기장 해석 결과를 이용한 MR 댐퍼 코어 설계

MR 효과를 좌우하는 댐퍼의 Bobbin Core 형상 설계를 위해 상용유한요소해석 프로그램 ANSYS/EMAG 2D를 사용하여 자기장 해석을 수행하였다<sup>(8,9)</sup>. 해석 시간의 단축과

편의성을 위해 2차원 축대칭 형상에 대한 해석을 수행하였으며 2차원 8절점을 갖는 자기장 해석 요소를 사용하였으며 Voltage와 Current는 직접 입력하는 해석 방법을 사용하였다.

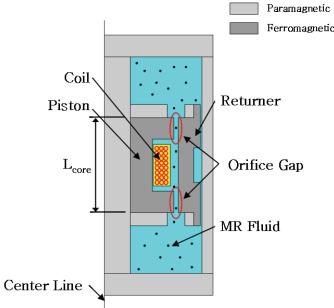


Fig. 4 2-D Axisymmetric MR damper

코어의 형상에 따라 코일의 자화 시 발생되는 자기장의 전류밀도 비교를 위해 Fig. 5에 표기된 A, B 두 부분의 비율을 달리하여 해석을 수행하였다.

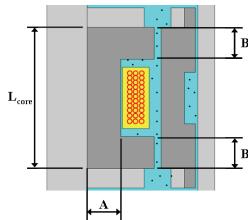


Fig. 5 Simulation Variables of MR damper

첫 번째로 A, B의 치수가 동일한 경우에 대한 해석(Case 1)을 수행하였고 두 번째는 A의 치수가 B 부분 치수의 1/2 인 경우(Case 2)에 대한 해석을 수행하였다. 마지막으로 B의 치수가 A의 치수의 1/2 인 경우(Case 3)에 대한 해석을 수행하였다. 해석을 위한 모델링은 Fig. 6과 같고 해석 시 인가되는 전류의 세기와 각 물질의 물성치는 동일하게 입력하였다.

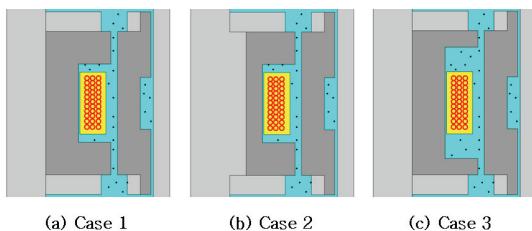


Fig. 6 Modeling for Simulation

해석 후 Orifice Gap을 통과하는 전류밀도의 수치적인 값들의 비교를 위해 Core 부에서 발생되는 전류밀도의 양을 측정하여 비교해 보았다. Case 1의 경우, 즉 A, B의 치수가 동일할 경우가 그렇지 않을 경우에 비해 전자기장의 집중과 전자기력의 전달 측면에서 우수한 성능을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

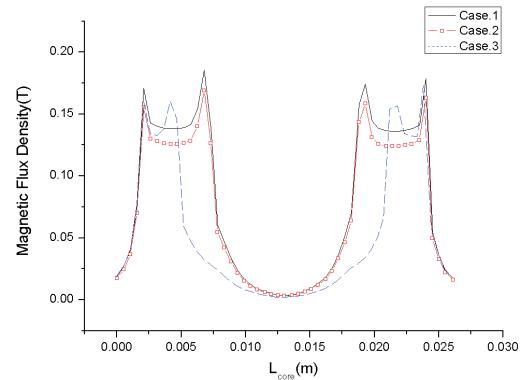


Fig. 7 Comparison of Magnetic Flux Density at Orifice Gap

코어의 길이가 제한되었을 때 댐퍼의 성능을 극대화시키기 위한 대안으로 코일 작동부를 이단으로 구성하여 자기장 해석을 실시하였다.

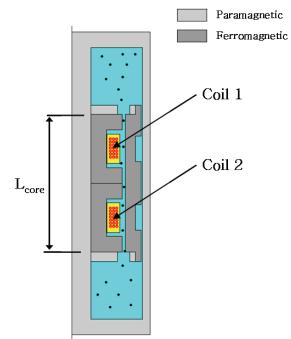


Fig. 8 Double Core MR damper

두 코일 작동부를 같은 방향으로 감았을 경우와 다른 방향으로 감았을 경우에 대한 해석을 수행하였다. 두 코일을 동일한 방향으로 감은 경우는 두 코일이 독립적인 흐름을 나타내지 않고 있기 때문에 다수의 Particle chain을 형성해 큰 전단력을 일으키고자 하는 의도와는 다른 일단 코일 작동부와 같은 성능을 나타낼 것으로 기대되지만 다른 방향으로 감았을 경우는 각자 독립된 흐름을 보이고 있기 때문에 다수의 Particle chain을 형성하고 그에 따라 큰 전단력을 발휘할 것으로 기대된다.

