

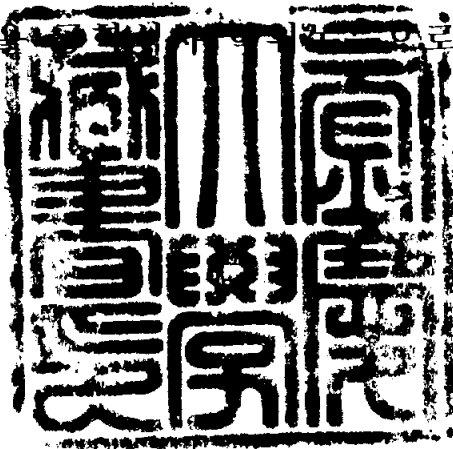
714  
2003  
75  
=2

공학석사 학위논문

# MR 댐퍼의 동특성 해석

지도교수 백운경

이 논문을  으로 제출함



2003년 2월

부경대학교 대학원

기계설계학과

정희경

# 정희경의 공학석사 학위논문을 인준함

2002 년 12 월 26 일

주	심	공학박사	양 보 석
위	원	공학박사	이 일 영
위	원	공학박사	백 운 경



## 목 차

Abstract .....	1
제 1 장 서 론 .....	2
제 2 장 MR 유체 .....	5
2.1 유체 특성 .....	5
2.2 전자기 특성 .....	10
제 3 장 MR 댐퍼 구조 .....	13
3.1 MR 모노튜브 댐퍼 .....	13
3.2 자기 회로 구조 .....	14
제 4 장 MR 유체 유동 해석 .....	15
4.1 MR 유체 모델 .....	15
4.2 평행 평판 유동 해석 .....	21
4.2 환형 유로 유동 해석 .....	31

제 5 장 자기장 해석 .....	38
5.1 이론적 배경 .....	38
5.1.1 Ampere 법칙 .....	38
5.1.2 자성 물질 .....	41
5.1.3 경계 조건 .....	45
5.2 유한 요소 해석 .....	47
5.2.1 유한 요소 모델 .....	47
5.2.2 해석 절차 .....	48
5.1.2 해석 결과 .....	51
제 6 장 MR 댐퍼의 성능 예측 및 검증 .....	54
6.1 MR 댐퍼의 감쇠력 예측 .....	54
6.2 MR 댐퍼 실험 .....	59
6.2.1 실험 장치 .....	61
6.2.2 실험 방법 .....	63
6.4 시뮬레이션 검증 .....	65
제 7 장 결론 .....	72
참고문헌 .....	74
부록 A. 시뮬레이션 프로그램 .....	80

## LIST OF FIGURES AND TABLES

Figure 2.1 Viscosity as a function of shear rate with no magnetic field applied of MRF 132LD (by courtesy of Lord Corporation)

Figure 2.2 Viscosity as a function of shear rate with no magnetic field applied in MRF 240BS (by courtesy of Lord Corporation)

Figure 2.3 Viscosity as a function of shear rate with no magnetic field applied in MRF 336AG (by courtesy of Lord Corporation)

Figure 2.4 MR fluid in magnetic field

Figure 2.5 Typical magnetic properties of MRF-132LD (by courtesy of Lord Corporation)

Figure 2.6 Typical magnetic properties of MRF-132LD (by courtesy of Lord Corporation)

Figure 3.1 Monotube MR damper

Figure 3.2 Piston valve assembly

Figure 4.1 Shear stress versus shear rate curves for typical fluids

Figure 4.2 Viscosity versus shear rate curves for fluids

Figure 4.3 MR fluid flow through a parallel duct

Figure 4.4 A coordinate system of flow analysis

Figure 4.5 Velocity profile of MR fluid between a parallel plate

Figure 4.6 A coordinate system of flow analysis

Figure 4.7 Velocity profile of MR fluid in an annular tube

Figure 5.1 Source-field relationships of Biot-Savart law

Figure 5.2 Ampere's law

Figure 5.3 Typical B-H curve

Figure 5.4 Boundary conditions of magnetic material

Figure 5.5 Finite element model

Figure 5.6 MAXWELL 2D Modler

Figure 5.7 MAXWELL Material manager

Figure 5.8 MAXWELL Setup boundary/sources

Figure 5.9 Magnetic Flux lines in the piston

Figure 5.10  $H(r)$  in the gap (0.4A)

Figure 5.11 H in the gap ( 0A ~ 1.8A )

Figure 5.12 B in the gap ( 0A ~ 1.8 A )

Figure 6.1 Schematic diagram of a monotube damper

Figure 6.2 Curve fitting of shear stress versus magnetic field

Figure 6.3 Computation procedure of the damping force

Figure 6.4 Photograph of the MR damper

Figure 6.5 Cross section of damper & shock absorber assembly

Figure 6.6 Test equipment for the MR damper

Figure 6.7 Control box & data acquisition equipment

Figure 6.8 Currnt controller

Figure 6.9 Dispacement profile of 10 CPM

Figure 6.10 Velocity profile of 10 CPM

Figure 6.11 Force vs displacement diagram (10 CPM)

Figure 6.12 Force vs velocity hysteresis loop (10 CPM)

Figure 6.13 Force vs displacement diagram (25 CPM)

Figure 6.14 Force vs velocity hysteresis loop (25 CPM)

Figure 6.15 Force vs displacement diagram (50 CPM)

Figure 6.16 Force vs velocity hysteresis loop (50 CPM)

Figure 6.17 Force vs displacement diagram (10 CPM, 1A)

Figure 6.18 Force vs velocity hysteresis loop (10 CPM,1A)

Figure 6.19 Force vs displacement diagram (25 CPM, 1A)

Figure 6.20 Force vs velocity hysteresis loop (25 CPM,1A)

Figure 6.21 Force vs displacement diagram (50 CPM, 1A)

Figure 6.22 Force vs velocity hysteresis loop (50 CPM,1A)

Table 2.1 Properties of three different types of MR fluids (by courtesy of Lord Corporation)

Table 4.1 Pressure loss comparison between parallel-plate and axisymmetric models

Table 5.1 Relative permeability of materials

Table 6.1 Input variables used in simulation with no magnetic field applied & 10 CPM excitation

# **Dynamic Characteristics Analysis of A Magneto-Rheological Damper**

**Hee-Kyung Jeong**

*Department of Mechanical Design,  
The Graduate School,  
Pukyong National University*

## **Abstract**

MR(Magneto-Rheological) fluid is smart fluid that can change its characteristics when magnetic fields are applied. Recently, many researches are done on this MR fluid for applications 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. Then, dynamic characteristics of the damper was predicted and compared with the experimental results for typical sinusoidal excitations.

## 제 1 장 서론

### 1.1 연구 배경

Magneto-Rheological 유체(이하 MR 유체라 칭함)는 외부 자극으로 유체의 유동 특성을 변화시킬 수 있는 지능형 유체이다. MR 유체는 합성 오일, 실리콘 오일, 물 등의 다양한 매체에 마이크로미터( $\mu\text{m}$ ) 크기의 자화 입자들이 분산되어 있는 것으로서, 자기장이 MR 유체에 가해지면 수 밀리 초(ms) 이내에 물성이 변화하여 유체의 항복 응력을 증가시킨다. 항복 응력의 크기는 인가된 자기장에 의존하고 있으며, 항복 응력 크기의 변화 범위는 넓다. MR 유체의 이러한 유동 특성은 작은 전력으로 구현할 수 있으며, 빠른 응답 특성을 가지고 연속적이며, 용이하게 제어될 수 있다. 또한 MR 유체는  $-40^{\circ}\text{C}$ 에서  $150^{\circ}\text{C}$ 의 온도 범위에서 이용될 수 있으며, 불순물에 민감하지 않다. 그리고 기계 시스템과 전기적 제어 신호 시스템 사이에 단순하고 조용한 사용 환경을 제공할 수 있으므로, 많은 분야에 응용될 수 있다.

이러한 장점을 가지는 MR 유체는 지난 10년간 다양한 분야에서 많은 연구 성과를 이루었다. 지진과 바람으로 인한 구조물의 진동을 줄이기 위한 방진용 MR 댐퍼의 연구가 Dyke et al<sup>1),2),3)</sup>, Jasen and Dyke<sup>4)</sup>, Spencer et al<sup>5)</sup>, Yi and Dyke<sup>6)</sup> 등에 의해 이루어진 바 있으며, 야지 주행 차량용 MR shock absorber가 Kelso et al<sup>7),8)</sup>에 의해, 비포장 도로의 오토바이를 위한 MR shock absorber가 Evert O. Erickse et al<sup>9)</sup>에 의해 연구되었다. 그리고 승용차용 MR 댐퍼에 관한 연구가 Lindler et al<sup>10)</sup> 과 Hwan-Soo Lee et al<sup>11)</sup>, Pare<sup>12)</sup> 등에 의해 수행되었으며, 시트용 MR 댐퍼에 관한 연구가 Choi et al<sup>13)</sup>, Reichert<sup>14)</sup>에 의해 수행되었다. 또한 MR seat damper와 Brake를 비롯한 다양한 기구들이 Lord사에 의해 개발되었으며<sup>15)</sup>, 미국의 자동차 부품 업체인 Dephi사는 자동차의 반능동 현가장치에 사용될 MR 댐퍼를 개발하여 2003년도에 양산될 Cadillac 모델에 적용할 예정으로 있다.<sup>16)</sup>

MR 댐퍼의 다양한 분야에의 응용과 더불어 유동학적 특성의 변화로 인하여 제

어성을 가지는 MR 댐퍼의 거동을 효율적으로 기술하기 위한 다양한 모델들이 실험에 기초하여 많은 연구가들에 의해 제안되었다. Snyder et al<sup>17)</sup>과 Dimock et al<sup>18)</sup>은 수정된 Bingham plastic 모델로 준정적 상태의 MR 댐퍼의 거동을 기술하였으며, Pang et al<sup>19)</sup>은 equivalent viscous damping 과 complex stiffness를 이용해 의혜 댐퍼의 거동을 특징지었다. 그리고 S.K.Lee et al<sup>20)</sup>은 polynomial 모델을 이용하여 댐퍼의 이력 현상을 설명하였으며, 정정교 외<sup>21)</sup>는 비선형 MR 댐퍼 모델의 파라미터에 관한 연구를 수행하였다. 또한 Spencer et al<sup>22)</sup>은 Bouc-Wen 모델에 기초한 현상학적 모델을 제안하였다.

이러한 연구들을 통해서 MR 유체 및 MR 댐퍼가 효율적인 반능동 현가 시스템에 적용 가능하며, MR 유체 및 MR 댐퍼의 원리 및 기술은 현가 장치 뿐만 아니라 동력 전달 장치를 비롯하여, 컴퓨터 구동 장치, 정밀 기계 제어 장치, 의용 공학 군사 장비 등 광범위하게 응용 가능하다.

## 1.2 연구 목적

본 연구의 목적은 MR 유체를 사용한 승용차의 반능동형 현가 댐퍼인 MR 댐퍼의 기본 성능을 설계하기 위한 기본 이론과 설계 방법을 연구하는 것이다. 자동차의 승차감과 조종 안정성을 동시에 만족시키기 위한 반능동 현가 장치 부품으로서의 MR 댐퍼는 기본적인 댐퍼의 성능을 확보하고 있어야 하며, 인가된 자기장에 따른 가변 감쇠력을 발생시킬 수 있어야 한다. 또한 기존의 현가 댐퍼를 대체하기 위해 댐퍼의 형상과 크기를 만족시켜야 한다. 본 연구에서는 이러한 제한요소를 설계 요구 조건으로 분석하여 댐퍼를 제작하고 감쇠력을 예측하여, MR 댐퍼 초기 설계 과정에서 제안된 MR 댐퍼의 성능을 검증하고자 한다.

## 1.3 연구 방법

본 논문에서는 다음과 같은 순서로 연구를 진행하였다.

먼저, 기존의 문헌과 기술 자료를 중심으로 MR 유체의 물성을 검토하여 그 특성을 충분히 이해한 후, 승용차의 반능동형 현가 댐퍼에 사용될 수 있는 MR 유체를 채택한다.

최적의 MR 유체를 선택한 후, 설계 요구 조건을 만족시키는 MR 댐퍼의 형태를 제안하고, 인가된 자기장에 의해 항복 응력이 변화하는 MR 유체의 특성을 효율적으로 구현하기 위한 자기 회로를 설계한다. 자기 회로는 자기장 해석을 통하여 그 구조가 타당한지 확인하며, 인가된 전류에 따른 자기장 세기를 구하여, MR 유체의 정확한 항복 응력값을 얻는다.

댐퍼의 감쇠력을 발생시키는 압력 손실항을 유동 해석을 통하여 구하여, 압력 손실항을 구성하는 MR 유체의 물성과 오리피스 형상, 크기를 검토한다.

제안된 댐퍼의 감쇠력을 구하기 위한 수학적 모델을 제시하고 시뮬레이션을 통해 MR 댐퍼의 감쇠력을 예측하며, 그 결과를 실험과 비교·검증한다.

## 제 2 장 MR 유체

MR 유체는 인가된 자기장에 대해 수 밀리 초(ms) 이내에 유체의 항복 응력이 변화하는 지능형 유체이다. 본 장에서는 기존의 문헌과 기술 자료를 통해 MR 유체의 특성을 살펴보고자 한다.

### 2.1 유체 특성

MR 유체는 Jacob Rabinow(at the US National Bureau of Standards in 1940s)에 의해 개발되었다. MR 유체는 대략 수~수십 마이크로미터( $\mu m$ ) 크기의 자화 입자들과 적절한 용액, 계면활성제와 같은 첨가제로 구성되어 있다. 대부분의 MR 유체에서 자화 입자들은 연철(soft iron), 카보닐 철(carbonyl iron)과 같은 강자성체등으로 만들어지며, 유체에 대해 20~40%의 체적비를 가진다. 체적비율은 유체의 분산 상태와 점성 특성에 영향을 끼친다. 이 입자들은 절연체인 실리콘 오일(silicon oil), 합성 오일(synthetic oil)등과 같은 용액에 섞여있는데, 이 매질들은 MR 유체의 작동 온도 범위와 안정성, 내환경성등을 정하는 역할을 한다. 여기에 윤활유, 계면 활성제, 분산제, 내마모제 등과 같은 다양한 첨가제가 보태져, 유체내에서 입자들의 마멸과 영김 현상을 막고, 침전되지 않도록 한다.<sup>23),24)</sup>

Table 2.1은 Lord사에서 판매하는 MR 유체의 종류 중에서 서로 다른 매질과 체적 비율을 가지고 있는 MRF-132LD, MRF-240BS, MRF- 336AG의 물성치를 나타낸다. MR 유체의 작동 온도 범위와 타 재료와의 적합성, 그리고 점성은 매질과 체적 비율의 영향을 받는 것을 유추할 수 있으며, 침전 안정성은 대체로 비슷함을 알 수 있다. Fig. 2.1, Fig. 2.2, Fig. 2.3에 각 유체의 비뉴톤(non-newtonian) 유체 거동 특성을 나타내었다.

Table 2.1 Properties of three different types of MR fluids  
(by courtesy of Lord Corporation)

MR Fluid	MRF-132LD	MRF-240BS	MRF-336AG
Base Fluid	Synthetic Oil	Water	Silicon
Operation Temperature	-40~150°C	-0~70°C	-40~150°C
Density	3.0055 g /cc	3.818 g /cc	3.45 g /cc
Color	Dark gray	Dark gray	Dark gray
Weight Percent Solids	80.74%	83.54%	82.02 %
Coefficeient of Thermal Expansion (Unit Volume per °C)	0.55×10 <sup>-3</sup> (0~50°C) 0.66×10 <sup>-3</sup> (50~100°C) 0.67×10 <sup>-3</sup> (100~150°C)	0.223×10 <sup>-3</sup> (0~70 °C)	0.58 ×10 <sup>-3</sup> (0~70°C)
Specific Heat(25°C)	0.80 J /g °C	0.98 J /g °C	0.65 J /g °C
Thermal Conductivity(25°C)	0.25-1.06 ( w/m°C )	0.83-3.68 ( w/m°C )	0.20-1.88 ( w/m°C )
Flash Point	> 150°C	> 93°C	>93°C
Particel size	Microns	Microns	Microns
Viscosity	.94Pa · s ( 10 s <sup>-1</sup> ) .33Pa · s ( 80 s <sup>-1</sup> )	13.6 Pa · s ( 10 s <sup>-1</sup> ) 5.0 Pa · s ( 50 s <sup>-1</sup> )	8.5 Pa · s ( 10 s <sup>-1</sup> )
Compatibility	Not compatible with nutural rubber or some hydrocarbon based synthetic rubber.	Not compatible with aluminum. Not recomme-nded for long-term use with dynamic seals	Compatible with natural rubber. Not recommended for long term dynamic seals.
Separation (laboratory observations)	Develops a clear layer of approx-imately 30% (by volume) in a 1 liter container after 6 months storage.(25°C)	Develops a clear layer of approx-imately 5% (by volume) in a 1 liter container after 6 months storage.(25°C)	Develops a clear layer of 12-20% (by volume) in a 1 liter container after 4-6months storage.(25°C)

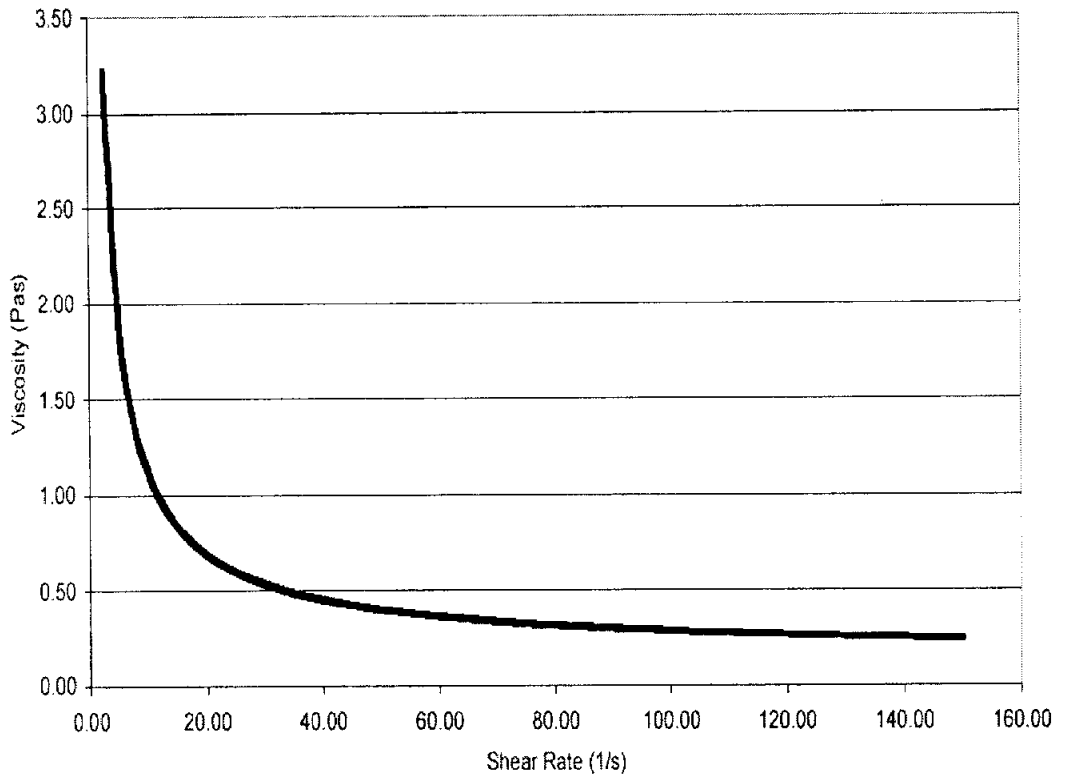


Fig. 2.1 Viscosity as a function of shear rate with no magnetic field applied of MRF 132LD (by courtesy of Lord Corporation)

