

# 다중 자기 코일 작동기를 사용한 MR damper의 설계해석

## Design of MR damper with multi\_stage core

이규섭† · 유원희\* · 류봉조\*\*

Lee, Gyuseop, Yoo, Wonhee and Ryu, Bongjo

**Key Words** : MR damper, Multi-stage core

### ABSTRACT

The dynamic range of MR damper is the most important characteristics for the usage of semi-active control system. The damping force can be increased by simply decreasing the orifice gap in the traditional oil damper, but it deteriorate the dynamic range in MR damper. In this paper, the multi-stage electro-magnetic core is suggested to maintain the performance of MR damper with a large damping force. The MR damper with 3 stage core is designed and manufactured for testing and analysis.

## 1. 서론

MR 유체를 이용한 MR damper는 토목분야, 운송분야 등에서 이미 널리 사용되고 있으며, 그 적용 영역은 빠르게 확장될 것으로 예상된다. 현재 응용되고 있는 대부분의 MR damper는 orifice에 의한 압력강하를 이용하는 기존의 oil damper에 MR 유체의 전단력을 결합한 소위 flow type으로 그 세부 구조는 그림 1과 같다.

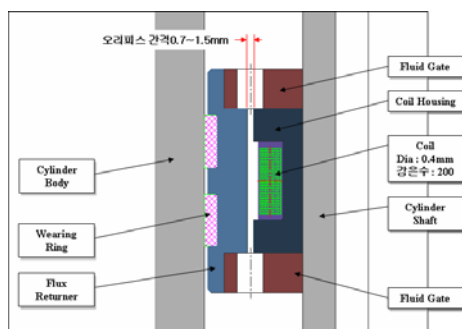


그림 1 MR damper의 내부구조

MR damper의 제어성능을 결정하는 주요 요소 중 하나인 Dynamic range를 증가시키기 위해서는 MR damper의 항복전단응력 (30 ~90 kPa 수준)을 증가시키거나 orifice 길이를 증가시켜야 한다. Orifice의 길이는 충분한 magnetic density를 얻기 위하여 제한될 수 밖에 없으므로 구조적인 대안은 이러한 Core부를 여러 개 설치하는 방안이 현실적이다. 대용량의 감쇠가 요구되는 대형 구조물이나<sup>(1)</sup> 화기의 충격완충<sup>(2)</sup>에 관한 논문에는 2~3개의 core를 결합하여 사용한 예가 있으나 이론적 근거나 성능분석에 대한 제시가 전무한 실정이다. Kelso<sup>(3)</sup>는 MR damper의 실용성에 대한 연구에서 단일 core와 3개의 core를 사용하는 경우에 대한 단순한 모델을 제시하여 3개의 core를 사용한 경우 response time과 magnetic flux 효과에 있어 장점이 있다는 것을 제시하였으나 구체적인 결과에 대해서는 언급이 되지 않고 있다.

본 논문에서는 MR damper의 크기에 대한 가변 감쇠력의 비를 증대시키기 위한 방안으로 3개의 core를 사용한 multi-stage MR damper를 설계/제작하여 시험하였으며, core부 설계는 ANSYS를 이용한 자기장 해석으로 magnetic field effect를 고려하였다.

† 교신저자; 알엠에스테크놀로지(주)  
E-mail : rmstech@rmstech.co.kr  
Tel : (041) 556-7600, Fax : (041) 556-7603

\* 한국철도기술연구원

\*\* 국립한밭대학교 기계공학부

## 2. 설계 해석

### 2.1 MR damper 설계해석

MR damper 설계는 크게 2가지로 구분할 수 있다. 첫째는 일반 damper 설계의 경우와 같이 사용 환경에 맞는 외형 설계 치수를 결정하는 것이며, 둘째는 MR 유체를 작동시키는 magnetic core부의 설계이다

#### (1) MR damper의 외형 설계

외형 설계에 있어 주요한 설계변수는 MR 유체의 역학적 변수 ( yield stress  $\tau_y$ , viscosity, density 등) damper의 외경, 최대 허용속도 등이 된다. 이 3가지 항목은 이미 설계 사양에서 결정되어 있으며, 마지막 설계 요소는 orifice gap의 크기를 결정하는 것이 된다.

MR damper의 특징은 외부에서 제어 가능한 dynamic range를 결정하는 것으로 이를 D라고 표현하면

$$D = \frac{F}{F_s} = \frac{F_r + F_\eta + F_f}{F_\eta + F_f} \quad \text{---- (1)}$$

가 된다. 여기서  $F$ 는 MR damper의 전체 감쇠력이며,  $F_s$ 는 외부 제어가 불가능한 damper 자체의 점성감쇠력  $F_\eta$  및 마찰력  $F_f$ 가 되며,  $F_r$ 는 MR 유체의 전단력으로 제어 가능한  $F_r$ 를 포함하고 있다. 설계 과정은 D를 최대화하면서 설계 요구 감쇠력을 얻기 위하여 orifice gap  $h$ 를 결정하는 것과 core부의 형상/크기 및 개수를 결정하는 것이 된다.