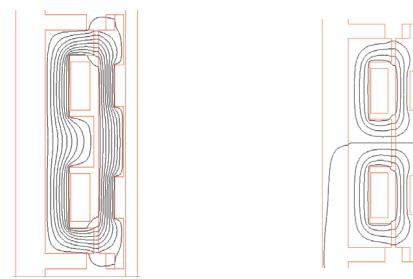


Fig. 9 Simulation Result

## 2. MR 댐퍼 성능 비교 실험, 결과 고찰

### 3.1 성능 실험 준비 사항

일단 코어 댐퍼와 이단 코어의 성능 비교를 위해 해석 결과를 바탕으로 MR 댐퍼를 제작하였다. 제작된 댐퍼의 성능 실험은 만능실험장치(Universal Testing Machine)를 이용하여 인장 압축을 실시하고 그에 따른 댐핑력을 측정하였다<sup>(10)</sup>. 댐퍼의 실험 변수는 댐퍼의 작동 변위와 인가되는 전류, 인장 압축 주파수이다.

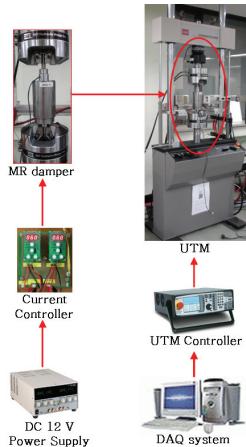


Fig. 10 Experimental Procedure

Fig. 11~13은 변위와 입력전류가 동일할 경우 주파수별로 일단 코어 댐퍼와 이단 코어 댐퍼의 성능을 비교한 그래프다. 일단 코어 댐퍼는 주파수 증가에 따라 일정하게 댐핑력의 세기가 증가했지만 이단 코어 댐퍼의 댐핑력 세기 증가량은 일단 댐퍼의 증가량과 달리 그 증가량이 작다. 그 이유는 이단 코어 댐퍼에서 발생하는 전자기력이 댐퍼 소재 자체의 포화점에 다다르고 있어 코일의 자화 시 발생되는 전자기장을 충분히 전달하지 못하고 있기 때문이라고 판단된다.

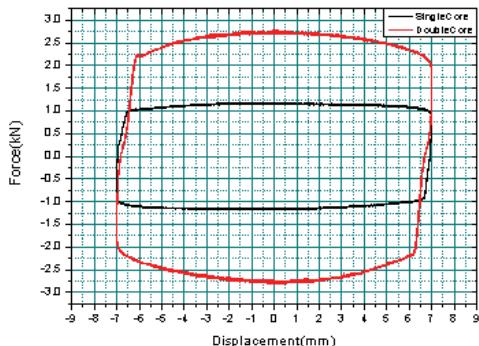


Fig. 11 Comparison of Single and Double Core MR damper

(Freq = 0.5Hz, Displacement = ±7mm, Current = 1.2A)

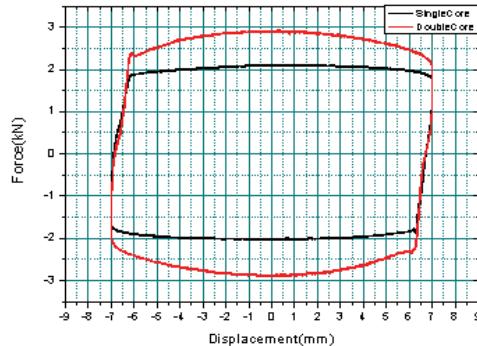


Fig. 12 Comparison of Single and Double Core MR damper

(Freq = 1.0Hz, Displacement = ±7mm, Current = 1.2A)

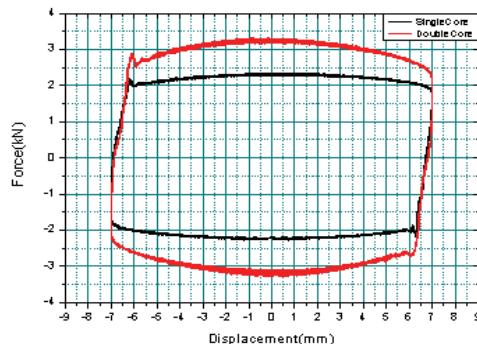


Fig. 13 Comparison of Single and Double Core MR damper

(Freq = 2.0Hz, Displacement = ±7mm, Current = 1.2A)

### 3.2 성능 실험 결과 비교

본 연구에서 설계한 댐퍼의 설계치를 2.2절에서 정의한식 (7)에 적용하면 전류가 0.0A인 경우의 댐퍼의 감쇠력을 계산할 수 있다. 일단 코어 댐퍼와 이단 코어 댐퍼의 Core 작동부의 길이를 제외한 공통적인 설계치인 피스톤의 단면적은  $20.1 \times 10^{-3} m^2$ , Orifice Gap은 1 mm, 점성계수는 1000 cP이고 Orifice Gap의 폭은 216.66 mm이다. 이 설계치를 식 (7)에 대입하여 구한 일단 코어 댐퍼의 감쇠계수  $C_o$ 는  $76.46 Nsec/mm$ 가 되고 이단 코어 댐퍼의 감쇠계수  $C_o$ 는  $108.69 Nsec/mm$ 가 된다. 감쇠계수와 댐퍼의 속도를 통해 댐퍼의 감쇠력은  $F = C_o v$ 로 구할 수 있다. Fig. 14와 Fig. 15는 댐퍼에 인가되는 전류가 0.0A이고 동작 속도가 1 mm/sec인 경우의 실험결과 그래프이다. 유동해석을 통한 감쇠력 예측 값과 실험결과 값이 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