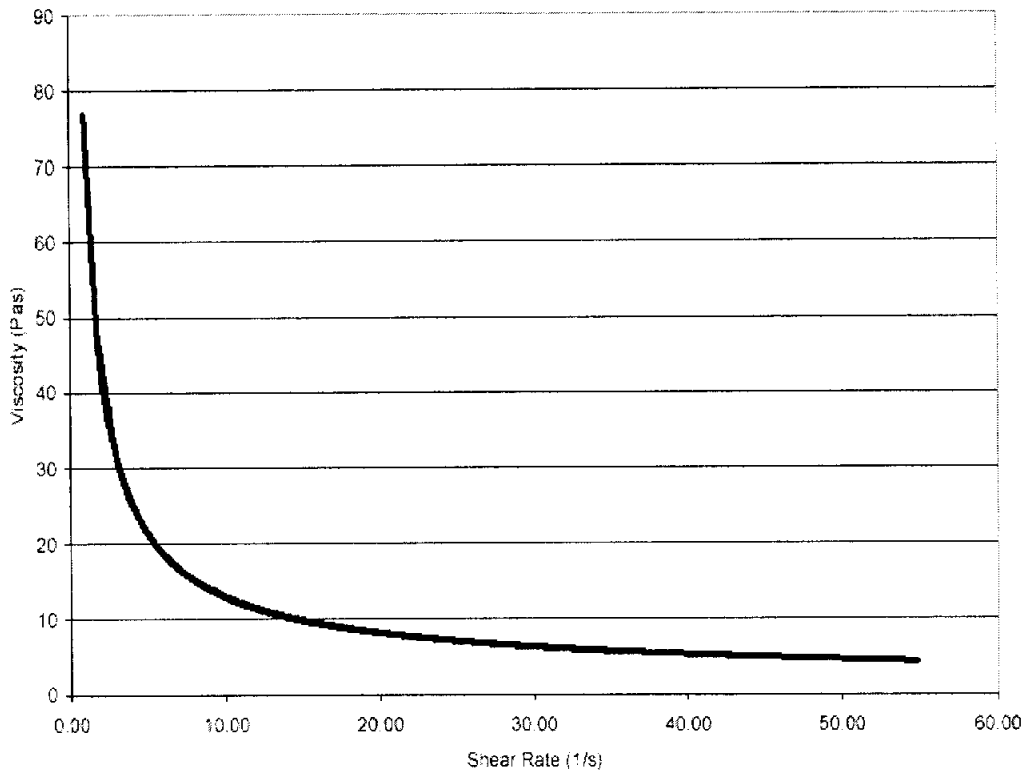


Fig. 2.2 Viscosity as a function of shear rate with no magnetic field applied in MRF 240BS (by courtesy of Lord Corporation)

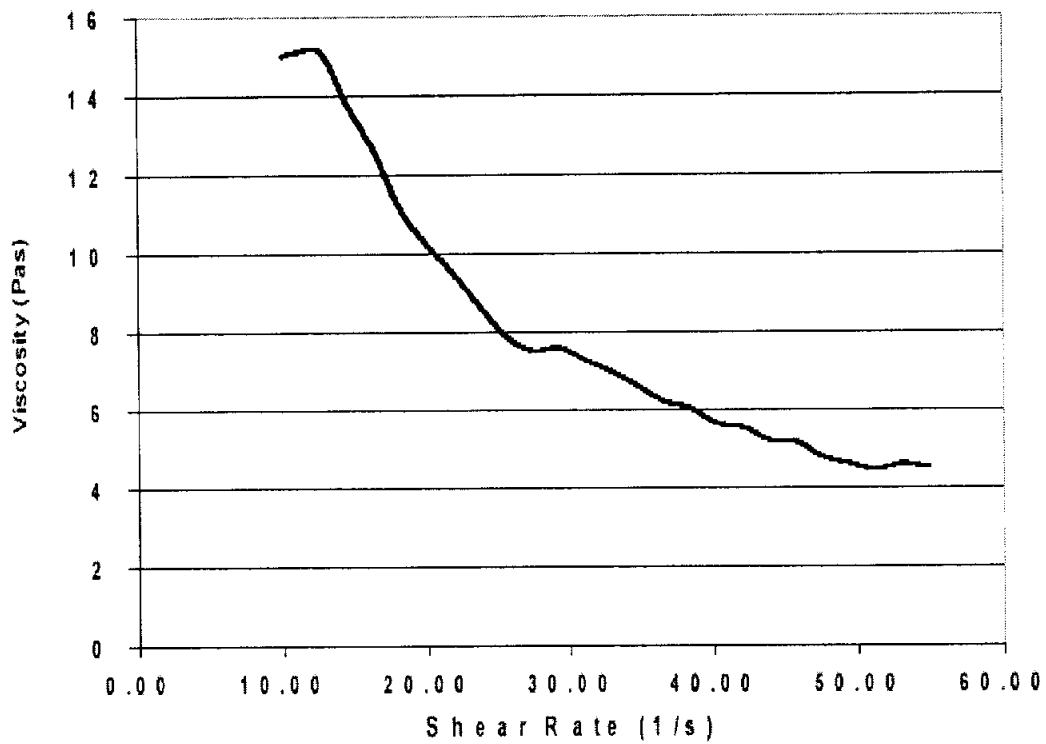


Fig. 2.3 Viscosity as a function of shear rate with no magnetic field applied in MRF 336AG (by courtesy of Lord Corporation)

## 2.2 전자기 특성

MR 유체에 자기장에 가해지면 강자성 입자들은 유체내에 형성된 자기장의 방향으로 쌍극자 모멘트(dipole moment)를 가지게 되며, 이것으로 인해 입자들은 Fig. 2.1 와 같이 자기장 방향과 나란한 체인 구조를 형성하게 된다. 입자의 체인 구조가 유체의 흐름과 수직 방향으로 형성될 경우, 이것은 유체의 유동을 방해하는 저항이 되며, 유동이 생기기 위해서는 이 저항을 이길 수 있는 항복 응력이 필요하게 된다.

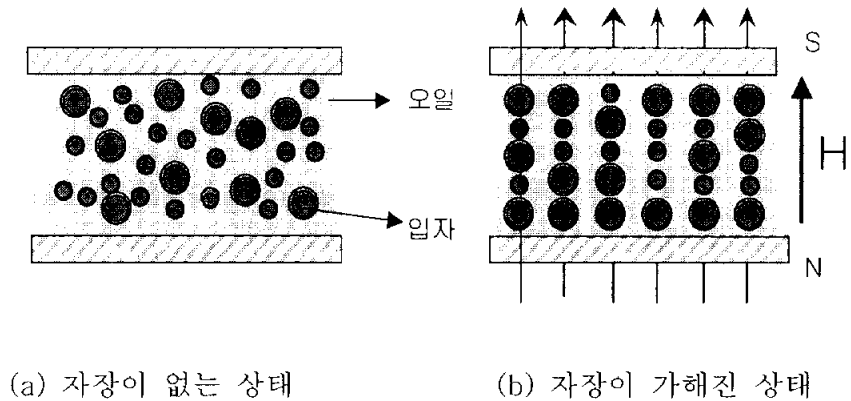


Fig. 2.4 MR fluid in magnetic field

입자의 체인 구조가 만들어내는 유체의 항복 응력값은 가해진 MR 유체의 자기 특성 곡선 (B-H 곡선)에 관련된다.<sup>23),24),25),26)</sup> MR 유체는 비투자율  $\mu$  가 일정하지 않은 비선형 자기 특성을 나타내며, 각 유체마다 그 값은 틀리지만 비슷한 경향을 나타낸다. 대표적으로 Fig. 2.5에 MRF 132LD의 B-H(진한 실선), M-H곡선(연한 실선)과 Fig. 2.6에 MRF 132LD의 항복 응력 곡선을 나타내었다. 인가된 자기장이 작은 경우 MR 유체는 자기 특성을 선형화 시킬 수 있으며, 입자들의 자화 포화 특성이 비선형 자기 특성을 만들어 내며, 이것은 자기장 세기에 따른 항복 응력의 변화에도 영향을 줌을 알 수 있다.

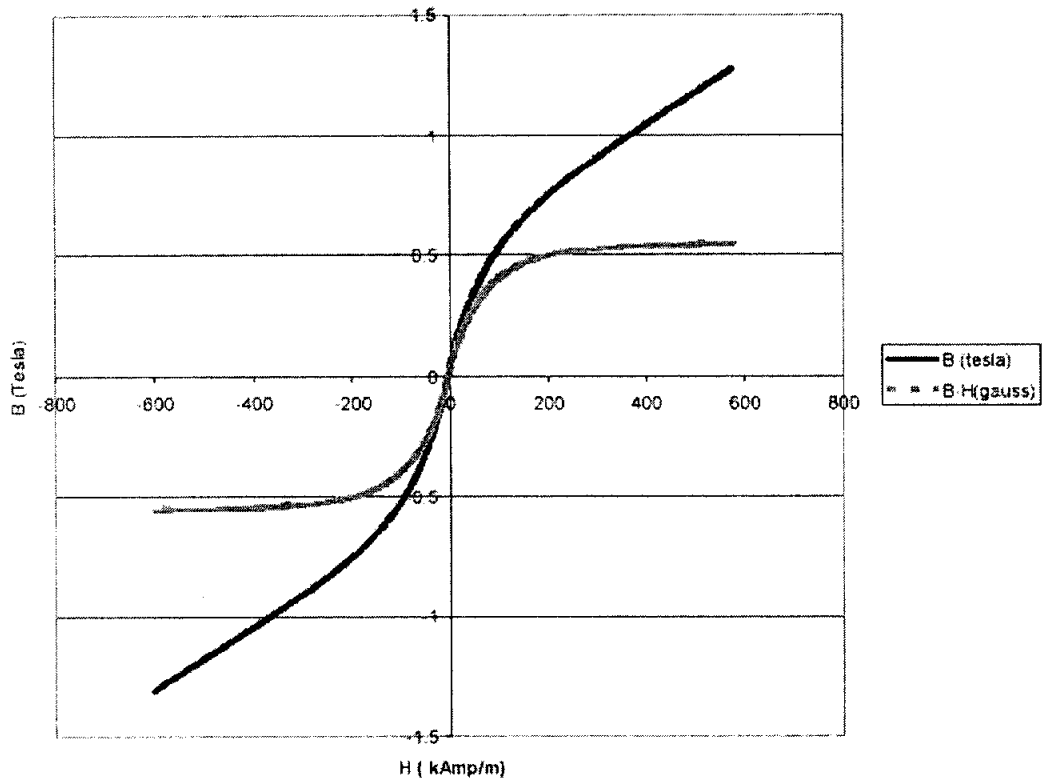


Fig. 2.5 Typical magnetic properties of MRF-132LD  
(by courtesy of Lord Corporation)

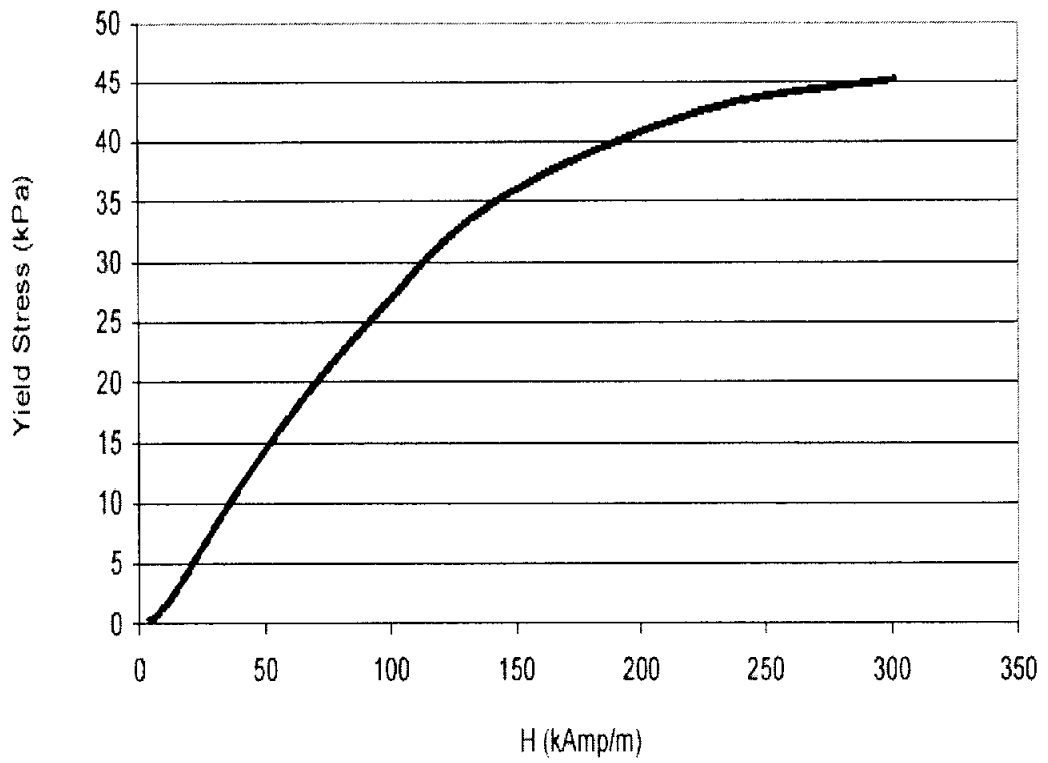


Fig. 2.6 Typical magnetic properties of MRF-132LD  
(by courtesy of Lord Corporation)

## 제 3 장 MR 댐퍼 구조

### 3.1 MR 모노 튜브 댐퍼

본 연구에서는 Fig. 3.1와 같은 모노 튜브(mono tube) 댐퍼를 제안하였다. 모노 튜브 댐퍼는 하나의 저장실을 가지고 있으며, 댐퍼의 압축·신장에 따른 저장실의 체적 변화는 가스실에서 보완하게 된다. 가스실(gas chamber)에는 27 ~ 30 bar의 고압 질소( $N_2$ )가 주입되어 있으며, 가스와 MR 유체를 분리시키면서, 피스톤 행정에 따른 압력 보상을 하기 위한 프리 피스톤 (free piston)이 있다. 감쇠 성능을 조절하는 피스톤 밸브(piston valve)가 피스톤 로드(piston rod)와 결합되어 있으며, MR 유체가 새어나가는 것을 방지하고 피스톤 로드의 동심도를 유지시키기 위한 로드 가이드(rod guide)가 있다. 댐퍼 내부는 MR 유체로 채워져 있으며, 전류는 중공 피스톤 로드를 통해서 피스톤 밸브에 공급되며, 댐퍼의 내경은 39.5 mm이며, 행정 거리는 160.5mm 이다.

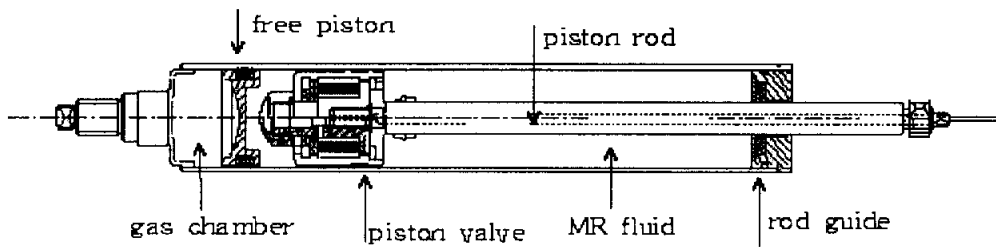


Fig. 3.1 Monotube MR damper

### 3.2 자기 회로 구조

MR 효과를 발생 시키는 자기 회로는 피스톤 밸브에 포함되어 있다. Fig. 3.2에 피스톤 밸브 단면도를 나타내었다. 피스톤 밸브는 밸브 길이 방향으로 환형 오리 피스를 가지고 있으며, 원활한 MR 유체의 유동을 위해 밸브 위·아래 평판(upper·low plate)에는 넓은 유동 입구 window가 위치하고 있다. Window를 통과한 MR 유체는 코어(core)와 플럭스 링(flux ring)이 이루는 폭 0.6mm, 길이 4mm의 2개의 틈새에서 자기장이 인가되었을 때 유체의 항복 응력이 변화하게 된다. 중공 로드를 통해 코일( coil )에 전류가 인가되면 강자성체인 코어를 따라 자속(magnetic flux)이 발생되며, 플럭스 링을 따라 자기 폐회로를 형성시킨다. 형성된 자속이 주변으로 누설되지 않고 유로와 수직으로 만들어지기 위해 코어 주변의 평판과 피스톤 로드는 비자성체, 플럭스 링은 강자성체로 구성된다.

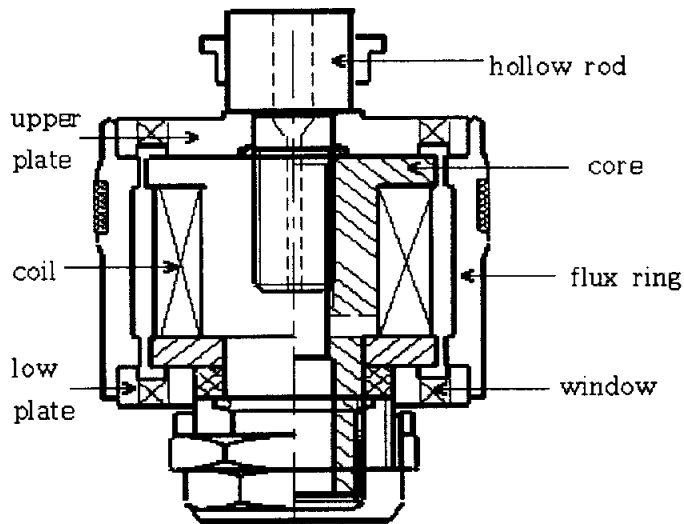


Fig. 3.2 Piston valve assembly

## 제 4 장 MR 유체 유동 해석

### 4.1 MR 유체 모델

인가된 자기장에 따라 항복 응력이 변하는 MR 유체는 주로 빙햄(Bingham) 유체로 가정되어 댐퍼 내부의 유동 해석에 사용되었다.<sup>27),23)</sup> 빙햄 유체의 유동은 유체의 전단 응력이 항복 응력보다 클 경우 일어나며, 이 때 유체의 점도는 뉴턴 유체와 같이 일정하다고 가정한 것이다. 그러나 2장에서 살펴본 바와 같이, MR 유체는 전단 변형률(shear rate)이 증가할수록 점도( $\mu$ )가 감소하는 전단 희박(shear thinning)의 비뉴턴 유체의 특성을 나타내고 있으므로, 빙햄 모델은 실제 MR 유체의 제대로 거동을 나타내지 못함을 알 수 있다. 이러한 까닭으로 보다 정확히 MR 유체의 거동을 기술할 수 있는 허셀-버클리(Herschel-Bulkley) 모델을 이용한 유동 해석이 제안되었다.<sup>29),30),31),32),33),34)</sup> Fig. 4.1에 유체의 전단 응력과 전단 변형률의 관계를, Fig. 4.2에 점성과 전단 변형율의 관계를 나타내었고, Fig. 4.1과 Fig. 4.2를 통해 MR 유체의 거동을 고찰해 볼 수 있다. 본 장에서는 MR 유체의 거동을 허셀-버클리 모델로 정의하여 유동 해석을 통한 압력 손실을 구하고자 한다.