MR 유체가 작동하지 않는 일반 orifice 구조의 damper의 경우 발생하는 감쇠력  $F_\eta$ 에 대한 감쇠계수는

$$C_0 = \frac{12A_p^2 \mu L}{bd^3} \left(1 + \frac{1}{2A}\right) \quad \text{----- (2)}$$

가 되며, MR 유체가 작용하는 경우 감쇠계수  $C_{eq}$ 는<sup>(4)</sup>

$$\frac{C_{eq}}{C_0} = \frac{1 - \frac{\bar{\delta}}{6(1+2A)^2} \left(1 + \frac{\bar{\delta}}{2}\right)}{(1 - \bar{\delta})^2 \left(1 + \frac{\bar{\delta}}{2}\right)} \quad \text{-- (3)}$$

가 된다. 여기서  $\mu$ 는 유체의 viscosity, L은 Core부의 작동 길이,  $A_p$ 는 piston의 단면적, d는 orifice 간극,  $A_h$ 는 orifice부 단면적,  $\bar{A} = \frac{A_p}{A_h}$ 이다. 따라서 외부 형상 치수로부터 최소 감쇠계수  $C_0$ 를 결정한 이후 dynamic range

$$D = \frac{C_{eq}}{C_0} = \frac{\left[1 - \frac{\bar{\delta}}{6(1+2A)^2} \left(1 + \frac{\bar{\delta}}{2}\right)\right]}{(1 - \bar{\delta})^2 \left(1 + \frac{\bar{\delta}}{2}\right)} \quad (4)$$

를 결정하기 위해 magnetic core부 설계로써 설계변수  $\bar{\delta}$ 를 결정한다.  $\bar{\delta}$ 는 orifice gap d에 대한 MR 유체의 결합력이 유지되고 있는 구간의 비( $0 < \bar{\delta} < 1$ )로 MR 유체의 전단항복응력이 커짐에 따라  $\bar{\delta}$ 도 증가하게 된다.

#### (2) Core부 설계

Magnetic flux의 강도에 따라 MR 유체의 전단항복응력  $\tau_y$ 가 변화하므로 core부 설계는 소요되는 magnetic induction B를 제공하도록 설계하는 것이다. 그림 2는 damper 제작에 사용된 MR유체의 전단항복응력 대 magnetic flux density의 관계를 보여준다.

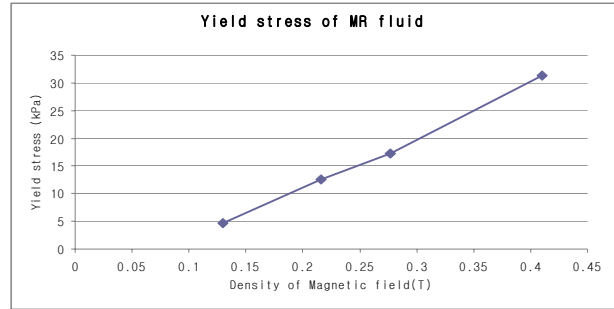


그림 2 MR유체의 자기장 변화에 따른 전단항복응력 변화

이러한 magnetic flux는 core부의 coil에 인가되는 전류로부터 발생하는 전기장에 의해 유도되며 coil의 권선 수 N과 전류의 크기 I의 곱은

$$NI = 2H_f h + H_c L_c + H_r L_r \quad \text{----- (5)}$$

이 된다. 여기서 H는 전기장의 세기이며 하첨자 f는 MR 유체, c는 core, r은 returner를 의미하며, h 및 L은 길이이다. 전기장 대 자기장의 관계는 소재에 따라 특성이 다르며 사용된 MR 유체의 경우 그림 3과 같다.