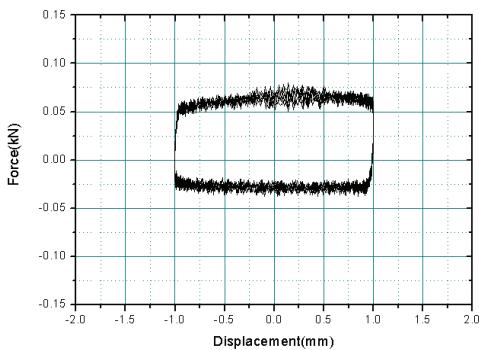


Fig. 14 Force vs Displacement curve of Single Core MR damper (Current = 0.0A, Velocity = 1mm/sec)

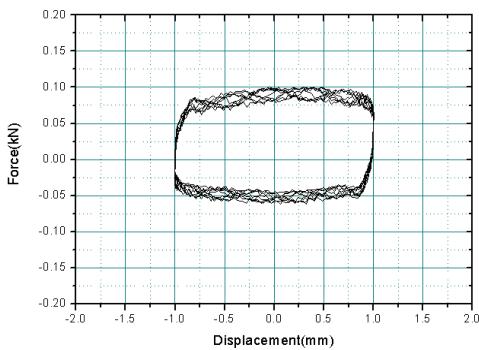


Fig. 15 Force vs Displacement curve of Double Core MR damper (Current = 0.0A, Velocity = 1mm/sec)

#### 4. 결 론

본 연구에서는 고효율, 대용량 자기점성유체 댐퍼를 구현하기 위해 코일작동부의 단수에 따른 성능비교를 실시하였다.

- 1) 유동해석을 실시하여 댐퍼의 감쇠계수를 도출하고 실험 결과와 비교하였다. Newtonian 유체 댐퍼의 계산식과 실험 결과 값이 비교적 잘 일치함을 확인하였다.
- 2) 자가장 해석을 실시하여 코어의 비율이 일정한 경우가 가장 효율이 좋은 것으로 확인하였고 MR 댐퍼의 코어를 여러 단으로 나눌 경우 댐퍼의 효율이 좋을 것으로 예측하였다.
- 3) 해석 결과를 바탕으로 일단 코어 댐퍼와 이단 코어 댐퍼를 제작하여 인장 압축 실험을 실시하여 성능 비교를 실시하여 다단 코어 댐퍼의 성능이 일단 코어 댐퍼보다 성능이 뛰어남을 확인하였다.

#### 참고문헌

- (1) M. R. Jolly, J. W. Bender, and J. D. Carlson (1999), "Properties and Application of Commercial Magneto-Rheological Fluids," *J. of Intell. Master. Syst. Struct.*, Vol. 10, pp. 5-13.
- (2) R. W. Phillips (1969), "Engineering Applications of Fluids with a Variable Yield Stress," Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley.
- (3) Y. K. Ahn (2000), "A Modeling of a Variable damping Mount Using MR Fluid," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 10, No. 4, pp. 1338-1343.
- (4) 이규섭, 유원희, 류봉조 (2008), “다중 자기 코일 작동기를 사용한 MR damper의 설계해석,” *한국소음진동공학회 춘계학술대회*.
- (5) N. M. Wereley, J. Lindler, N. Rosenfeld and Y. T. Choi, Biviscous damping behavior in electrorheological shock absorbers, *Smart Materials and Structures*, Vol. 13, pp. 743-752, 2004.
- (6) J. Lindler and N. M. Werwley, Quasi-steady Bingham plastic analysis of an electrorheological flow mode bypass damper with piston bleed, *Smart Materials and Structures*, Vol. 12, pp. 305-317, 2003.
- (7) G. A. Dimock, J. H. Yoo and N. M. Werwley, Quasi-steady Bingham Biplastic Analysis of Electrorheological and Magnetorheological Dampers, *Journal of Intelligent Material System and Structures*, Vol. 13, pp.549-559, 2002.
- (8) W. H. El-Aouar (2002), "Finite Element Analysis Based Modeling of Magneto Rheological Dampers," Master. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- (9) 남윤주, 문영진, 박명관, 이육형 (2006), “MR 유체 작동기의 전자기적 설계 방법,” *대한기계학회*, Vol. 10, pp. 1305-1313.
- (10) [www.mts.com](http://www.mts.com)