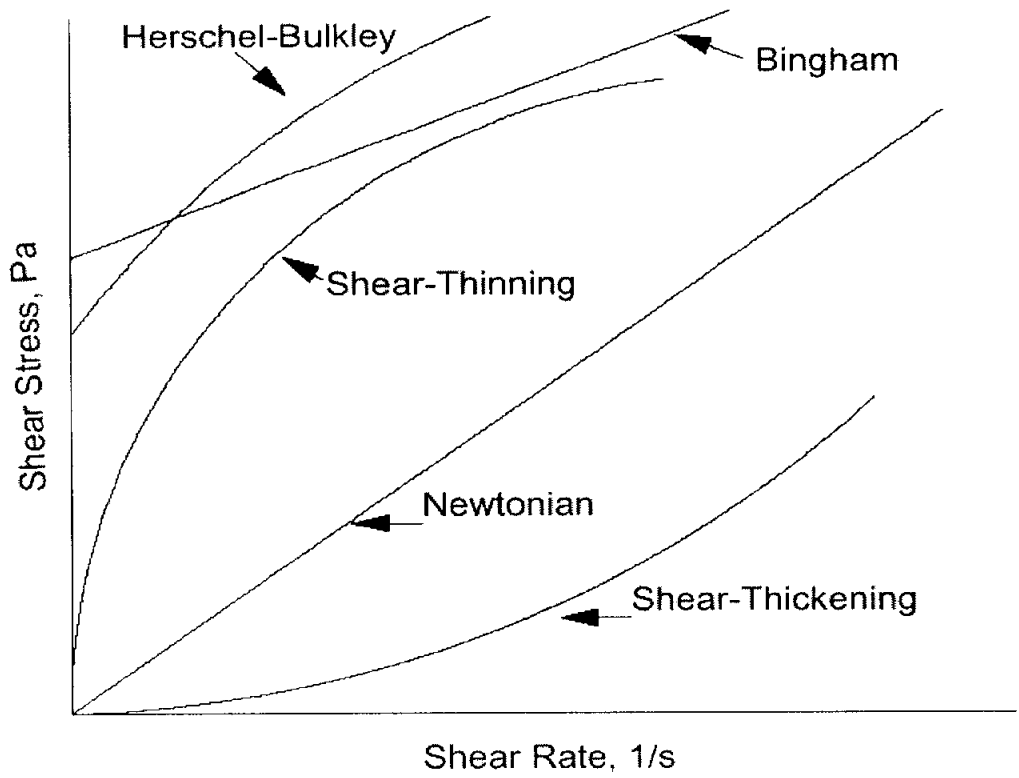


Fig. 4.1 Shear stress versus shear rate curves for typical fluids

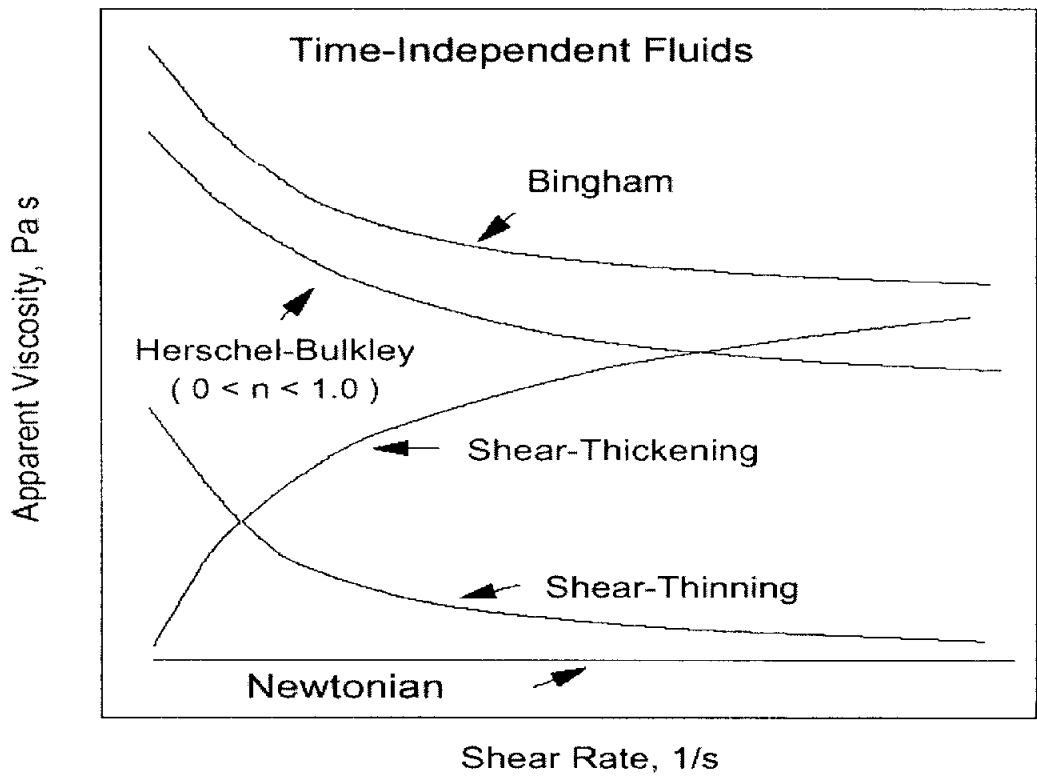


Fig. 4.2 Viscosity versus shear rate curves for fluids

허셀-버클리 모델의 구성 방정식은 식 (4-1)과 같다.

$$\tau = \tau_y + K\left(\frac{du}{dy}\right)^n \quad (4-1)$$

$\tau$  는 전단 응력,  $\tau_y$  는 항복 응력으로  $\tau$ 가  $\tau_y$  보다 클 때 유동이 시작된다.  $\frac{du}{dy}$  는 전단 변형율( $\dot{\gamma}$ )이며, K는 일치율(consistency coefficient), n은 유체 거동 지수(flow behavior index)이다. 허셀-버클리 모델은 유체의 거동을 기술하는 일반적인 모델로써 각 경우에 따라 간략한 모델로 나타낼 수 있다.  $\tau_y = 0$ ,  $K = \mu$  (점도),  $n = 1$  일 경우 식 (4-1)은 뉴턴 유체 거동을,  $K = \mu_{apprent}$  (겉보기 점도),  $n = 1$  일 경우 식 (4-1)은 빙햄 유체의 거동을 나타내게 된다. 그리고 유체 거동 지수 n의 크기에 따라 전단 희박(shear thinning)과 전단 농후(shear thickening)특성을 나타낼 수 있다. 즉  $n > 1$ 일 경우 전단 농후 거동을,  $0 < n < 1$  일 경우 전단 희박 거동을 나타내게 된다.

본 연구에서는 MRF-132LD를 사용하였다. Lord사에서 제공하는 MRF-132LD의 물성치 자료는 자기장이 인가되지 않은 경우의 점도와 전단 변형율 관계 그래프(Fig. 2.1)와 Table 2.1에 나타난 임의의 전단 변형율에 대한 점도값이다. 자기장이 인가되지 않았을 경우의 MRF-132LD 유체의 구성 방정식을 식 (4-2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau = K\left(\frac{du}{dy}\right)^n \quad (4-2)$$

유체의 점도  $\mu$ 는 Fig. 4.1과 같은 유체의 전단 응력과 전단 변형율의 관계 그래프에서 기울기를 의미한다. 식 (4-2)와 같이 주어진 구성 방정식에서 임의의 전단 변형률에서의 점도는 식 (4-2)를 전단 변형률에 대해 미분을 취함으로써 식 (4-3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu = Kn \left( \frac{du}{dy} \right)^{n-1} \quad (4-3)$$

식 (4-3)에 Table. 2.1의 점도값을 대입하면 식 (4-4)와 식 (4-5)의 관계를 얻을 수 있으며, 이 두 식을 연립하면 K와 n값을 구할 수 있다.

$$0.94 = Kn10^{n-1} \quad (4-4)$$

$$0.33 = Kn80^{n-1} \quad (4-5)$$

위 과정을 통해 구한 K와 n값은 자기장이 인가되지 않은 경우의 특정 조건에서의 점도 자료값을 이용한 것이다.<sup>15)</sup> 자기장이 인가되었을 경우의 MR 유체의 점도 특성은 자기장이 없는 상태의 점도 특성과 동일하지 않으며, 점도계의 종류와 측정 조건에 따라 그 거동에 차이가 있다.<sup>35),36)</sup> K와 n은 유체의 거동을 나타내고, 유체의 거동 특성은 MR 댐퍼의 감쇠력에 영향을 주므로 실험을 통해 MR 유체의 정확한 점성 특성의 획득이 필요하다. 또한 K와 n은 six-speed Fann viscometer의 실험 결과값을 이용하여 제안되어진 식 (4-6)과 식 (4-7)을 이용해 구할 수 있다.<sup>37),38)</sup>

$$\log(K) = \frac{\sum_1^6 [w_i \log(\tau_i - \tau_0)] - n \sum_1^6 [w_i \log(\dot{\gamma}_i)]}{\sum_1^6 (w_i)} \quad (4-6)$$

$$n = \left\{ \frac{\sum_1^6 [w_i \log(\dot{\gamma}_i)] \sum_1^6 [w_i \log(\tau_i - \tau_0)]}{\sum_1^6 w_i \sum_1^6 [w_i \log(\dot{\gamma}_i) \log(\tau_i - \tau_0)]} \right\}$$

$$\div \left\{ \sum_1^6 w_i \log(\gamma_i) \right\}^2 - \sum_1^6 w_i \sum_1^6 w_i [\log(\dot{\gamma}_i)]^2 \quad (4-7)$$

식 (4-6)과 식 (4-7)의 변수들은 아래와 같이 정의한다.

- $w$  : weighting factor,  $\tau_i - \tau_0$
- $\dot{\gamma}$  : shear rate,  $\frac{1}{s}$
- $\tau_i$  : shear stress
- $\tau_0$  : shear stress at zero shear rate or yield stress

## 4.2 평행 평판 유동 해석

본 연구에서 제안된 MR 댐퍼내의 유동은 피스톤 밸브의 환형 유로에서 일어난다. 유로 간격이 피스톤 밸브의 직경에 비해 매우 작은 경우, Fig. 4.3과 같이 MR 댐퍼내의 유동은 자기장이 인가된 평행한 평판 사이의 유동으로 근사화시킬 수 있다. 이 경우,  $c$ 는 댐퍼의 환형 오리피스 평균 원주값,  $d$ 는 환형 틈새 간격,  $L$ 은 오리피스 길이가 된다.

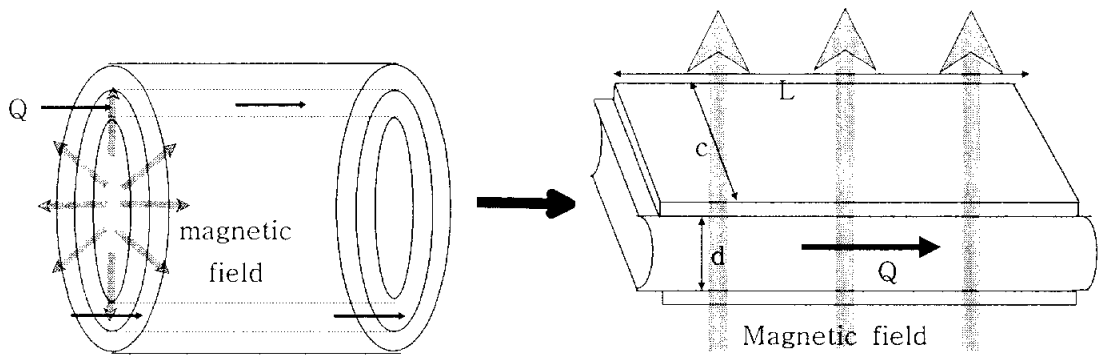


Fig. 4.3 MR fluid flow through a parallel duct

MR 댐퍼의 유동을 수평으로 놓인 두 개의 평판 사이의 1차원 유동으로 생각할 경우, 그 좌표계는 Fig. 4.4와 같다.

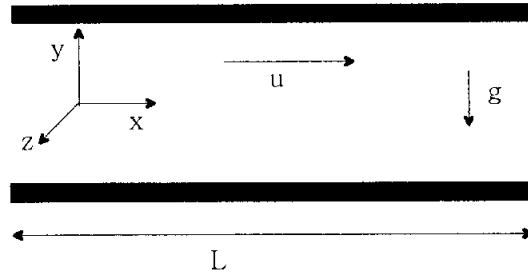


Fig. 4.4 A coordinate system of flow analysis

MR 유체를 비압축성 유체로 가정하며, 유체가 평판에 평행한 x방향으로 움직이고 있다면, 연속방정식(continuity equation) 식 (4-8)로부터 식 (4-9)을 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (4-8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (4-9)$$

무한 평판의 경우 z 방향으로 u의 변화는 무시될 수 있고, 댐퍼 내의 유동이 정상 유동일 경우 식 (4-10)가 성립한다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad (4-10)$$

식 (4-9)과 식 (4-10)을 Navier-Stokes 방정식 식 (4-11.1), 식 (4-11.2), 식

(4-11.3)에 적용하면 식 (4-12.1), 식 (4-12.2), 식 (4-12.3)을 얻을 수 있다.

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \quad (4-11.1)$$

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \quad (4-11.2)$$

$$\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) \quad (4-11.3)$$

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (4-12.1)$$

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial y} - \rho g \quad (4-12.2)$$

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial z} \quad (4-12.3)$$

식 (4-12.2)에서 y방향으로의 압력 변화는 정수력학적임을 알 수 있다. 식 (4-12.1)은 식 (4-13)의 형태로 변형할 수 있다.

$$\frac{d\tau}{dy} = \frac{\partial p}{\partial x} \quad (4-13)$$

식 (4-13)의  $\tau$  에 MR 유체 모델인 식 (4-1)을 대입하여 적분하면 식 (4-14)

과 같은 속도 분포를 얻을 수 있다.

$$u(y) = \frac{n}{n+1} \left( \frac{1}{K} \frac{\partial p}{\partial x} y + \frac{c_1}{K} - \frac{\tau_y}{K} \right)^{\frac{n+1}{n}} \frac{K}{\frac{\partial p}{\partial x}} + c_2 \quad (4-14)$$

유동 방향으로 압력이 감소하므로  $\frac{\partial p}{\partial x} < 0$  이며, 길이  $l$  만큼 떨어진 두지점 사이의 압력강하를  $\Delta p$ 로 놓으면 식 (4-15)와 같이 표현할 수 있으며, 식 (4-14)는 식 (4-16)로 표현할 수 있다.

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\Delta p}{L} \quad (4-15)$$

$$u(y) = \frac{n}{n+1} \left( \frac{1}{K} \left( -\frac{\Delta p}{L} \right) y + \frac{c_1}{K} - \frac{\tau_y}{K} \right)^{\frac{n+1}{n}} \frac{K}{-\frac{\Delta p}{L}} + c_2 \quad (4-16)$$

평행한 평판 사이를 흐르는 MR 유체의 속도 분포는 Fig. 4.5와 같다. Region I, III는 후 항복(post-yield) 영역으로 유체의 유동이 존재하는 구간이며, Region II는 전 항복(pre-yield) 영역으로 유체의 전단 응력이 항복 응력보다 크지 않을 경우 각 위치에서 속도가 동일한 플러그(plug) 유동을 한다.

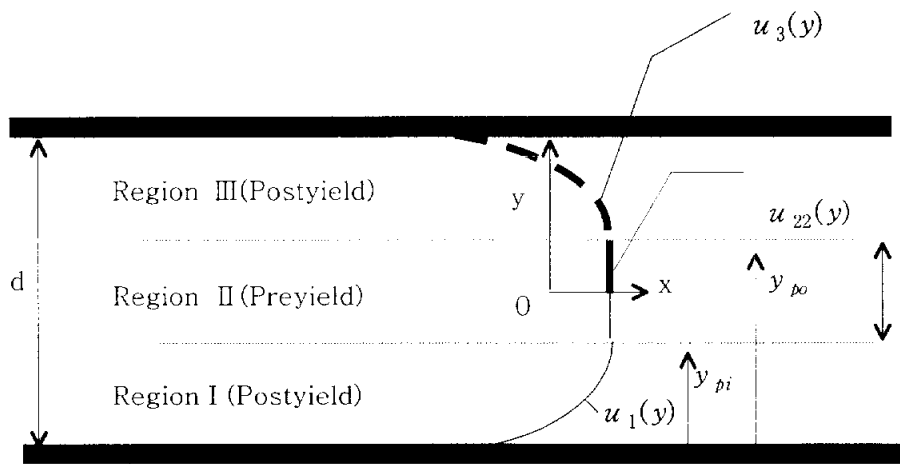


Fig. 4.5 Velocity profile of MR fluid between a parallel plate

MR 유체의 각 영역에서의 속도 분포는 각 영역의 경계 조건을 통해서 구해진다. 첫째로 만족해야 할 조건은 점성 유체가 가지는 점착성에 관한 것으로 식 (4-17)과 같다.

$$u_1\left(-\frac{d}{2}\right) = 0 \tag{4-17}$$

$$u_3\left(\frac{d}{2}\right) = 0$$

둘째, 각 영역의 경계에서 속도는 같아야 하며, 식 (4-18)에 나타내었다.

$$u_1(y_{pi}) = u_{21}(y_{pi}) = u_{22}(y_{po}) = u_3(y_{po}) \tag{4-18}$$

셋째, 각 영역의 경계에서 속도는 불연속적이므로, 식 (4-19)을 만족한다.

$$u_1'(y_{pi}) = u_{21}'(y_{pi}) = u_{22}'(y_{po}) = u_3'(y_{po}) = 0 \quad (4-19)$$

넷째, MR 유체의 속도 분포는 원점을 기준으로 대칭적이므로, 식 (4-20)를 만족한다.

$$\begin{aligned} u_1(-y) &= u_3(y) \\ \tau(y_{pi}) &= -\tau_y \\ \tau(y_{po}) &= \tau_y \end{aligned} \quad (4-20)$$

다섯째, 기준 좌표계에 대한 정의에 의해 식 (4-21.1), 식 (4-21.2)가 성립한다.

$$y_{po} - y_{pi} = \delta \quad (4-21.1)$$

$$y_{po} + y_{pi} = d \quad (4-21.2)$$

식 (4-21.1)과 식 (4-21.2)를 연립하면 식 (4-22)의 관계식을 유도할 수 있다.

$$y_{po} = \frac{\delta + d}{2} = \frac{d}{2}(1 + \bar{\delta}) \quad (4-22)$$

$$y_{pi} = \frac{d - \delta}{2} = \frac{d}{2}(1 - \bar{\delta})$$

여기서  $\bar{\delta}$ 는 식 (4-23)과 같이 정의하며 무차원 변수이다.

$$\bar{\delta} = \frac{\delta}{d} \quad (4-23)$$

식 (4-13)을  $y$ 에 관해 적분한 다음, 식 (4-20)의 경계 조건을 대입하면 식

(4-24.1)과 식 (4-24.2)가 성립하며, 이들은 연립하여 정리하면 식 (4-25)가 성립함을 알 수 있다.

$$\tau_y = \frac{\partial p}{\partial x} y_{p0} + c \quad (4-24.1)$$

$$-\tau_y = \frac{\partial p}{\partial x} y_{pi} + c \quad (4-24.2)$$

$$\bar{\delta} = \frac{\delta}{d} = \frac{2\tau_y}{\frac{\partial p}{\partial x} d} \quad (4-25)$$

앞서 살펴본 5가지 경계 조건을 각 구간에 적용하면, 영역 I에서의 속도 분포는 식 (4-26)과 같다.

$$\begin{aligned} u_1(y) &= \frac{n}{n+1} \left( \frac{1}{K} \frac{\partial p}{\partial x} y + \frac{\tau_y + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\delta}{2}}{K} - \frac{\tau_y}{K} \right)^{\frac{n+1}{n}} \frac{K}{\frac{\partial p}{\partial x}} \\ &\quad - \frac{n}{n+1} \left( -\frac{1}{K} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{d}{2} + \frac{\tau_y + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\delta}{2}}{K} - \frac{\tau_y}{K} \right)^{\frac{n+1}{n}} \frac{K}{\frac{\partial p}{\partial x}} \\ &= \frac{n}{n+1} \frac{K}{\frac{\partial p}{\partial x}} \left( \frac{1}{K} \frac{\partial p}{\partial x} \right)^{\frac{n+1}{n}} \left[ \left( y + \frac{\delta}{2} \right)^{\frac{n+1}{n}} - \left( \frac{\delta}{2} - \frac{d}{2} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \\ &= \frac{n}{n+1} \left( \frac{1}{K} \frac{\partial p}{\partial x} \right)^{\frac{1}{n}} \left[ \left( y + \frac{\delta}{2} \right)^{\frac{n+1}{n}} - \left( \frac{\delta}{2} - \frac{d}{2} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \end{aligned} \quad (4-26)$$

영역 III에서의 속도 분포는 식 (4-27)와 같다.

$$\begin{aligned}
u_3(y) &= \frac{n}{n+1} \left( \frac{1}{K} \frac{\partial p}{\partial x} y + \frac{\tau_y - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\delta}{2}}{K} - \frac{\tau_y}{K} \right)^{\frac{n+1}{n}} \frac{K}{\frac{\partial p}{\partial x}} \\
&\quad - \frac{n}{n+1} \left( \frac{1}{K} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{d}{2} + \frac{\tau_y - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\delta}{2}}{K} - \frac{\tau_y}{K} \right)^{\frac{n+1}{n}} \frac{K}{\frac{\partial p}{\partial x}} \\
&= \frac{n}{n+1} \frac{K}{\frac{\partial p}{\partial x}} \left( \frac{1}{K} \frac{\partial p}{\partial x} \right)^{\frac{n+1}{n}} \left[ \left( y - \frac{\delta}{2} \right)^{\frac{n+1}{n}} - \left( \frac{d}{2} - \frac{\delta}{2} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \\
&= \frac{n}{n+1} \left( \frac{1}{K} \frac{\partial p}{\partial x} \right)^{\frac{1}{n}} \left[ \left( y - \frac{\delta}{2} \right)^{\frac{n+1}{n}} - \left( \frac{d}{2} - \frac{\delta}{2} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right]
\end{aligned}
\tag{4-27}$$

영역 II에서의 속도 분포는 식 (4-28.1), 식 (4-28.2)와 같다.

$$u_1(y_{p0}) = \frac{n}{n+1} \left( \frac{1}{K} \frac{\partial p}{\partial x} \right)^{\frac{1}{n}} \left[ - \left( \frac{\delta}{2} - \frac{d}{2} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] = u_{21}(y) \tag{4-28.1}$$

$$u_3(y_{p0}) = \frac{n}{n+1} \left( \frac{1}{K} \frac{\partial p}{\partial x} \right)^{\frac{1}{n}} \left[ - \left( \frac{d}{2} - \frac{\delta}{2} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] = u_{22}(y) \tag{4-28.2}$$

각 구간에서의 속도 분포를 이용하면 z 방향으로 단위폭을 가지는 평행 평판 사이를 통과하는 총 유량을 식 (4-29)의 관계식에서 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
|Q| &= \left| \left[ \int_{-\frac{d}{2}}^{y_{\rho 1}} u_1(y) dy + \int_{y_{\rho 1}}^{y_{\rho 2}} u_2(y) dy + \int_{y_{\rho 2}}^{\frac{d}{2}} u_3(y) dy \right] \right| \\
&= 2 \left| \left[ \int_0^{y_{\rho 2}} u_{22}(y) dy + \int_{y_{\rho 2}}^{\frac{d}{2}} u_3(y) dy \right] \right|
\end{aligned}
\tag{4-29}$$

각 영역에 대해 적분하여 정리하면 식 (4-29)는 식 (4-30)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
|Q| &= \frac{n}{n+1} \left( \frac{1}{K} \frac{\partial p}{\partial x} \right)^{\frac{1}{n}} \left( \frac{d-\delta}{2} \right)^{\frac{n+1}{n}} \left[ \frac{n(d+\delta)+d}{2n+1} \right] \\
&= \frac{n}{n+1} \left( -\frac{1}{K} \frac{\Delta P}{L} \right)^{\frac{1}{n}} \left( \frac{d-\delta}{2} \right)^{\frac{n+1}{n}} \left[ \frac{n(d+\delta)+d}{2n+1} \right]
\end{aligned}
\tag{4-30}$$