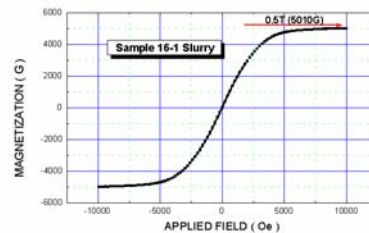
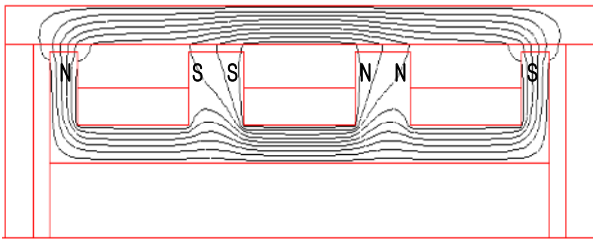


그림 3 MR유체의 B-H선도

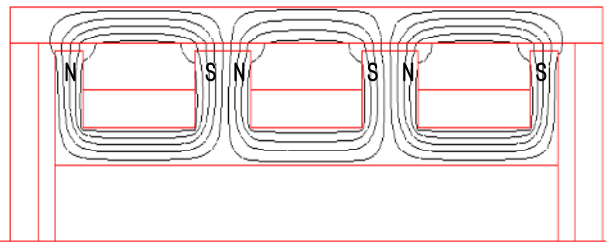
(3) 다중 자기 core부의 설계

전술한 바와 같이 MR 유체의 전단력을 많이 확보하기 위해서는 Core부의 orifice 길이를 증대시켜 전단력의 적용 면적을 늘리는 것이 효과적이다. 그러나 magnetic flux 량  $\Phi$ 는 NI와 소재의 물성치로 부터 결정되어 있으며 MR 유체의 전단항복응력과 관계되는 magnetic flux density  $B = \Phi / \text{적용면적}$ 이 되므로 단일 core를 이용하는 것보다 다중 core를 사용하는 것이 효과적이다. 본 논문에서는 3개의 core를 사용하는 경우에 대하여 기술한다.

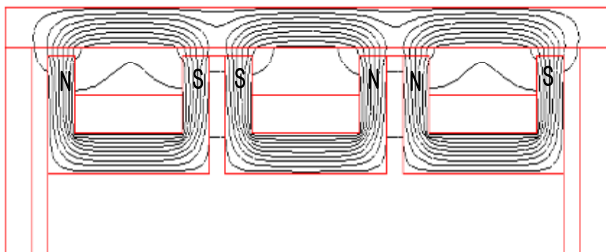
Kelso<sup>(3)</sup>의 수학적 모델로부터 그림 4-(a)와 같이 같은 극이 이웃하는 배열보다 그림 4-(b)와 같이 다른 극이 이웃하는 경우 우수한 전기적 시정수를 얻을 수 있다는 것은 이미 확인되었으며, ANSYS를 이용한 자기장 해석 결과를 도식한 그림 4의 결과로 (a)의 경우에는 중앙의 두 orifice 간극으로는 magnetic flux density가 매우 낮아 제 역할을 못하는 것을 확인할 수 있다. 그림 4-(c)는 core 사이에 투자율이 낮은 알루미늄 sheet를 끼워 간격을 늘린 것으로 magnetic flux density를 더욱 효율적으로 사용할 수 있음을 보여준다.



(a) 동극 간 이웃한 경우



(b) 이극 간 이웃한 경우



(c) Core 간극이 있는 경우

그림 4 Core 배열에 따른 자기장 해석 결과

3. 시험 및 결과

그림 5는 시험에 사용된 MR damper의 형상을 나타낸다.

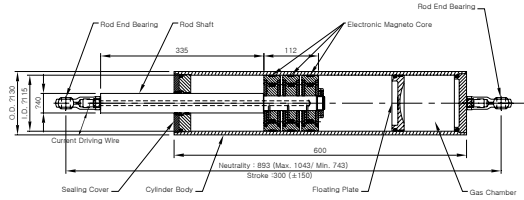


그림 5 시험용 MR damper

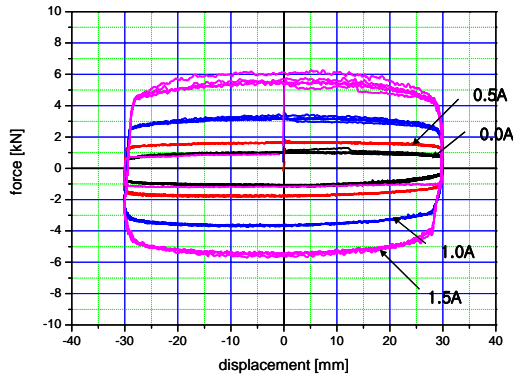
이 damper의 내경은 140mm이며, 3개의 자기 core가 결합되어 있다. 피스톤과 core 결합체 부는 MR 유체로 충전되어 있으며, floating plate로 이격된 공간에는 gas가 충전되어 있어 피스톤의 운동에 따른 실린더 내의 부피변화를 보상해 주는 역할을 한다. 식(2)의 설계값에 대하여  $A_p = 9.5 \times 10^{-3} \text{m}^2$ ,  $d = 0.7 \text{mm}$ ,  $b = 306 \text{mm}$ ,  $\bar{A} = 44.4$ ,  $L = 5 \text{mm} \times 6$ ,  $\mu = 1000 \text{cP} (\text{Pa sec})$ 를 적용하면  $C_o = 106.2 \text{Nsec/mm}$ 가 된다.