무차원 변수 관계식 식 (4-25)를 이용하여 식 (4-30)을 정리하면 평행 평판 사이의 유동에서 발생하는 압력 손실은 식 (4-31)과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned}
\frac{\Delta P}{L} &= \left( \frac{2Q}{d^2} \frac{2n+1}{n} \right)^n \frac{2k}{d} \frac{1}{(1-\delta)} \left[ \frac{1}{1-a\delta-b\delta^2} \right]^n \\
&= \left( \frac{2Q}{d^2} \frac{2n+1}{n} \right)^n \frac{2k}{d} \frac{1}{1-\frac{2L\tau_y}{\Delta Pd}} \left[ \frac{1}{1-a\frac{2L\tau_y}{\Delta Pd}-b\left(\frac{2L\tau_y}{\Delta Pd}\right)^2} \right]^n
\end{aligned}
\tag{4-31}$$

식 (4-31)에서 a, b는 식 (4-32), 식 (4-33)에 정의하였다.

$$a = \frac{1}{n+1} \tag{4-32}$$

$$b = \frac{n}{n+1} \tag{4-33}$$

식 (4-31)에서  $\Delta P$ 는 Bisection 법을 이용한 수치해석을 통해 구할 수 있다.<sup>39)</sup>

평행 평판 사이를 통과하는 총 유량 관계식 식 (4-30)을 이용해 환형 유로를 통과하는 총 유량을 식 (4-34)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $c$ 는 환형 유로의 평균 원주값이다.

$$\begin{aligned}
 |Q| &= \frac{c n}{n+1} \left( \frac{1}{K} \frac{\partial p}{\partial x} \right)^{\frac{1}{n}} \left( \frac{d-\delta}{2} \right)^{-\frac{n+1}{n}} \left[ \frac{n(d+\delta)+d}{2n+1} \right] \\
 &= \frac{c n}{n+1} \left( -\frac{1}{K} \frac{\Delta P}{L} \right)^{\frac{1}{n}} \left( \frac{d-\delta}{2} \right)^{-\frac{n+1}{n}} \left[ \frac{n(d+\delta)+d}{2n+1} \right]
 \end{aligned}
 \tag{4-34}$$

환형 유로를 통과하면서 생기는 압력 손실은 식 (4-35)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\Delta P}{L} &= \left( \frac{2Q}{cd^2} \frac{2n+1}{n} \right)^n \frac{2k}{d} \frac{1}{(1-\delta)} \left[ \frac{1}{1-a\delta-b\delta^2} \right]^n \\
 &= \left( \frac{2Q}{cd^2} \frac{2n+1}{n} \right)^n \frac{2k}{d} \frac{1}{1-\frac{2L\tau_y}{\Delta Pd}} \left[ \frac{1}{1-a\frac{2L\tau_y}{\Delta Pd}-b\left(\frac{2L\tau_y}{\Delta Pd}\right)^2} \right]^n
 \end{aligned}
 \tag{4-35}$$

### 4.3 환형 유로 유동 해석

MR 댐퍼의 유동을 반경 R을 가지는 수평 환형 유로를 통과하는 유동이며, 그 좌표계를 Fig. 4.6과 같다.

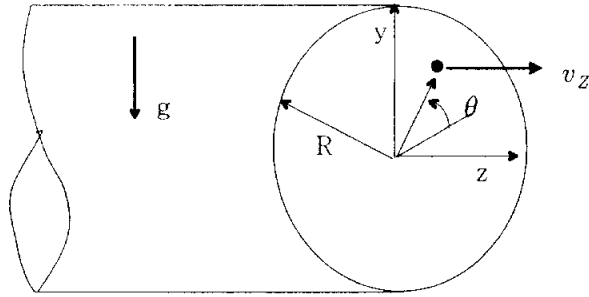


Fig. 4.6 A coordinate system of flow analysis

MR 유체를 비압축성 유체로 가정하면, 평행 평판 유동과 마찬가지로 Fig. 4.6에 대한 연속 방정식(continuity equation) 식 (4-36)으로부터 식 (4-37)을 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho v_\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (4-36)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (4-37)$$

MR 댐퍼 내의 유동이 정상 상태의 축대칭 유동인 경우,  $v_z$ 는 환형 유로의 반경 r의 함수가 된다. 이러한 조건을 Navier-Stokes 방정식 식 (4-38.1), 식 (4-38.2), 식 (4-38.3)에 적용하면 식 (4-39.1), 식 (4-39.2), 식 (4-39.3)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
& \rho \left( \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \\
&= - \frac{\partial p}{\partial r} + \rho g_r + \mu \left[ \frac{1}{r} \left( r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) - \frac{v_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right]
\end{aligned} \tag{4-38.1}$$

$$\begin{aligned}
& \rho \left( \frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r v_\theta}{r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) \\
&= - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \rho g_\theta + \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} \right) - \frac{v_\theta}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} \right]
\end{aligned} \tag{4-38.2}$$

$$\begin{aligned}
& \rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} - v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \\
&= - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right]
\end{aligned} \tag{4-38.3}$$

$$0 = - \rho g \sin \theta - \frac{\partial p}{\partial r} \tag{4-39.1}$$

$$0 = - \rho g \cos \theta - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} \tag{4-39.2}$$

$$0 = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right] \tag{4-39.3}$$

식 (4-39.2)에서 특정 단면적에서 압력은 정수력학적임을 알 수 있다. 식 (4-39.3)은 식 (4-40)의 형태로 변형할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial r}(r\tau) = r \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4-40)$$

식 (4-40)의  $\tau$ 에 허셀-버클리 모델의 구성 방정식을 대입하여 적분하면 식 (4-41)와 같은 속도 분포를 얻을 수 있다.

$$v_z(r) = \frac{n}{n+1} \left( \frac{1}{2K} \frac{\partial p}{\partial z} r + \frac{C_1}{K} \frac{1}{r} - \frac{\tau_y}{K} \right)^{\frac{n+1}{n}} \frac{1}{\frac{1}{2K} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{C_1}{K} \frac{1}{r^2}} + C_2 \quad (4-41)$$

환형 유로에 대한 속도 분포는 Fig. 4.6 과 같다.

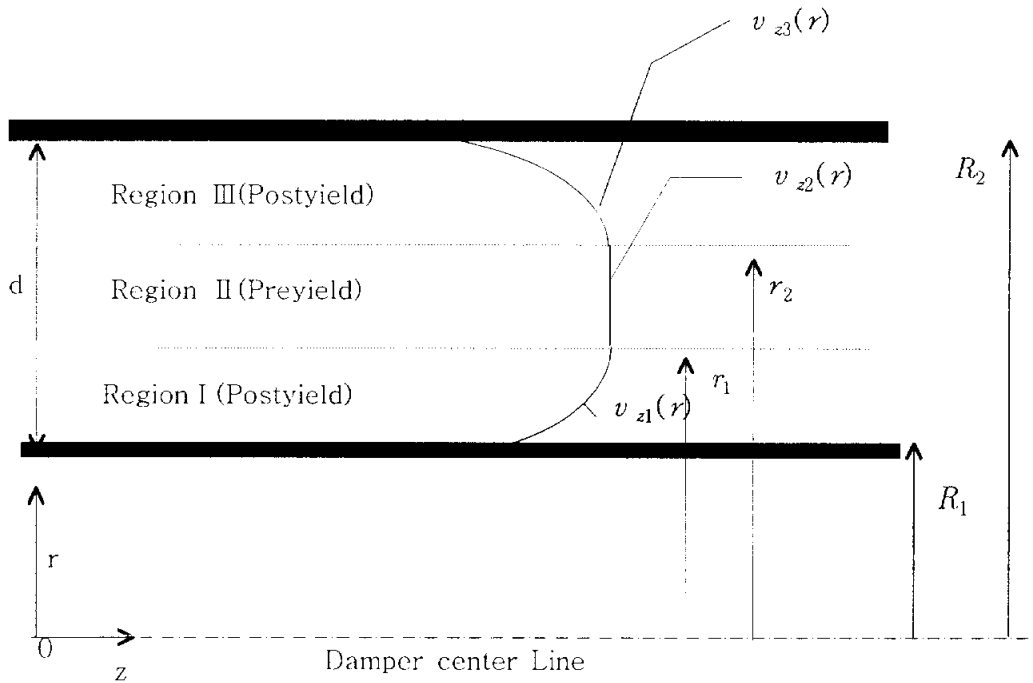


Fig. 4.7 Velocity profile of MR fluid in an annular tube

Fig. 4.6를 통해서 식 (4-42), 식 (4-43), 식 (4-44), 식 (4-45), 식 (4-46), 식 (4-47)의 경계 조건을 얻을 수 있다.

$$v_{z1}(R_1) = 0 \quad (4-42)$$

$$v_{z3}(R_2) = 0 \quad (4-43)$$

$$v_{z1}(r_1) = v_{z2}(r_1) = v_{z2}(r_2) = v_{z1}(r_2) \quad (4-44)$$

$$v'_{z1}(r_1) = v'_{z2}(r_1) = v'_{z2}(r_2) = v'_{z1}(r_2) = 0 \quad (4-45)$$

$$\tau(r_1) = \tau_y \quad (4-46)$$

$$\tau(r_2) = -\tau_y \quad (4-47)$$

식 (4-46)과 식 (4-47)을 이용해 식 (4-48)을 유도할 수 있다.

$$r_2 - r_1 = \frac{2\tau_y}{\frac{\partial p}{\partial z}} \quad (4-48)$$

위의 6가지 경계 조건을 각 구간에 적용하면, 영역 I에서의 속도 분포를 식 (4-49)과 같이 구할 수 있다.

$$v_{z1}(r) = \frac{n}{n+1} \left( \frac{1}{2K} \frac{\partial p}{\partial z} r + \frac{\tau_y R_1 - \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial z} R_1^2}{K} \frac{1}{r} - \frac{\tau_y}{K} \right) \frac{r^{n+1}}{n} \cdot \frac{1}{\frac{1}{2K} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\tau_y R_1 - \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial z} R_1^2}{K} \frac{1}{r^2}} \quad (4-49)$$

영역 III에서의 속도 분포는 식 (4-50)과 같다.

$$v_{z1}(r) = \frac{n}{n+1} \left( \frac{1}{2K} \frac{\partial p}{\partial z} r + \frac{\tau_y R_2 - \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial z} R_2^2}{K} \frac{1}{r} - \frac{\tau_y}{K} \right)^{\frac{n+1}{n}}$$

$$\cdot \frac{1}{\frac{1}{2K} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\tau_y R_2 - \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial z} R_2^2}{K} \frac{1}{r^2}}$$

(4-50)

영역 II에서의 속도 분포를 식 (4-51.1), 식 (4-51.2)와 같이 구할 수 있다.

$$v_{z1}(r_1) = \frac{n}{n+1} \left( \frac{1}{2K} \frac{\partial p}{\partial z} r_1 + \frac{\tau_y R_1 - \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial z} R_1^2}{K} \frac{1}{r_1} - \frac{\tau_y}{K} \right)^{\frac{n+1}{n}}$$

$$\cdot \frac{1}{\frac{1}{2K} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\tau_y R_1 - \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial z} R_1^2}{K} \frac{1}{r_1^2}}$$

$$= v_{z2}(r_1)$$

(4-51.1)

$$v_{z3}(r_2) = \frac{n}{n+1} \left( \frac{1}{2K} \frac{\partial p}{\partial z} r_2 + \frac{\tau_y R_2 - \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial z} R_2^2}{K} \frac{1}{r_2} - \frac{\tau_y}{K} \right)^{\frac{n+1}{n}}$$

$$\cdot \frac{1}{\frac{1}{2K} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\tau_y R_2 - \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial z} R_2^2}{K} \frac{1}{r_2^2}}$$

$$= v_{z2}(r_2)$$

(4-51.2)

환형 유로를 통과하는 전체 유량 Q는 식 (4-52)와 같다.

$$\begin{aligned}
 Q &= 2\pi \left[ \int_{R_1}^{r_1} r v_{z1}(r) dr + \int_{r_1}^{r_2} r v_{z2}(r) dr + \int_{r_2}^{R_2} r v_{z3}(r) \right. \\
 &= 2\pi \left[ \int_{R_1}^{r_1} r \left( \frac{n}{n+1} \left( \frac{1}{2K} \frac{\partial p}{\partial z} r + \frac{\tau_y R_1 - \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial z} R_1^2}{K} \frac{1}{r} - \frac{\tau_y}{K} \right) \frac{1}{r} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right. \\
 &\quad \left. \cdot \frac{1}{\frac{1}{2K} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\tau_y R_1 - \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial z} R_1^2}{K} \frac{1}{r^2}} \right) dr \\
 &\quad + \int_{r_1}^{r_2} r \left( \frac{n}{n+1} \left( \frac{1}{2K} \frac{\partial p}{\partial z} r + \frac{\tau_y R_1 - \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial z} R_1^2}{K} \frac{1}{r_1} - \frac{\tau_y}{K} \right) \frac{1}{r_1} \right)^{\frac{n+1}{n}} \\
 &\quad \left. \cdot \frac{1}{\frac{1}{2K} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\tau_y R_1 - \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial z} R_1^2}{K} \frac{1}{r_1^2}} \right) dr \\
 &\quad + \int_{r_2}^{R_2} r \left( \frac{n}{n+1} \left( \frac{1}{2K} \frac{\partial p}{\partial z} r + \frac{\tau_y R_2 - \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial z} R_2^2}{K} \frac{1}{r} - \frac{\tau_y}{K} \right) \frac{1}{r} \right)^{\frac{n+1}{n}} \\
 &\quad \left. \cdot \frac{1}{\frac{1}{2K} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\tau_y R_2 - \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial z} R_2^2}{K} \frac{1}{r^2}} \right) dr \right] \\
 &= (A_p - A_r) v \tag{4-52}
 \end{aligned}$$

식 (4-44)와 식 (4-48) 그리고 식 (4-52)는 이용하여  $r_1$ 과  $r_2$ , 압력 손실  $\frac{\partial p}{\partial z}$  를 수치 해석적으로 구할 수 있으며, 식 (4-52)의 적분은 adaptive recursive Newton-Cotes 적분법을 이용하였다. <sup>25),34),52)</sup> 표 4.1에 자기장이 인가되지 않았

을 경우의 평행 평판 유동 해석과 환형 유로 유동 해석을 통해 구한 압력 손실을 나타내었다. 사용된 파라미터 값은 표 아래에 나타내었다. 또한 평행 평판 유동 해석 모델과 환형 유로 유동 해석 모델의 최대 오차는  $d/R_2 < 0.2$  일 경우 0.5% ,  $d/R_2 < 0.4$  일 경우 2% 이하로 검증되었다. <sup>28),34)</sup> 따라서 평행 평판 유동 해석이 제안된 댐퍼의 유동 해석에 적용될 수 있으며, 환형 유로 유동 해석보다 편리하게 사용될 수 있다.

Table 4.1 Pressure loss comparison between parallel-plate and axisymmetric models

속 도 (mm/s)	평행 평판 유동 해석 모델 압력손실 $\Delta P$ (MPa)	환형 유로 유동 해석 모델 압력손실 $\Delta P$ (MPa)
100	0.120106	0.120112
200	0.169456	0.169463
300	0.207255	0.207261
400	0.239083	0.239091
500	0.267101	0.267120
600	0.292413	0.292419
700	0.315676	0.315687
800	0.337319	0.337326
900	0.357638	0.357645
1000	0.376848	0.376854
1100	0.395114	0.395121
1200	0.412561	0.412570

## 제 5 장 자기장 해석

MR 댐퍼의 감쇠력은 인가된 자기장 세기에 의존하는 MR 유체의 항복 응력에 영향을 받게 된다. MR 유체는 2.2절에서 살펴본 바와 같이 비선형 자기 물성치를 가지고 있으며, 자기 회로를 구성하는 코어와 플럭스 링 또한 비선형 강자성체이다. 피스톤 밸브 내에 형성되는 자기 회로는 자기 회로를 구성하고 있는 부품의 재질에 영향을 받을 뿐 아니라, 코일의 감긴 수와 자기 회로의 형상에도 의존한다. 근래 이러한 MR 유체의 특성을 고려하여 설계된 연구가 이루어지고 있으나<sup>40),41),42)</sup> MR 댐퍼에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 본 절에서는 본 연구에서 제안된 MR 유체 댐퍼에 관한 자기 해석을 통해 자기 회로의 타당성을 검증하고자 한다.

### 5.1 이론적 배경

#### 5.1.1 Ampere 법칙

공간에서 가느다란 루프를 따라서 전류가 흐르고 있을 때, 임의의 지점에서의 자속 밀도 벡터  $B$ 는 식 (5-1)의 Biot-Savart 법칙을 통해 구할 수 있다.

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{c'} \frac{I' d\mathbf{l}' \times \mathbf{a}_R}{R^2} T \quad (5-1)$$

여기서  $\mathbf{a}_R = \mathbf{r} - \mathbf{r}'$ 은 Fig. 5.1에 나타낸 것과 같이 전류가 흐르고 있는 원천(source)에서 관측점을 가리키는 단위 벡터이며,  $\mu_0$ 는 자유 공간의 투자율로  $4\pi \times 10^{-7}$  (H/m)의 값을 가진다.  $I'$ 는 자속 밀도를 발생시키는 미분 전류로 원천이 되며,  $d\mathbf{l}'$ 는 원천 전류가 흐르고 있는 미소 루프 길이이다.

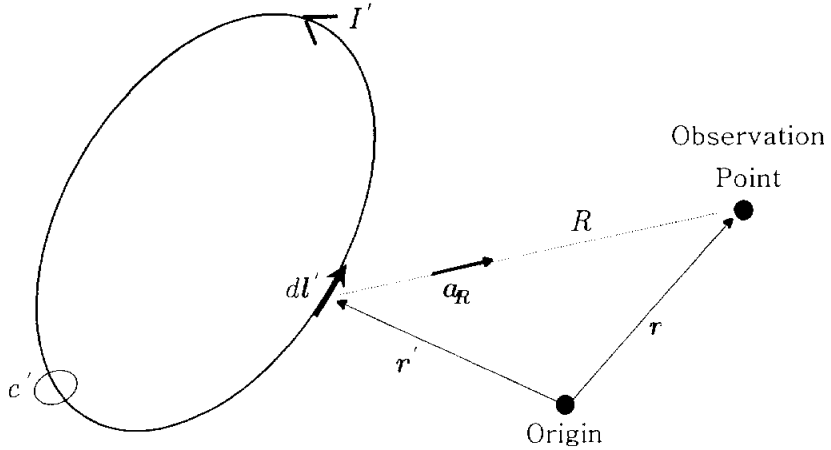


Fig. 5.1 Source-field relationships of Biot-Savart law

자계는 폐회로를 형성한다. 이러한 순환(circulation)은 자계의 특성으로 식 (5-1)의 Biot-Savart 법칙에서 유도할 수 있으며 그 결과식은 식 (5-2)과 같으며 자성 물질이 없는 영역인 자유 공간에서만 성립한다. 식에서  $\mathbf{J}$ 는 전류 밀도이다.

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} \quad (5-2)$$

자기장 강도(magnetic field intensity) 또는 간단히 자기장(magnetic field)  $\mathbf{H}$ 는 식 (5-3)와 같이 정의한다.

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} \quad [A/m] \quad (5-3)$$

식 (5-3)의 정의식을 식 (5-2)에 대입하면 자속 밀도  $\mathbf{B}$ 와 자기장  $\mathbf{H}$ 의 관계식 (5-4)를 얻을 수 있다.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (5-4)$$

식 (5-4) 는 Ampere 법칙의 미분형이다. 이 식을 Fig 5.2와 같이 닫힌 경로  $c$  로써 형성되는 임의의 열린 표면  $s$ 를 따라서 표면 적분을 하고, Stoke 정리를 이용하여 정리하면 식 (5-5)과 같은 Ampere 법칙의 적분형을 얻을 수 있다.

$$\int_{c(s)} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_{s(c)} \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} \quad (5-5)$$

전류가 매우 가느다란 형태를 갖는 경우, Ampere 법칙은 식 (5-6)과 같다.

$$\int_{c(s)} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_{net} \quad (5-6)$$

$I_{net}$ 은 닫힌 경로  $c$ 로써 형성되는 열린 표면  $s$ 를 관통하는 알짜 전류이며, 식 (5-6)에서 양(+) 전류의 방향은 오른손 법칙을 따름을 알 수 있다.

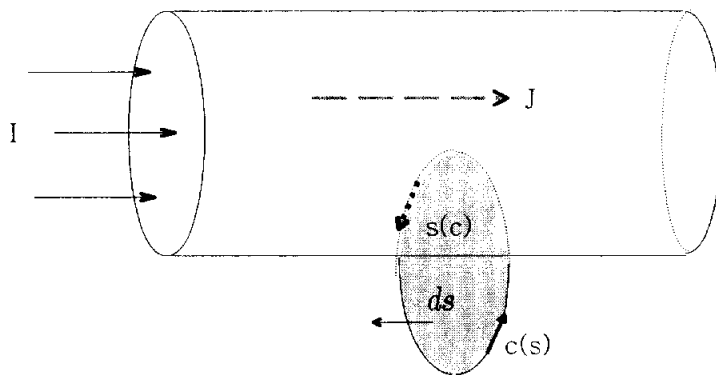


Fig. 5.2 Ampere's law

### 5.1.2 자성 물질

자성을 띄지 않는 물체는 불규칙하게 배열되어 있는 자기 쌍극자(magnetic dipole)로 구성되어 있다고 간주할 수 있다. 각각의 쌍극자들이 제 2의  $\mathbf{B}$ 를 발생시키지만, 전체적으로 상쇄되어 자성을 띄지 않는 것이다.

일정한 부피  $v'$ 을 갖는 자성체가  $\mathbf{B}$  속에 놓여 있다고 가정할 때, 자성체 내부의 미소 체적  $\Delta v'$ 을 정의할 수 있다. 이 체적은 여러 분자로 구성되며, 각각의 분자는 자기 쌍극자로 나타낼 수 있다. 자성체의 단위 부피당 쌍극자 모멘트(magnetic dipole moment)의 벡터 합을 식 (5-7)의 자화 벡터(magnetization vector) 필드  $\mathbf{M}$ 으로 정의한다.

$$\mathbf{M} = \lim_{\Delta v' \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^N \mathbf{m}}{\Delta v'} \quad [A/m] \quad (5-7)$$

여기서  $N$ 은 자성체 단위 부피 속에 들어 있는 분자의 개수이다. 자화 벡터  $\mathbf{M}$ 은 여러 가지 실험에 의해  $\mathbf{H}$ 에 정비례하는 특성을 나타내므로, 식 (5-8)의 관계식을 만족하게 된다.

$$\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H} \quad [A/m] \quad (5-8)$$

식 (5-8)에서  $\chi_m$ 은 자기 감화율(magnetic susceptibility)로 무차원 상수이다. 자화 벡터를 고려하면 식 (5-3)은 식 (5-9)로 변형할 수 있다.

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M} \quad [A/m] \quad (5-9)$$

위 식은 일반적인 매질 속에서 성립하는 식으로, 자유 공간일 경우  $\mathbf{M} = 0$ 이므로, 식 (5-3)이 성립함을 알 수 있다.

식 (5-8)를 식 (5-9)에 대입하면 식 (5-10)의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{B} = \mu_o (1 + \chi_m) \mathbf{H} = \mu_o \mu_r \mathbf{H} = \mu \mathbf{H} \quad (5-10)$$

여기서  $\mu$ 는 투자율로  $[H/m]$ 의 단위를 가지며,  $\mu_r$ 은 비투자율로서 무차원이다. 자성체는 비투자율  $\mu_r$ 이 갖는 범위에 따라 크게 4가지 부류로 나눌 수 있다.

첫째 부류는 반자성체 혹은 역자성체(diamagnetic material)이다. 반자성체는 비투자율  $\mu_r$ 이 1보다 작지만 1에 매우 가까운 값을 갖고 있다. 반자성체는 자화율  $\chi_m$ 이  $-10^{-5}$  근처의 값을 가지기 때문에, 정렬된 자기 쌍극자 모멘트가 자성체 내부의 총 자속 밀도  $\mathbf{B}$ 를 감소시키는 효과를 발생시킨다.

둘째 부류는 비투자율  $\mu_r$ 이 1보다 크지만 1에 매우 가까운 값을 갖는 상자성체(paramagnetic material)이다. 상자성체의 자화율  $\chi_m$ 은 매우 작은 값을 가지므로 상자성 효과는 무시한다.

셋째 부류는 비투자율  $\mu_r$ 이 매우 큰 값을 갖는 강자성체는 외부 자계가 없을 때에도 자화 상태를 나타내는 강자성체(ferromagnetic material)이다. 강자성체는 투자율  $\mu$ 가 상수가 아니고 자기장  $H$ 에 의존하는 비선형 특성을 나타낸다. Fig. 5.3에  $B$ 와  $H$ 의 비선형 관계를 보여주는 전형적인  $B-H$  곡선을 나타내었다.  $H=0$ ,  $B=0$ 의 상태에 있는 자성체는  $H$ 가 증가함에 따라  $B$ 도 따라서 증가하게 되며, 최대값  $B_{sat}$ 에 도달하면 포화 상태(saturation)가 되어 더 이상 증가하지 않는다. 화살표를 따라서  $H$ 를 감소시키면  $B$ 도 감소하게 되나, 이 때의 경로는  $H$  증가시의 경로가 아니다.  $H$ 가 0이 되더라도  $B$ 가 완전히 없어지지 않고 잔류 자속 밀도  $B_r$ 만큼 남아있음을 알 수 있다. 이 특성은 모든 강자성체가 갖는 공통된 특성이다.  $H$ 를 한 주기 변화 시키면 이력 곡선(hysteresis curve)을 얻게 된다. 이력 곡선의 한 점에서의 곡선 기울기는 강자성체의 투자율을 나타낸다.

넷째 부류는 페라이트(ferrite, 아철산염)로서 페리자성체(ferrimagnetic material)이다. 페라이트는 금속 이온과 산화철을 일정한 비율로 조합한 물질으로써 강자성체와 공통되는 특징이 많지만 강자성체에 비해 분자의 자기 쌍극자가 배열되는 숫자가 훨씬 적다. 따라서  $B$ 가 포화되는 점이 강자성체에 비해 적은 값을

갖게 된다. Table 5.1에 여러 재료의 비투자율 값을 나타내었다.

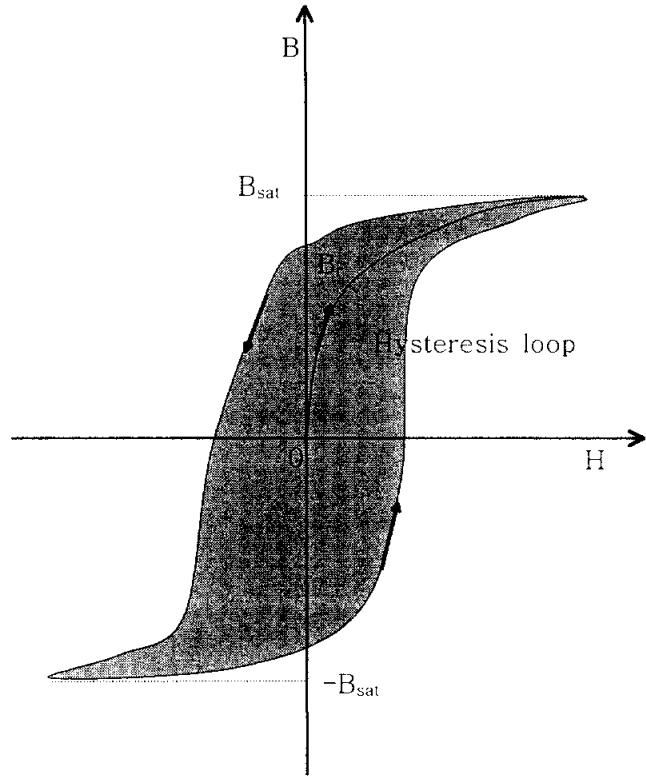


Fig. 5.3 Typical B-H curve

Table 5. 1 Relative permeability of materials

Material	Type	$\mu_r$
Water	Diamagnetic ( $\mu_r \approx 1$ )	0.99999
Copper	Diamagnetic ( $\mu_r \approx 1$ )	0.99999
Silver	Diamagnetic ( $\mu_r \approx 1$ )	0.99998
Gold	Diamagnetic ( $\mu_r \approx 1$ )	0.99996
Bismuth	Diamagnetic ( $\mu_r \approx 1$ )	0.99983
Air	Paramagnetic ( $\mu_r \approx 1$ )	1.000004
Magnesium	Paramagnetic ( $\mu_r \approx 1$ )	1.000012
Aluminum	Paramagnetic ( $\mu_r \approx 1$ )	1.000021
Titanium	Paramagnetic ( $\mu_r \approx 1$ )	1.00018
FeO <sub>2</sub>	Paramagnetic ( $\mu_r \approx 1$ )	1.0014
Cobalt	Ferromagnetic ( $\mu_{r,max}$ )	250
Nickel	Ferromagnetic ( $\mu_{r,max}$ )	600
Mild steel	Ferromagnetic ( $\mu_{r,max}$ )	2000
Iron	Ferromagnetic ( $\mu_{r,max}$ )	5000
Mumental	Ferromagnetic ( $\mu_{r,max}$ )	100000
Superalloy	Ferromagnetic ( $\mu_{r,max}$ )	800000

### 5.1.3 경계 조건

인접하고 있는 두 매질 속에 분포하는 정자계에서, 경계면의 필드가 나타내는 관계는 각 매질의 자계의 특성을 결정하게 된다. Fig. 5.4에 인접한 두 자성 물질의 경계면을 나타내었다.

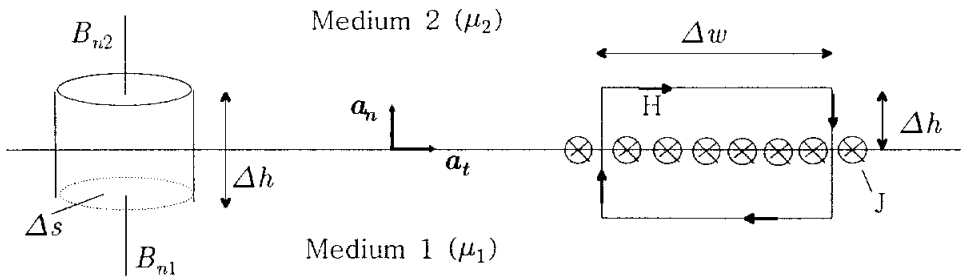


Fig. 5.4 Boundary conditions of magnetic material

인접한 두 자성 물질의 경계면에서 자속 밀도  $\mathbf{B}$ 는 경계면과 평행한 접선 성분  $B_t$ 와 수직인 법선 성분  $B_n$ 으로 분해할 수 있다. Gauss 법칙 식 (5-11)을 그림 5.4의 왼편의 폐곡면에 적용하고, 밑면  $\Delta s$ 와 높이  $\Delta h$ 가 매우 작다고 가정하면 식 (5-12)의 관계를 얻을 수 있다.

$$\int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (5-11)$$

$$B_{n2} = B_{n1} \quad (5-12)$$

위 관계식을 통해 두 자성 물질 사이의 경계면에서  $\mathbf{B}$ 의 법선 성분은 경계면

양쪽에서 연속적임을 알 수 있다. 식 (5-10)가 성립할 때 식 (5-13)을 유도할 수 있으며, 두 자성 물질의 경계면에서의  $\mathbf{H}$ 의 법선 성분은 불연속적임을 알 수 있다.

$$H_{n2} = \frac{\mu_1}{\mu_2} H_{n1} \quad (5-13)$$

Ampere 법칙 식 (5-5)를 그림 5.4의 오른쪽의 폐경로에 적용하고, 경로가 매우 작다고 가정하면 식 (5-14)의 관계를 얻을 수 있다.

$$H_{t2} = H_{t1} \quad (5-14)$$

위 관계식을 통해 두 자성 물질의 경계면에서  $\mathbf{H}$ 의 접선 성분은 경계면 양쪽에서 연속적임을 알 수 있다. 식 (5-10)이 성립할 때 식 (5-15)를 유도할 수 있으며, 두 자성 물질의 사이의 경계면에서  $\mathbf{B}$ 의 접선 성분은 불연속적임을 알 수 있다.

$$B_{t2} = \frac{\mu_2}{\mu_1} B_{t1} \quad (5-15)$$

## 5.2 유한 요소 해석

본 절에서는 상용 자기장 해석 프로그램인 MAXWELL을 이용하여 제안된 자기 회로를 해석하였다.<sup>43)</sup>

### 5.2.1 유한 요소 모델

제안된 자기 회로는 R-Z평면에 축대칭(axisymmetric) 모델로 해석되었다. 이 2차원 모델은 대칭축을 가지는 실린더형 구조물의 단면을 나타내며,  $B$ 와  $H$  필드는 각각의 단면을 기준으로 계산되어진다. Fig. 5. 5에 유한 요소 모델을 나타내었다.

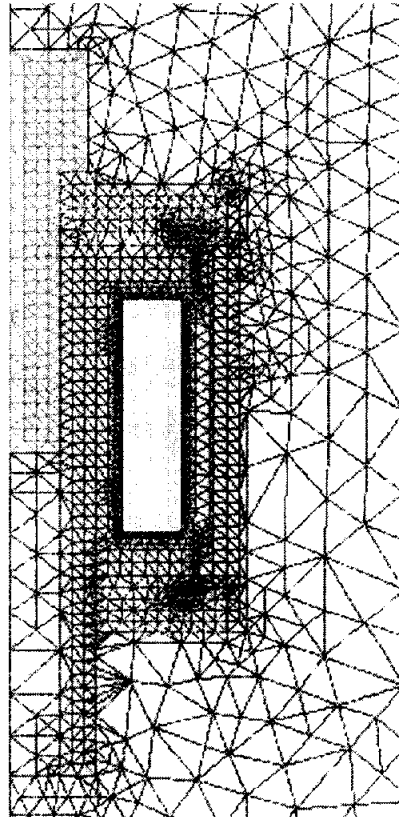


Fig. 5.5 Finite element model

본 모델에는 삼각형 요소가 사용되었다. 주관심 영역은 코어와 플럭스 링의 틈새이다. 좁은 틈새나 모서리에서는 자계의 변화가 크므로 적절한 mesh가 필요하며 본 해석에서는 충분한 수의 요소가 사용되었다.

### 5.2.1 해석 절차

Fig. 5.6과 같은 MAXWELL의 2D Modeler에서 제안된 댐퍼 형상을 모델링하고 유한 요소 모델을 생성한 후, 자기 회로를 구성하는 각각의 부품들의 물성치를 Fig. 5.7의 MAXWELL의 Material Manager에서 정의한다. Material Manager는 다양한 자성 물질의 물성치를 제공하고 있으며, MR 유체와 같이 새로운 물질의 물성치는 Material Add를 이용하여 직접 구현할 수 있다.

댐퍼의 구성 부품에 해당하는 적절한 물성치를 입력 후 Fig. 5.8의 MAXWELL의 Setup Boundary/Sources에서 경계 조건과 전류를 입력한다. Boundary는 제안된 모델의 주변 필드(field)를 정의하는 항이다. MR 댐퍼의 자기 회로는 자체 코일이 생성하는 자계외에 외부에서 받는 전자기 영향은 없다고 가정하였다. Source는 제안된 모델에 전류를 인가해주는 항이다. MR 댐퍼의 자기 회로에 입력되는 전류는 자기 회로의 코일이 발생시키는 총 기전력을 NI (N:코일의 감긴 횟수, I : 인가해준 DC 전류) 값이다.

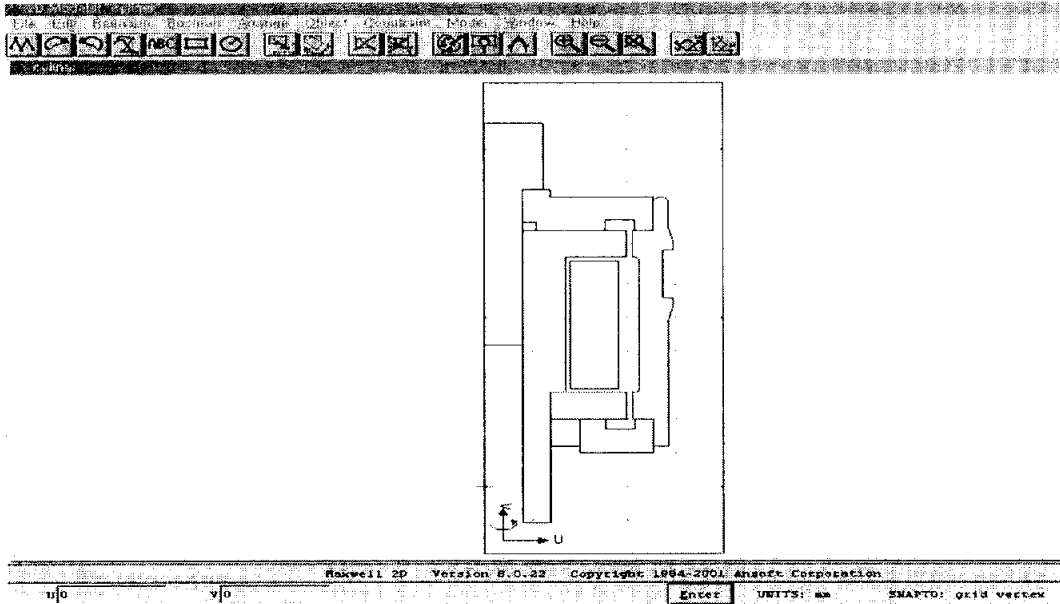


Fig. 5.6 MAXWELL 2D Modler

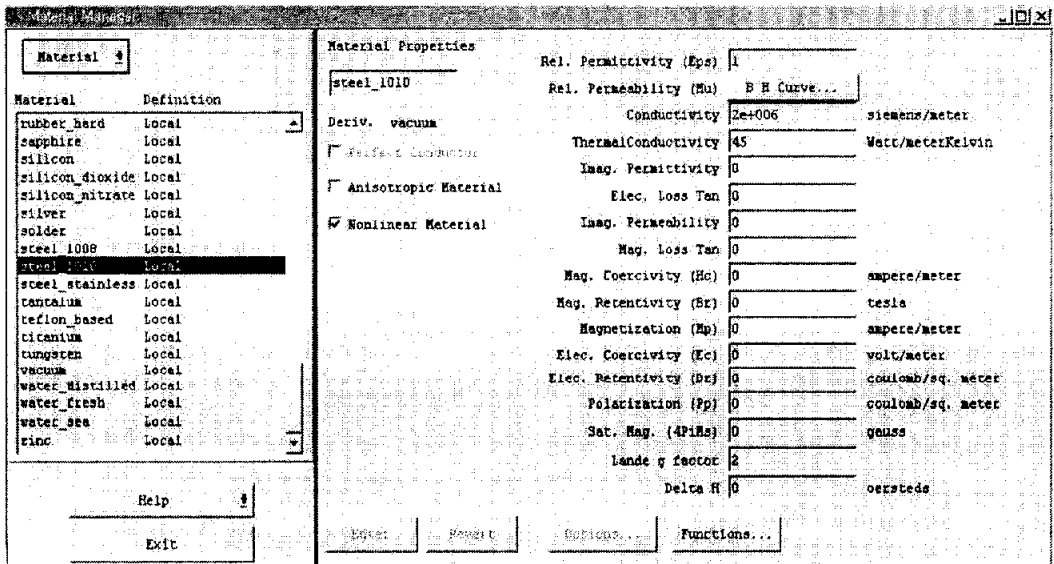


Fig. 5.7 MAXWELL Material manager

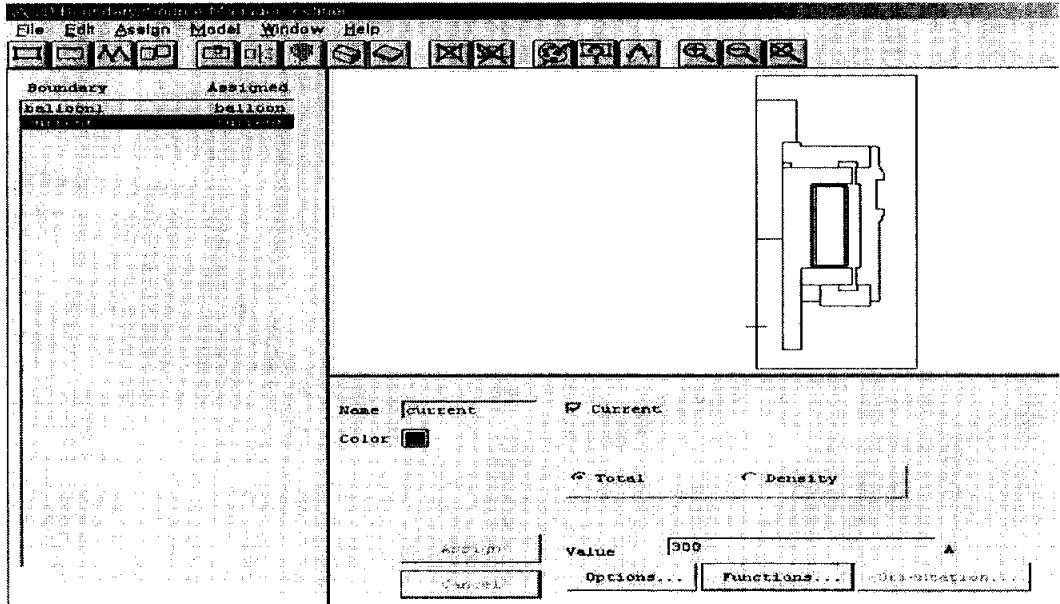


Fig. 5.8 MAXWELL Setup boundary/sources

MAXWELL의 정자계 시뮬레이션이 인가해준 DC 전류로부터 제안된 모델에 발생하는 자기장을 계산하는 방법은 다음과 같다.<sup>44)</sup> 먼저 자기 벡터 포텐셜 (magnetic vector potential)  $A_z(x, y)$ 를 식 (5-16)에서 구한다.

$$J_z(x, y) = \nabla \times \left( \frac{1}{\mu_r \mu_o} \right) (\nabla \times \mathbf{A}_z(x, y)) \quad (5-16)$$

정자계를 Ampere 법칙에서 해석되어진다.  $B$ 와  $H$ 의 관계 Eq, (5-10)를 Ampere 법칙 식 (5-5)에 대입하여 정리하면 식 (5-17)을 얻는다.

$$\nabla \times \left( \frac{\mathbf{B}}{\mu_r \mu_o} \right) = \mathbf{J} \quad (5-17)$$

$B$ 는 식 (5-18)의 관계를 만족하므로, 이 식을 식 (5-17)에 대입하면 식

(5-19)가 성립한다.