시험은 한국철도기술연구원이 보유하고 있는 damper 전용시험장치를 사용하여 시험을 수행하였다. 그림 6~8은 시험 결과를 도식한 것이다. 전류가 0.0A인 경우의 감쇠력  $F = C_o v$ 를 비교해 보면 설계해석값과 시험값이 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 전류를 가한 경우 식(3)과 압력 강하

$$\Delta P = \frac{2L\tau_y}{d\delta} \quad \text{-----} \quad (6)$$

를 이용하여 감쇠력을 산출하면 설계해석값과 시험값이 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

그림 6-(b)는 2개의 core를 사용한 경우이나 gas 방의 압력이 작아 높은 속도에서는 floating plate의 운동이 부피 보상을 충분히 하지 못하여 제시하지 못하였다. 1.5A를 가한 경우 우측의 찌그러진 면이 그러한 현상을 보여주고 있다.



a) 3개 Core 사용의 경우

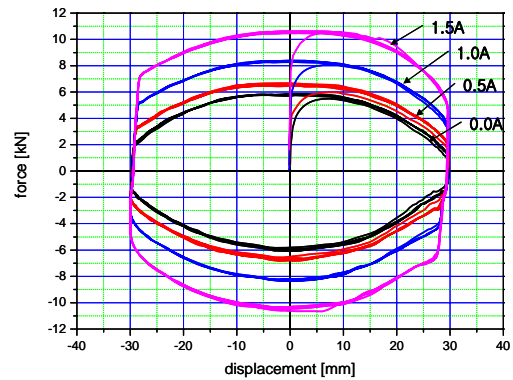
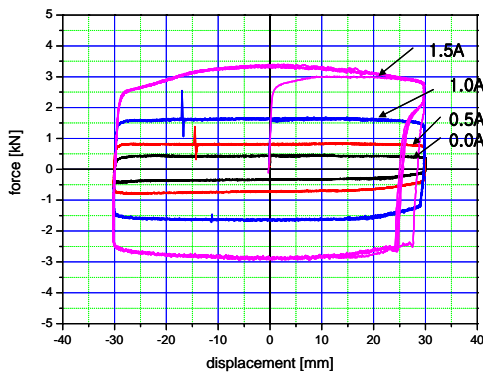


그림 8 3 Core 사용의 경우 힘 대 변위 선도 (속도 50mm/sec)



b) 2개 Core 사용의 경우

그림 6 힘 대 변위 선도 (속도 10mm/sec)

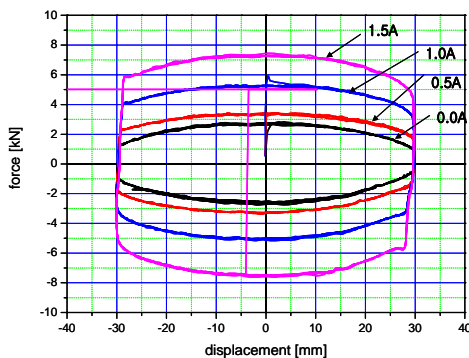


그림 7 3 Core 사용의 경우 힘 대 변위 선도 (속도 20mm/sec)

#### 4. 결 론

대용량의 감쇠력을 요구하는 MR damper를 설계하기 위하여 다중 core를 갖는 damper에 대한 설계해석과 시험을 수행한 결과

- 단순한 Newtonian fluid 모델의 quasi-static 해석으로도 근사한 설계가 가능하였다.
- 다중 core를 이용하여 높은 감쇠력을 갖는 MR damper의 설계가 가능하였다.
- 높은 속도에서도 안정된 성능을 얻기 위해서는 transient fluid dynamic 해석의 수행이 요구되며 추후의 연구 과제로 추진할 예정이다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Yang,G.,Jung,H.J. and Spencer Jr.,B.F. 2001 Aug."Dynamic Model of Full-Scale MR Dampers for Civil Engineering Applications,"US-Japan Workshop on Smart Structures for Improved Seismic Performance in Urban Region,Seattle,WA, pp. 14~16.
- (2) James Poynor, 2001, "Innovative Designs for Magneto-Rheological Dampers," Audience of thesis in Virginia Polytechnic Institute and State University.
- (3) Sean P. Kelso, 2001 March,"Experimental Characterization of Commercially Practical Magnetorheological Fluid Damper Technology," SPIE Conference on Smart Structures and Materials.
- (4) N. M Wereley, J. Lindler, N.Rosenfeld and Y.T. Choi, 2004"Biviscous damping behavior in electrorheological shock absorbers," Smart Materials and Structures, Vol.13, pp. 743~752.