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (5-18)$$

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu_r \mu_0} \right) (\nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J} \quad (5-19)$$

MAXWELL에서는 인가된 전류값을 해당하는 자속 밀도 벡터  $\mathbf{A}_z(x, y)$ 을 먼저 계산한 다음, 자속 밀도 벡터  $\mathbf{B}$ 를 구하고,  $\mathbf{B}$ 와  $\mathbf{H}$ 의 관계식에서  $\mathbf{H}$ 를 구한다.

### 5.2.3 해석 결과

제안된 자기 회로의 타당성은 Fig. 5.9의 flux lines의 경로로 확인할 수 있다. 관심 영역인 코어와 플럭스 링의 틈새에서 flux lines 이 수직으로 형성되고 있으며, 자기 누설도 없음을 알 수 있다.

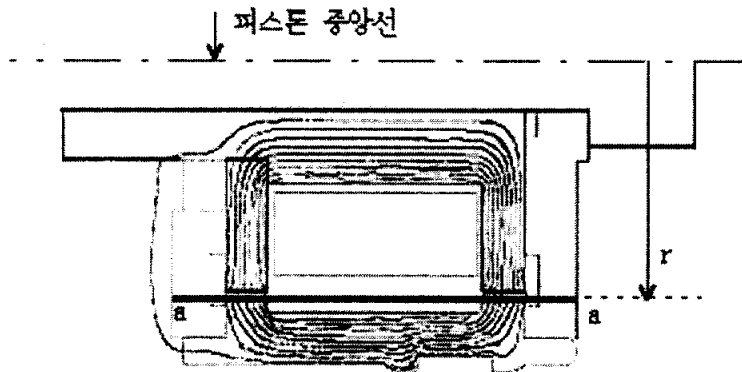


Fig. 5.9 Magnetic Flux lines in the piston

Biot-Savart 법칙 식 (5-1) 에 의하면 자속 밀도  $B$ 는 자기장을 발생시키는 원

천으로부터의 거리  $R$ 의 제곱에 반비례한다. 그러나 본 연구에서 설계된 피스톤 밸브의 경우, 자기장이 형성되는 틈새가 0.6 mm로 매우 작기 때문에 틈새의 자기장 세기는 일정하다고 할 수 있다. Fig. 5.10에 피스톤 중앙으로부터의 다른 거리  $r$ 에 있는 틈새에서의 자기장 세기를 나타내었다. Fig. 5.10의 Distance는 Fig. 5.9에서의 a-a'선의 길이이다. 인가해주는 전류에 의해 발생하는 자기장 형상이 같으며, 자기장 세기의 차이가 미소함을 알 수 있다. 따라서 MR 유체가 통과하는 틈새 유로내의 자기장 세기는 틈새 중앙의 값으로 취할 수 있으며, 자기장에 의존하는 항복 응력값도 틈새 내에서 일정한 값을 갖는다고 할 수 있다.

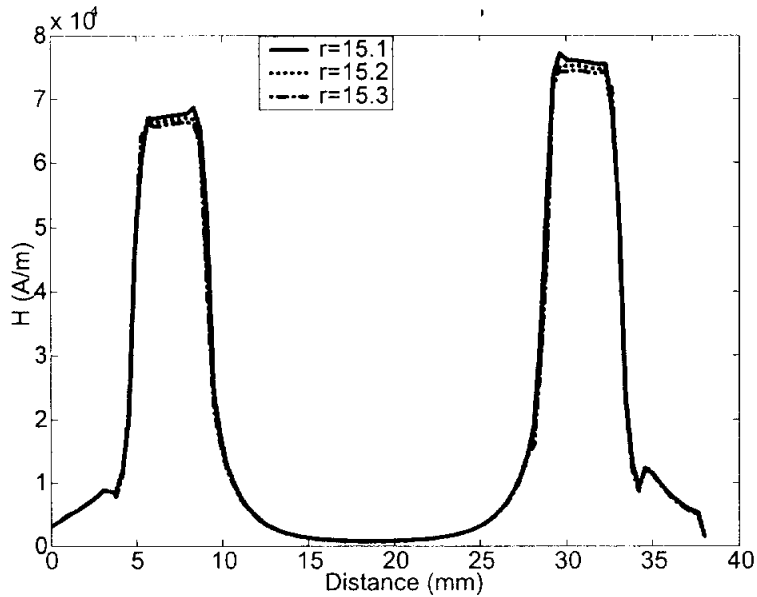


Fig. 5.10  $H(r)$  in the gap (0.4A)

Fig. 5.11과 Fig. 5.12에 틈새에서의 자기장 세기와 자속 밀도를 나타내었다. MR 유체와 자기 회로를 구성하고 있는 재료의 비선형 자기 특성으로 인하여 인가된 전류에 대해 자기장 세기  $H$ 와 자속 밀도  $B$ 가 선형적으로 증가하지 않음을 알 수 있다.

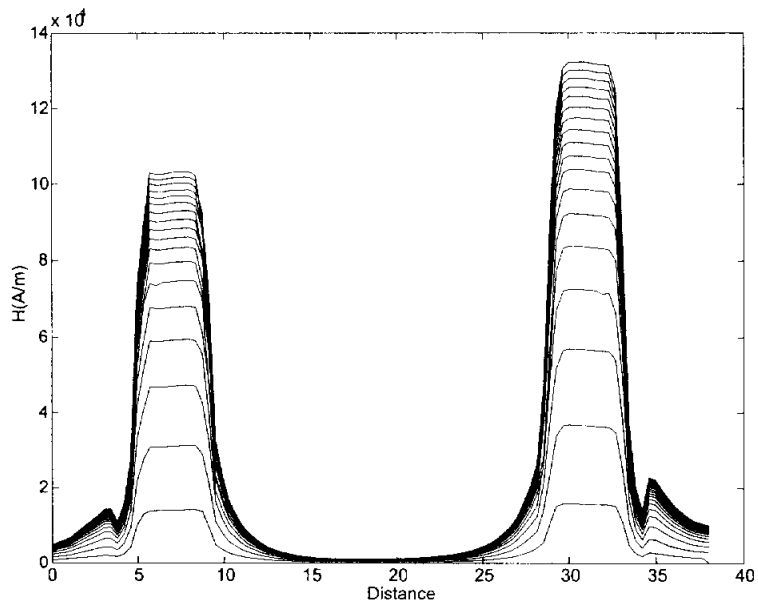


Fig. 5.11 H in the gap ( 0A ~ 1.8A )

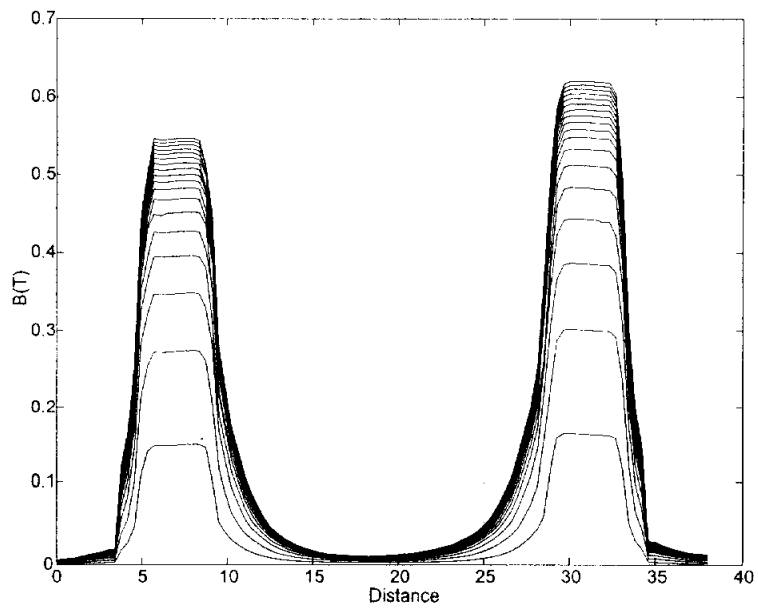


Fig. 5.12 B in the gap ( 0A ~ 1.8 A )

## 제 6 장 MR 댐퍼의 성능 예측 및 검증

### 6.1 MR 댐퍼의 감쇠력 예측

MR 댐퍼는 모노 튜브 댐퍼이다. Fig. 6.1에 모노 튜브 댐퍼의 감쇠력을 나타내는 자유 물체도를 나타내었다. 이를 따르면 시간  $t$ 에 따른 댐퍼의 가진, 식(6-1)에 대한 감쇠력은 식 (6-2)과 같이 표현된다. <sup>45)</sup>

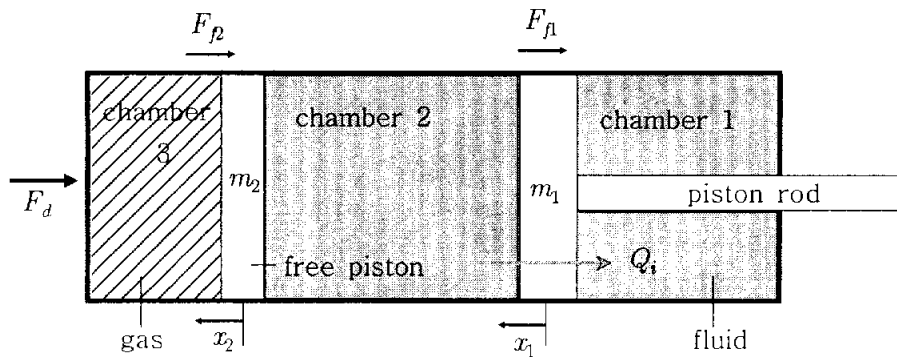


Fig. 6.1 Schematic diagram of a monotube damper

$$x_1 = A(1 - \cos(2\pi ft)) \quad (6-1)$$

$$F_d = P_1(A_p - A_r) - P_3A_p - \text{sign}\left(\frac{dx_1}{dt}\right)F_f - \text{sign}\left(\frac{dx_2}{dt}\right)F_p + P_3A_r \quad (6-2)$$

$A$ 는 진폭이며,  $f$ 는 가진 주파수이다. 가진  $x_1$ 에 대해 각 chamber  $i$ 에 대한 압력은  $P_i$ 이며,  $F_f$ 과  $F_p$ 는 피스톤과 프리 피스톤은 마찰력이다.  $F_d$ 는 감쇠력이며,  $A_p$ 는 피스톤 단면적,  $A_r$ 은 피스톤 로드 단면적,  $x_2$ 는 프리 피스톤의

변위,  $P_{30}$ 은 초기 가스압력이다.

등온 과정일 경우 반동실과 압축실에 대한 연속 방정식은 식 (6-3), 식 (6-4)과 같다.

$$\sum Q = (A_p - A_r) \frac{dx_1}{dt} + \frac{1}{\beta} ((A_p - A_r)x_1 + V_{10}) \frac{dP_r}{dt} \quad (6-3)$$

$$- \sum Q = A_p \left( \frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) + \frac{1}{\beta} (V_{20} - A_p x_1 + V_{30} - V_3) \frac{dP_2}{dt} \quad (6-4)$$

$\beta$ 는 유체의 체적 탄성 계수(bulk modulus) 이며,  $V_{30}$ 는 각 챔버의 초기 부피이다. 단열 과정이라고 가정하며, 가스 챔버의 부피는 식 (6-5)의 관계를 가진다.

$$P_{30} V_{30}^n = P_3 V_3^n \quad (6-5)$$

질소 가스일 경우  $n=1.4$ 이다.

오리피스를 통과하는 총 유량은 식 (6-6)과 같이 주어진다.

$$Q_i(P_1, P_2) = C_{di} A_i \text{sign}(P_2 - P_1) \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_2 - P_1|} \quad (6-6)$$

$C_{di}$ 는 송출 계수(discharge coefficient) 이며,  $A_i$ 는 오리피스 면적이며,  $\rho$ 는 오일의 밀도이다.

프리 피스톤의 운동 방정식은 식 (6-7)과 같다.

$$(P_2 - P_3)A_p - \text{sign}\left(\frac{dx_2}{dt}\right)F_p = m_2 \frac{d^2x_2}{dt^2} \quad (6-7)$$

$m_2$ 는 프리 피스톤은 질량이며, 식 (6-7)에서의 가속도는 식 (6-8)에서 구할 수 있다.

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{-1}{A_p} \frac{dV_3}{dt} \quad (6-8)$$

식 (6-8)에서  $\frac{dV_3}{dt}$ 는  $P_4 \equiv \frac{dP_3}{dt}$ 의 정의를 이용해 식 (6-9)과 같이 표현된다.

$$\frac{dV_3}{dt} = \frac{-1}{n} V_{30} P_{30}^{\frac{1}{n}} P_3^{-((\frac{1}{n})+1)} P_4 \quad (6-9)$$

식 (6-5), 식 (6-6), 식 (6-7), 식 (6-8), 식 (6-9)을 이용하여 감쇠력을 구할 수 있다.

본 연구에서는 댐퍼내의 유동이 비압축 · 정상 상태라는 가정하에 체적 탄성 계수  $\beta$ 를 무시하였으며, 송출 계수  $C_d$ 가 고려되지 않은 완전 유동으로 가정하여, 오리피스에 의한 손실 압력을 식 (4-35)를 이용하여 구하였으며, 마찰력은 일정한 값으로 취하였다. 프리 피스톤 질량  $m_2$ 가 아주 작다고 가정하면, 가스실의 체적 변화와 압력 변화는 가진에 의해 발생하는 chamber 1의 체적 변화량과의 관계식에서 직접 구할 수 있다. 식 (4-35)의 항복 응력  $\tau_y$ 는 Fig. 2.6의 자료를 커브 피팅하여 관계식을 정의하였으며, Fig. 6.2에 나타내었다. 감쇠력을 구하는 계산 과정은 Fig. 6.3과 같이 요약할 수 있다. 부록 A에 시뮬레이션 프로그램을 첨부하였으며, 제안된 시뮬레이션은 4개의 연립 상미분 방정식을 대수 방정식으로 간단화하였다. Table 6.1에 전류를 인가하지 않고 10 CPM으로 가진할 경우의 시뮬레이션 입력값을 나타내었다.

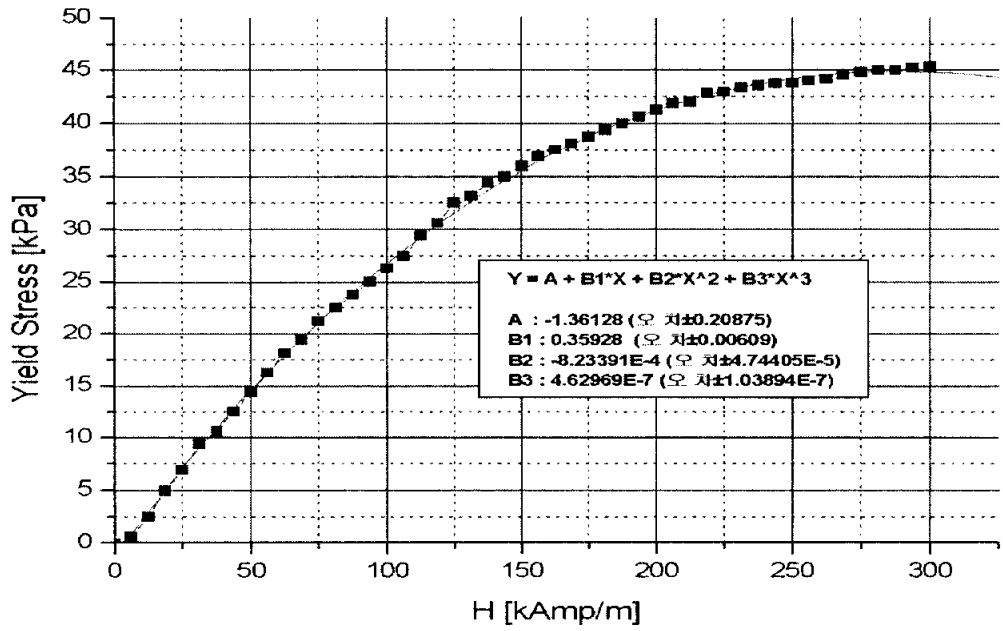


Fig. 6.2 Curve fitting of shear stress versus magnetic field

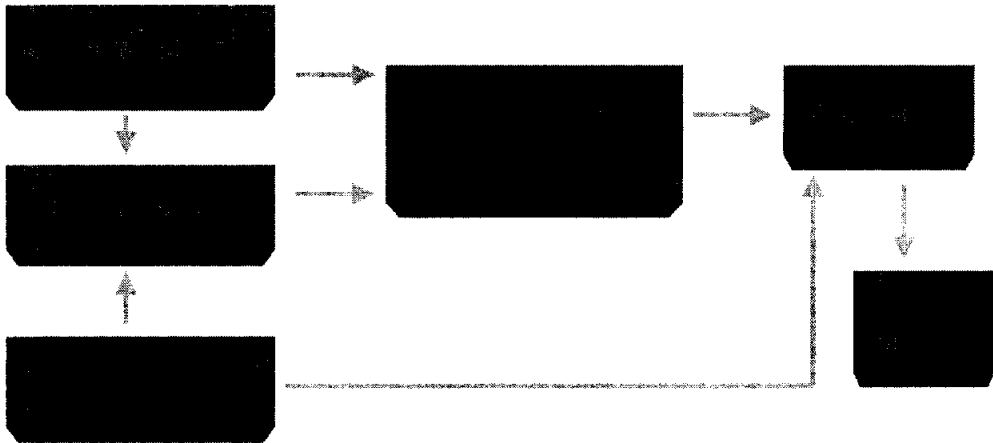


Fig. 6.3 Computation procedure of the damping force

Table 6.1 Input variables used in simulation with no magnetic field applied & 10 CPM excitation

VARIABLE	COMMENT	VALUE
D_p	diameter of piston [mm]	40
D_r	diameter of piston rod [mm]	12.5
c	mean circumference of dmaper's annualr flow path[mm]	pi*(15.5+ 14.9)
d	orifice gap width [mm]	0.6
L	orifice length [mm]	38
K	consistency coefficient flow behavior index [ $MPa \cdot s^n$ ]	6.0328*1E-6
n	flow behavior index	0.4966
H	magnetic field strength [KAmp/m]	0
Cyl_tub_len	cylinder tube length [mm]	220
P_gi	initial gas pressure [MPa]	3
Amp	amplitude of excitation [mm]	50
Cpm	cycle/min	10
fric1	rebound friction force [N]	180
fric2	compression friction force [N]	320
[ a , b ]	initial interval containing zero	[-0.1, 30]
tol	allowable tolerance in computed zero	10E-13
max	maximum number of iterations	100

## 6.2 MR 댐퍼 실험

본 연구에서 제작된 MR 댐퍼의 성능을 고찰하기 위해 기본 감쇠력 실험을 수행하였다. Fig. 6.4는 설계에 따라 제작된 쇼바조립체이다. Fig. 6.5는 제작된 댐퍼 조립체와 쇼바 조립체의 설계 단면도이다. Fig. 6.5의 (a)는 댐퍼의 조립체이며, 상부에 피스톤 로드가 상하로 왕복하여 발생하는 체적의 보상을 위해서 가스 챔버가 있고, 가스 챔버와 MR 유체를 구분하는 프리 피스톤, 피스톤 밸브 조립체가 있다. 피스톤 조립체에 피스톤 로드가 조립되어 있다. 중공 로드는 중공이므로 피스톤 밸브 내에 코일과 결선할 수 있다. 중공 로드는 하부에 로드 가이드가 동심도를 유지하도록 구성되어 있다. Fig. 6.5의 (b)는 댐퍼 조립체를 포함하는 쇼바 조립체이다. 쇼바 조립체는 차량에 장착할 수 있도록 구성된 스트럿 형태이다. 차량에 장착될 때 상부는 직접 볼트로 조립되지만, 하부는 피스톤 로드와 직접 연결되지 않고 스트럿 하우징에 삽입되어 스트럿-하우징 측면에 2개의 볼트로 조립할 수 있도록 되어있다. 스트럿 하우징의 비스듬한 컵 모양의 받침대는 현가용 스프링을 고정시키기 위한 부품이다.

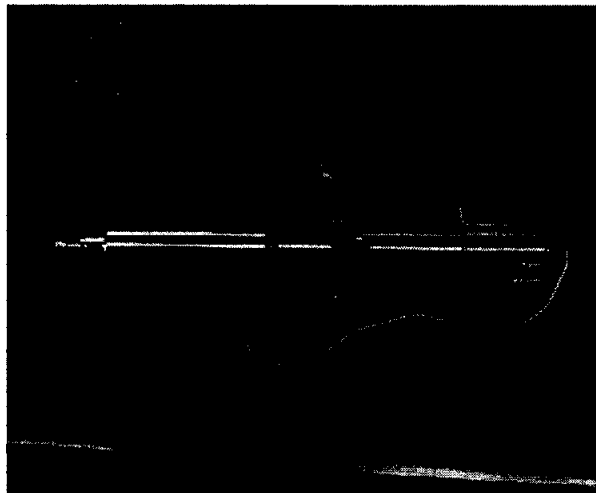
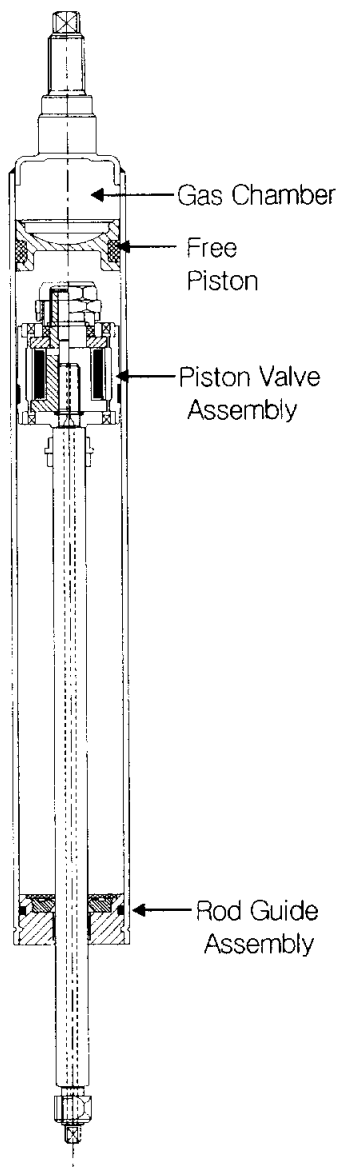
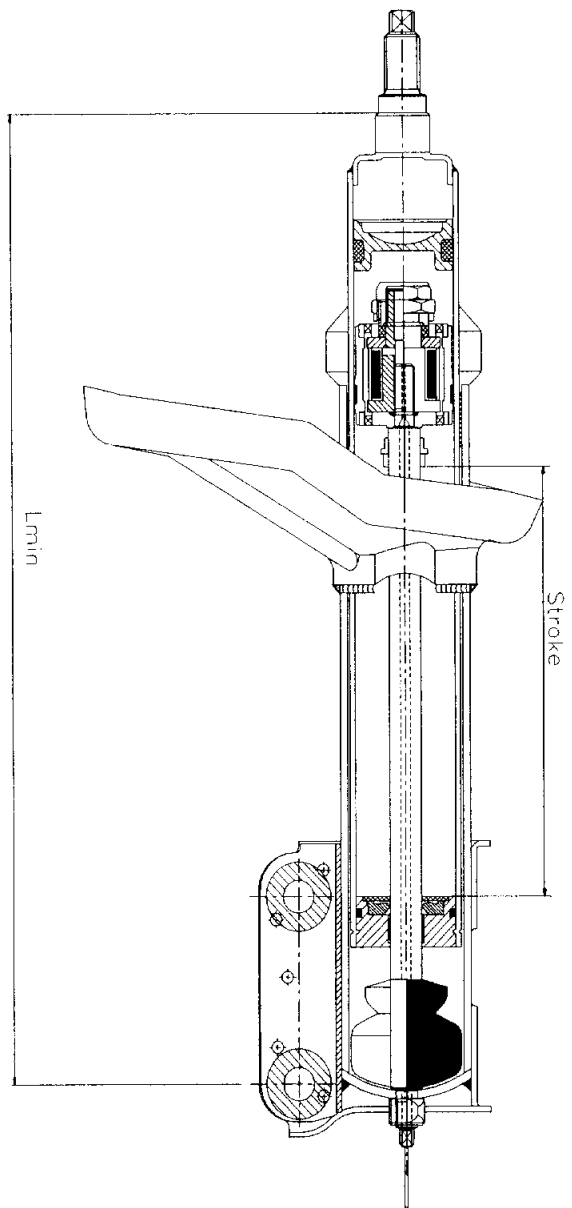


Fig. 6.4 Photograph of the MR damper



(a) Cross section of damper assembly



(b) Cross section of shock absorber assembly

Fig. 6.5 Cross section of damper & shock absorber assembly

### 6.2.1 실험 장치

제작된 MR 댐퍼의 기본 감쇠력 성능 실험을 수행하기 위한 MTS사의 유압 가진기를 Fig. 6.6에 나타내었다. 유압 가진기를 활용하면 다양한 입력 신호의 형태와 주파수로 변위 가진을 할 수 있다.

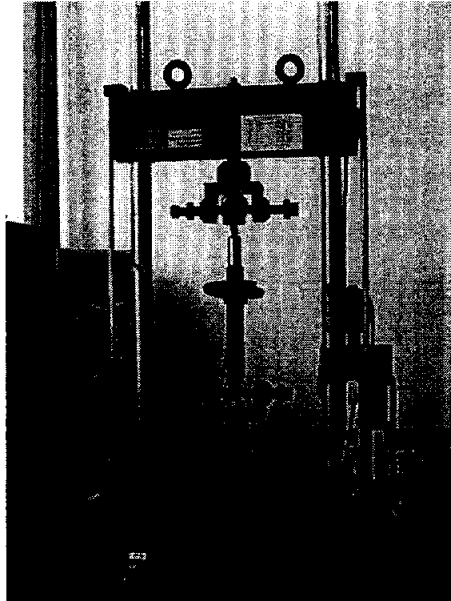


Fig. 6.6 Test equipment for the MR damper

유압 가진기로 MR 댐퍼에 가진을 주면, 가진기의 하부에 장착된 LVDT로 가진 변위를 측정할 수 있다. 댐퍼의 끝단에는 로드셀을 장착하여 속도와 인가 전류의 변화에 따른 MR 댐퍼의 감쇠력을 측정한다. Fig. 6.7은 유압 가진기의 제어 장치와 데이터를 처리하는 컴퓨터이다. Fig. 6.8은 MR 댐퍼에 인가하는 전류를 제어하기 위해 사용한 LORD사의 전류 변환 장치이다.

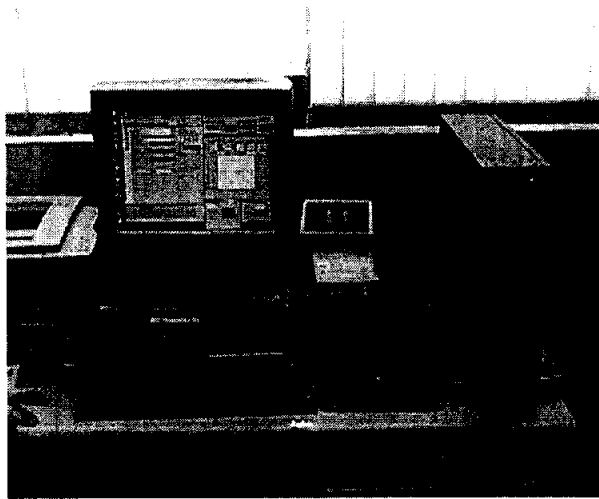


Fig. 6.7 Control box & data acquisition equipment



Fig. 6.8 Currnt controller

### 6.1.2 실험 방법

기본 감쇠력 성능 시험은 사인파 변위로 유압 가진기를 가진하면서 수행하였다. 사인파의 변위 입력은 진폭이 50mm로 고정되어 있으며, 10 CPM (Cycle/Min), 25 CPM, 50 CPM 단계로 가진을 변화시켰으며, 입력 전류는 0A에서부터 1.8A 까지 증가시켰다. CPM은 식 (6-10), 식 (6-11)과 같이 각각 변위와 속도로 환산할 수 있다. Fig. 6.9에 10 CPM으로 가진할 때의 변위 형상을, Fig. 6.10에 10 CPM으로 가진할 때의 속도 형상을 나타내었다.

$$Displacement = Amp \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{CPM}{60} \cdot t\right) \quad (6-10)$$

$$Velocity = \left(2 \cdot \pi \cdot \frac{CPM}{60}\right) \cdot Amp \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{CPM}{60} \cdot t\right) \quad (6-11)$$

가스 챔버의 가스압은 피스톤 로드와 최대 신장 상태에서 주입된 압력을 측정하였고, 성능 시험 수행시 온도의 영향을 받지 않게 위해 MR 댐퍼내의 MR 유체의 온도가 상온 20°C~30°C를 유지하도록 하였으며, MR 댐퍼가 인장 상태일 경우의 감쇠력을 “+”, 압축 상태일 경우의 감쇠력을 “-”로 정의하였다.

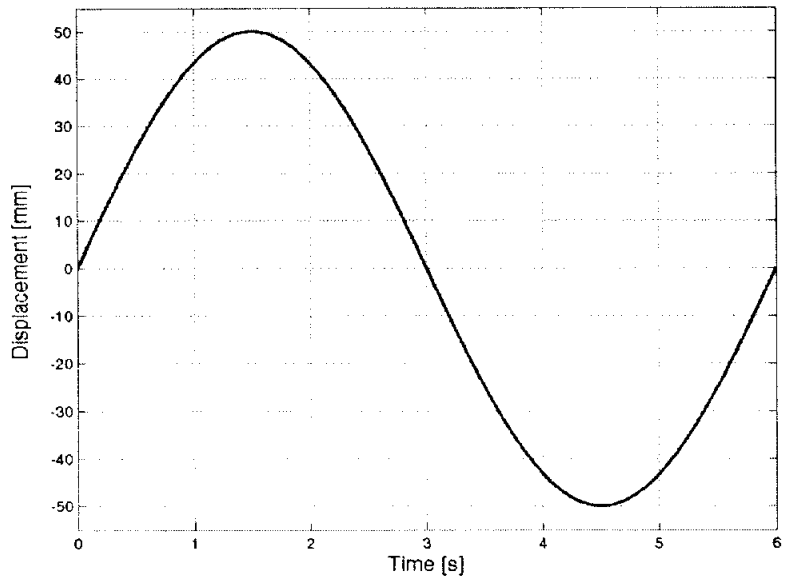


Fig. 6.9 Displacement profile of 10 CPM excitation

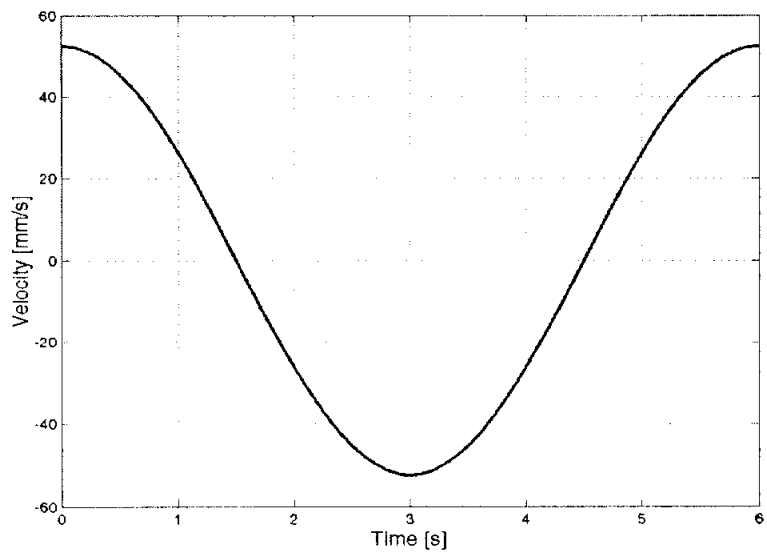


Fig. 6.10 Velocity profile of 10 CPM excitation

### 6.3 시뮬레이션 검증

Fig. 6.11, Fig. 6.12은 전류를 가하지 않았을 때, 실험을 통해 얻은 MR 댐퍼의 감쇠력과 시뮬레이션을 통해 예측되어진 감쇠력을 각각 force vs displacement, force vs velocity 로 나타낸 선도이다. 점선으로 표현된 것이 10 CPM의 속도로 가진하였을 때 실험을 통해서 구해진 속도에 따른 감쇠력이고, 실선은 시뮬레이션을 통해 예측되어진 감쇠력이다. 실험 결과와 시뮬레이션 예측 결과가 유사함을 알 수 있다.

Fig. 6.13, Fig. 6.14는 전류를 가하지 않았을 때, 실험을 통해 얻은 MR 댐퍼의 감쇠력과 시뮬레이션을 통해 예측되어진 감쇠력을 각각 force vs displacement, force vs velocity 로 나타낸 선도이다. 점선으로 표현된 것이 25 CPM의 속도로 가진하였을 때 실험을 통해서 구해진 속도에 따른 감쇠력이고, 실선은 시뮬레이션을 통해 예측되어진 감쇠력이다. 실험 결과와 시뮬레이션 예측 결과가 유사함을 알 수 있다.

Fig. 6.15, Fig. 6.16는 전류를 가하지 않았을 때, 실험을 통해 얻은 MR 댐퍼의 감쇠력과 시뮬레이션을 통해 예측되어진 감쇠력을 각각 force vs displacement, force vs velocity 로 나타낸 선도이다. 점선으로 표현된 것이 50 CPM의 속도로 가진하였을 때 실험을 통해서 구해진 속도에 따른 감쇠력이고, 실선은 시뮬레이션을 통해 예측되어진 감쇠력이다. 실험 결과와 시뮬레이션의 감쇠력 성향을 비슷하나 시뮬레이션을 통해서 최대 감쇠력을 나타내지 못함을 알 수 있다.

Fig. 6.11 ~ Fig. 6.16을 통해서 이상화된 시뮬레이션은 댐퍼의 실제 감쇠력의 성향을 추종할 수는 있으나 정확히 기술하지 못함을 알 수 있다. 따라서 실제 댐퍼의 유동을 나타낼 수 있는 송출 계수, 손실 계수, 체적 탄성 계수, MR 유체의 cavitation, 열로 인한 효과 등을 충분히 고려하는 것이 필요하다.<sup>45),46),47),48)</sup>

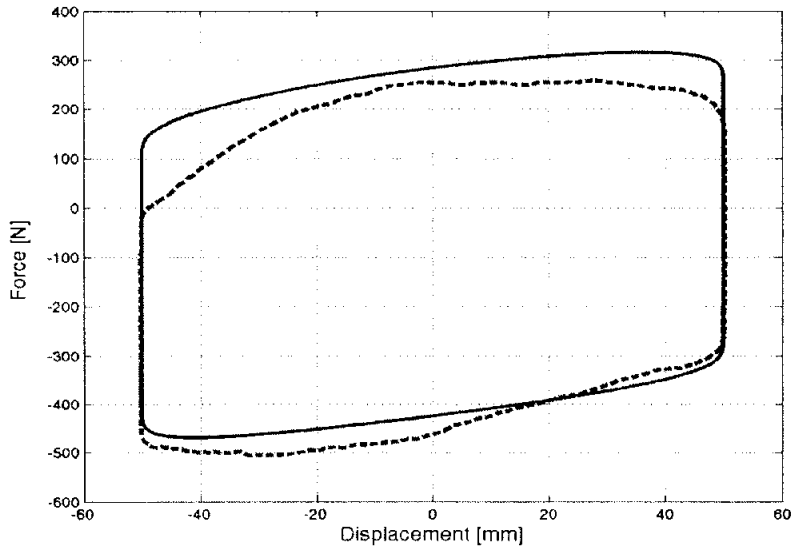


Fig. 6.11 Force vs displacement diagram (10 CPM)

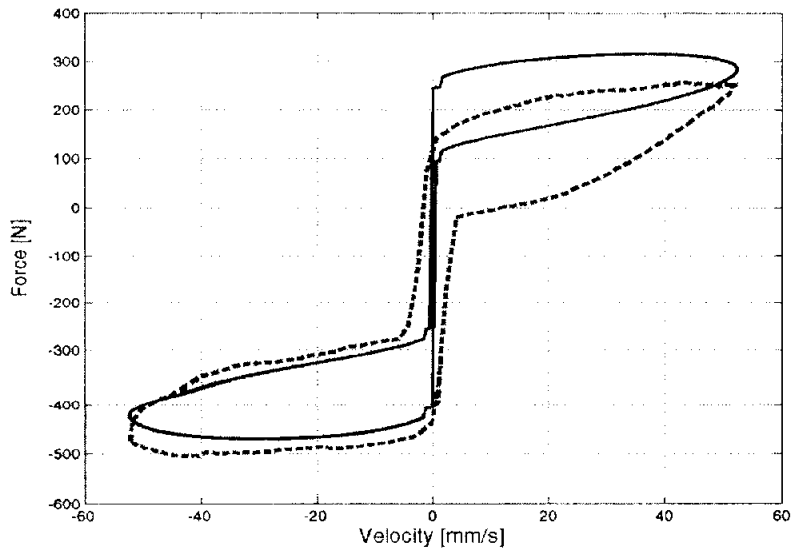


Fig. 6.12 Force vs velocity hysteresis loop (10 CPM)

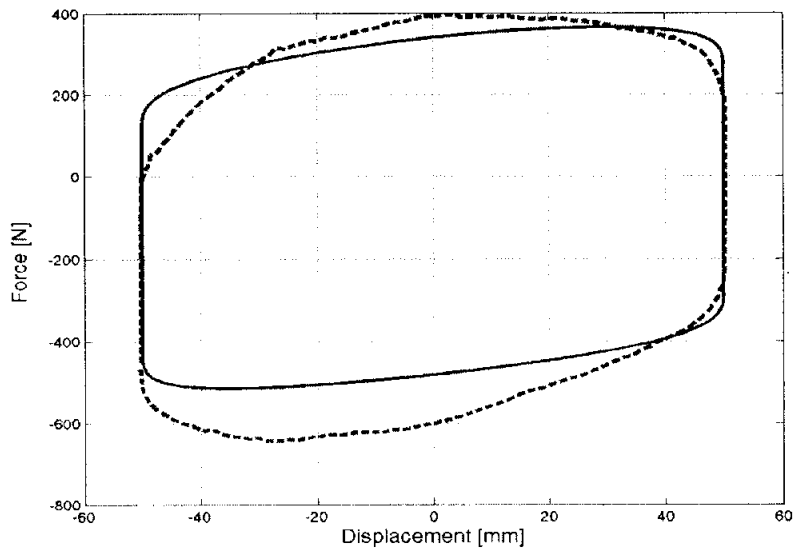


Fig. 6.13 Force vs displacement diagram (25 CPM)

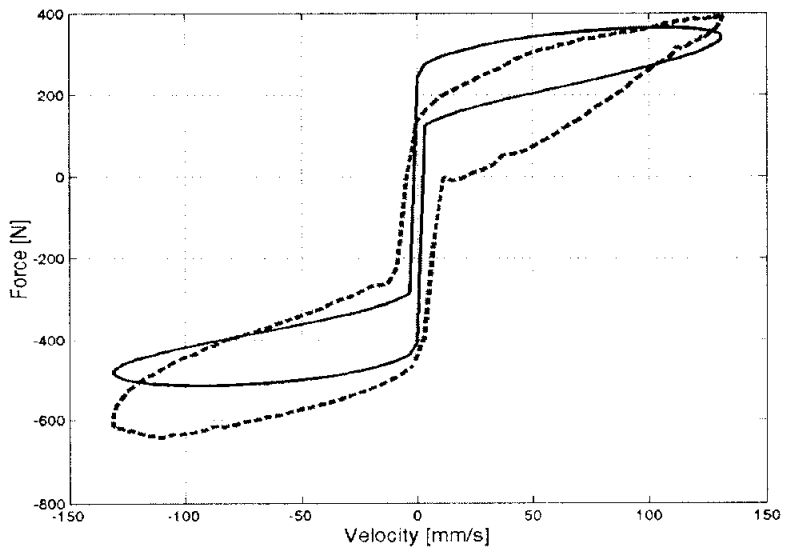


Fig. 6.14 Force vs velocity hysteresis loop (25 CPM)

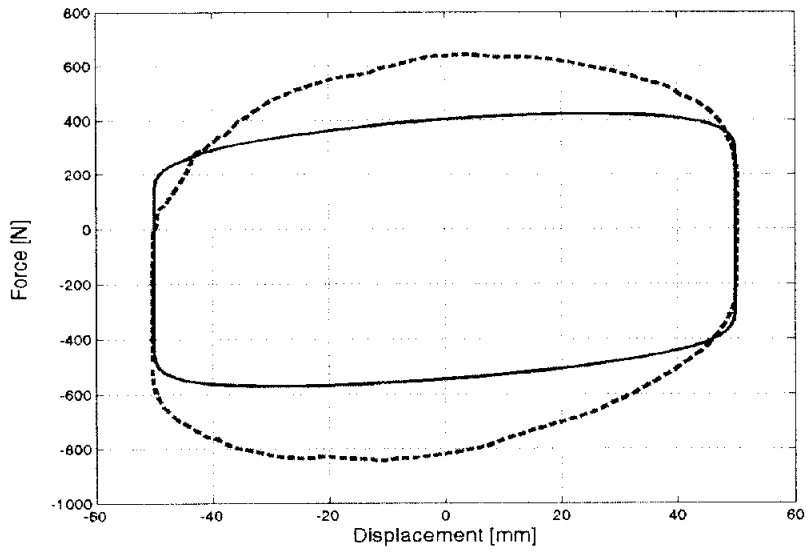


Fig. 6.15 Force vs displacement diagram (50 CPM)

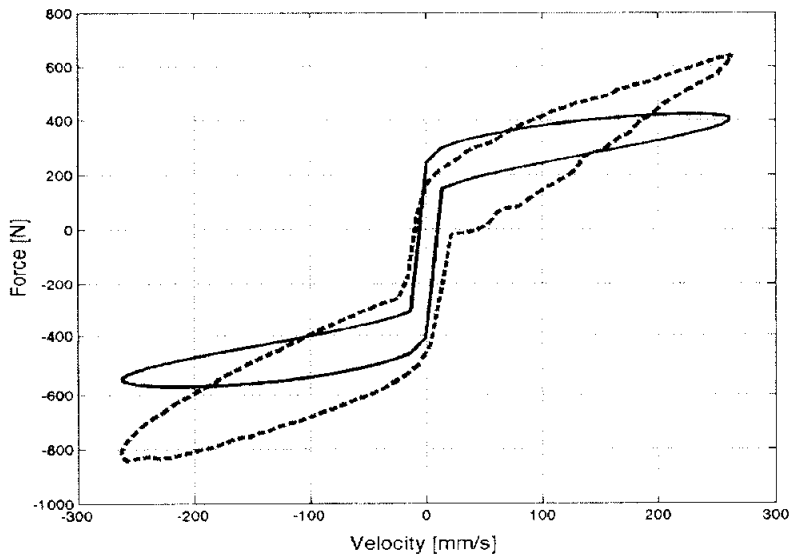


Fig. 6.16 Force vs velocity hysteresis loop (50 CPM)

Fig. 6.17, Fig. 6.18은 1A의 전류를 인가하였을 때, 실험을 통해 얻은 MR 댐퍼의 감쇠력과 시뮬레이션을 통해 예측되어진 감쇠력을 각각 force vs displacement, force vs velocity 로 나타낸 선도이다. 점선으로 표현된 것이 10 CPM의 속도로 가진하였을 때 실험을 통해서 구해진 속도에 따른 감쇠력이고, 실선은 시뮬레이션을 통해 예측되어진 감쇠력이다. 실험 결과와 시뮬레이션 예측 결과가 유사함을 알 수 있으나 force vs velocity 선도에서 0~20 mm/s 사이의 hysteresis 현상을 정확히 표현하지 못함을 알 수 있다.

Fig. 6.19, Fig. 6.20은 전류를 가하지 않았을 때, 실험을 통해 얻은 MR 댐퍼의 감쇠력과 시뮬레이션을 통해 예측되어진 감쇠력을 각각 force vs displacement, force vs velocity 로 나타낸 선도이다. 점선으로 표현된 것이 25 CPM의 속도로 가진하였을 때 실험을 통해서 구해진 속도에 따른 감쇠력이고, 실선은 시뮬레이션을 통해 예측되어진 감쇠력이다. 실험 결과와 시뮬레이션 예측 결과가 유사함을 알 수 있으나 force vs velocity 선도에서 0~20 mm/s 사이의 Hysteresis 현상을 정확히 표현하지 못함을 알 수 있다.

Fig. 6.21, Fig. 6.22은 전류를 가하지 않았을 때, 실험을 통해 얻은 MR 댐퍼의 감쇠력과 시뮬레이션을 통해 예측되어진 감쇠력을 각각 force vs displacement, force vs velocity 로 나타낸 선도이다. 점선으로 표현된 것이 50 CPM의 속도로 가진하였을 때 실험을 통해서 구해진 속도에 따른 감쇠력이고, 실선은 시뮬레이션을 통해 예측되어진 감쇠력이다. 실험 결과와 시뮬레이션 예측 결과가 유사함을 알 수 있으나 force vs velocity 선도에서 0~20 mm/s 사이의 Hysteresis 현상을 정확히 표현하지 못함을 알 수 있다.

Fig. 6.17 ~ Fig. 6.22의 시뮬레이션에 사용된 파라미터는  $K = 44.0327 \cdot 10^{-6}$  ,  $L = 8$  mm 이다. 자기장이 인가되었을 경우, 오리피스에 의한 압력 손실은 유체 점성에 의한 저항보다 MR 유체의 항복 응력 변화에 기인한다고 가정할 수 있기 때문이다. K는 추정된 값이므로 실험을 통한 보다 정확한 값의 획득이 필요하며, 보다 정확히 MR 댐퍼의 감쇠력을 예측하기 위해서 많은 요소를 고려해야 함을 알 수 있다.

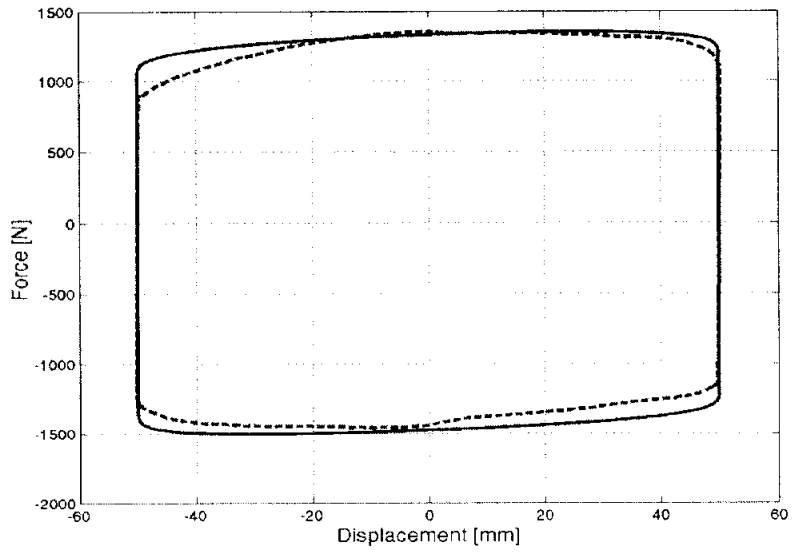


Fig. 6.17 Force vs displacement diagram (10 CPM, 1A)

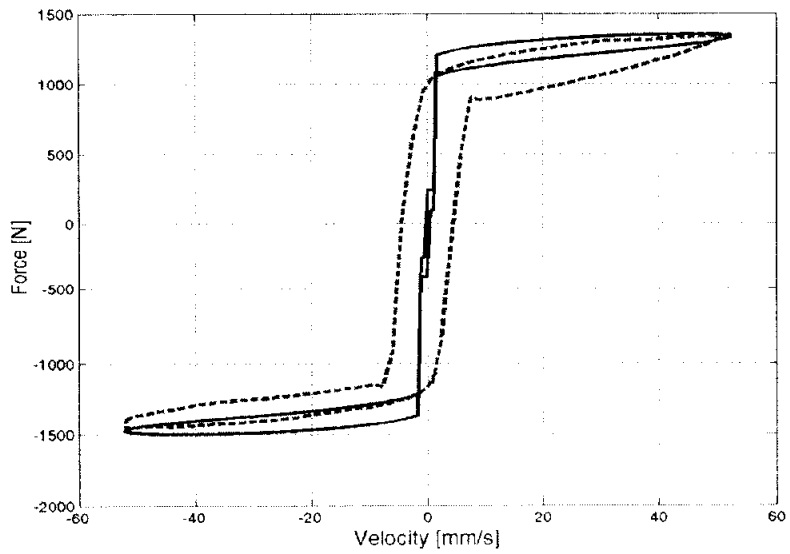


Fig. 6.18 Force vs velocity hysteresis loop (10 CPM,1A)

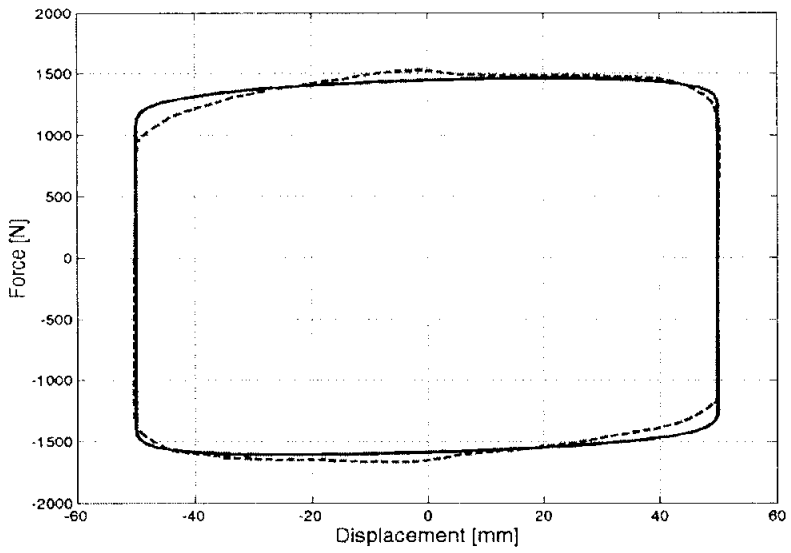


Fig. 6.19 Force vs displacement diagram (25 CPM, 1A)

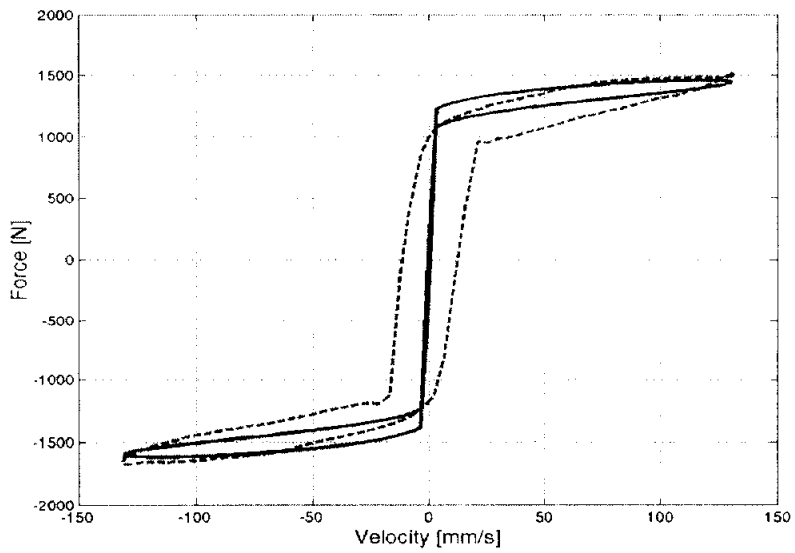


Fig. 6.20 Force vs velocity hysteresis loop (25 CPM,1A)

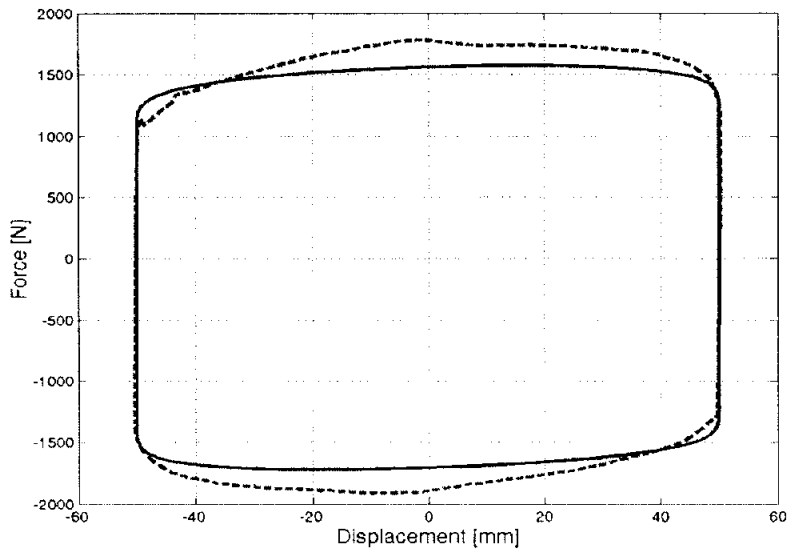


Fig. 6.21 Force vs displacement diagram (50 CPM, 1A)

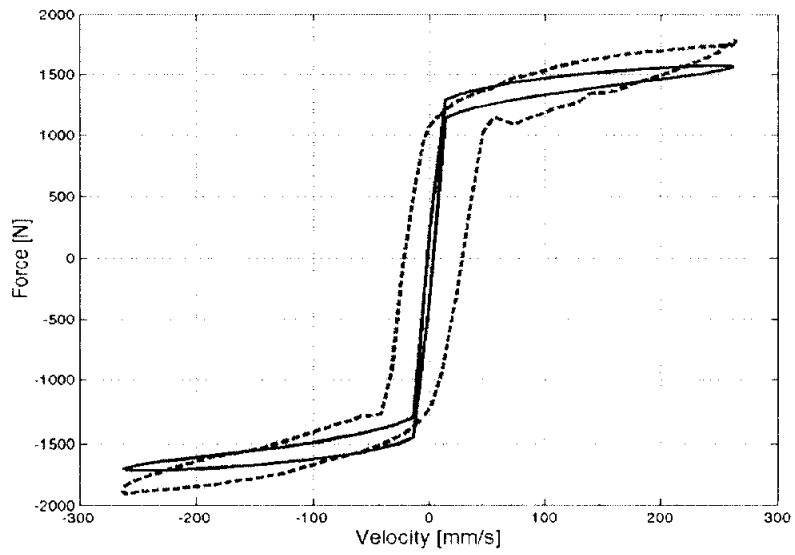


Fig. 6.22 Force vs velocity hysteresis loop (50 CPM, 1A)

## 제 7 장 결론

본 연구의 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. MR 유체는 외부의 자극에 의해 유동학적 특성이 변화하는 지능형 유체이다. 본 논문에서는 MR 유체의 기본적인 물성을 이해하고 그 특성을 살펴보았으며, Lord 사가 제공하는 유체 Table을 통해 사용 목적에 맞는 MR 유체를 선택할 수 있다. 반응동형 댐퍼 제작에 사용될 수 있는 유체는 초기 점성이 낮으며, 넓은 작동 온도를 가지고 있고, 높은 자기포화 값은 가져야하며, 열에 의한 영향이 적어야 한다. 또한 내환경성이 커야하며, 댐퍼 제작에 사용될 수 있는 타재료와의 적합성이 고려되어야 한다.

2. MR 유체가 가지는 두 가지의 큰 특성은 전단 희박(shear thinning)현상과 자기장에 따른 항복 응력의 변화 현상이다. 이에 허셀-버클리(Herschel-Bulkley)모델을 이용하였다. 허셀-버클리 모델의 세 가지 파라미터 중  $K$ 와  $n$ 은 전단 희박 현상을 기술하는 데 사용되며,  $\tau_y$ 는 인가된 자기장에 의존하는 항복 응력을 나타낸다. 따라서 허셀-버클리 모델은 MR 유체의 특성을 보다 정확히 기술할 수 있음을 알 수 있다. 허셀-버클리 모델의 세 파라미터는 MR 유체의 거동 특성과 가변 감쇠력의 크기와 범위를 나타내므로, 정확한 파라미터 값의 획득이 중요함을 알 수 있다.

3. 주어진 허셀-버클리 모델을 이용하여 MR 댐퍼내의 오리피스에 대해 평행 평판 유동 해석과 환형 유로 유동 해석을 하였다. 유동 해석을 통하여 오리피스에서 발생하는 압력 손실을 구할 수 있다.

4. MR 유체의 항복 응력은 자기장의 세기에 의존한다. 자기장의 세기는 자기 회로의 형상과 자기 회로를 구성하고 있는 재료와 자기장 내에 존재하는 물질의 자기 물성치에 영향을 받게 된다. 본 연구에서 제안된 MR 댐퍼에서 자기 회로를 구성하는 재료와 MR 유체는 투자율이 일정하지 않는 비선형 자기 특성을 가지므로, 인가된 전류에 대한 자기장 해석이 필요하다. 자기 해석은 상용 유한 요소 해석 프로그램인 MAXWELL을 이용하였으며, 2차원 해석을 하였다. 해석을 통해 제안된 자기 회로의 타당성을 검증할 수 있으며, 인가된

전류에 대해 형성되는 자기장 세기를 확인할 수 있다. 따라서 자기장 세기에 의존하는 MR 유체의 항복 응력을 구할 수 있다.

5. 본 연구에서는 설계 요구 조건을 고려한 모노튜브(mono-tube)댐퍼를 제작하였으며, 모노튜브 댐퍼의 감쇠력을 예측하기 위한 댐퍼의 수학적 모델을 제시하고 감쇠력 예측 시뮬레이션을 구성하였다. 본 연구에서 제안된 감쇠력 예측 시뮬레이션은 MR 유체를 비압축성 유체로 가정하였고, MR 댐퍼내에 열과 마찰등에 의한 손실이 없으며, 정상 상태의 이상적인 유동으로 가정하였다. 제안된 예측 시뮬레이션은 실험을 통하여 비교·검증하였으며, 그 경향이 유사함을 알 수 있다. 보다 정확히 MR 댐퍼의 감쇠력을 예측하기 위해 실제 댐퍼내의 유동에서 발생할 수 있는 여러 요소들을 고려해야 함을 알 수 있다.

## 참고 문헌

1. Dyke, S.J., Spencer Jr., B.F., Jr., Sain, M.K., and Carlson, J.D., " Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction," Smart Mat. and Struc., 5:565-575, 1996
2. Dyke, S.J., Spencer Jr., B.F., Jr., Sain, M.K., and Carlson, J.D., " Seismic response reduction using magnetorheological dampers," Proc. IFAC World Cong., vol. L, Int. Fed. of Automatic Control, pp. 145-150, 1996
3. Dyke, S.J., Spencer Jr., B.F., Jr., Sain, M.K., and Carlson, J.D., " An experimental study of MR dampers for seismic protection," Smart. Mat. and Struct., 5:693-703 , 1998
4. Jasen, L.M., and Dyke, S.J., "Semiactive control strategies for MR dampers: comparative study," J. Engrg, Mech., ASCE, 126(8):795-803, 2000
5. Spencer Jr., B.F., Dyke, S.J., and Sain, M.K., "Magnetorheological dampers: a new approach to seismic protection of structures," Proc. Conf. on Decision and Control, pp. 676-681, 1996
6. Yi, F., and Dyke, S.J., "Structural control systems: performance assessment," Proc. of American Control Conf., Chicago, IL., 2000
7. Shawn P. Kelso and Faramarz Gordaninejad, "Magneto-Rheological Fluid shock Absorbers for Off -Highway, High-Payload Vehicles, " SPIE Vol. 3672, 1999
8. Shawn P. Kelso and Faramarz Gordaninejad, " Magneto-Rheological fluid shock absorber for HMMWV," Progress in Biomedical Optics and Imaging Medical Imaging 2000 Physiology and Function from Multidimensional Images , V.3989 , 2000 -03 -06
9. Evert O. Ericksen and Faramarz Gordaninejad, "A Magneto-Rheological fluid shock absorber for suspension of an Off-Road Motorcycle : a theoretical study," Proceedings of SPIE Smart Structures and Materials 2000

Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies  
,V.3991 ,2000 -03 -07

10. Jason E. Lindler , Glen A. Dimock and Norman M. Wereley , " Design of a Magnetorheological Automotive Shock Absorber ," Proceeding of SPIE Vol. 3985, 2000

11. 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

12. Christopher A. Pare, " Experimental Evaluation of Semiactive Magneto-Rheological Suspensions for Passenger Vehicles ," MS thesis, Blacksburg, Virginia , 1998

13. Seung-Bok Choi, Byoung-Kyu Lee, Moo-Ho Nam, Chae-Cheon Cheong , " Vibration control of a MR seat damper for commercial vehicles," Proceeding of SPIE Vol.3985 , 2000

14. Brian A. Reichert, "Application of Magnetorheological Dampers for Vehicle Seat Suspensions ," MS thesis, Blacksburg, Virginia , 1997

15. <http://www.rheonetic.com> .

16. <http://www.delphiauto.com>

17. Rebecca A. Snyder and Norman M.Wereley, " Characterization of a Magnetorheological Fluid Damper Using a Quasi-Steady Model ," SPIE Vol.3668, March,1999

18. Glen A. Dimock, Jason E. Lindler and Norman M.Wereley, " Bingham Biplastic Analysis of Shear Thinning and Thickening in Magnetorheological Damper ," Proceeding of SPIE Vol. 3985, 2000

19. Li Pang, Gopalakrishna M. Kamath, Norman M. Wereley, " Analysis and Testing of A Linear Stroke Magnetorheological Damper ," AIAA-98-2040,1998

20. S.-K. LEE and S.-B.CHOI, " A Hysteresis Model for the Field-Dependent Damping Force of a Magnetorheologica Damper, " Journal of Sound and Vibration , 245(2), pp. 375-383, 2001

21. 정정교, 최현, 김두훈, 이상조, " MR 댐퍼 비선형 수학적 모델의 파라미터 추정에 관한 연구, " 한국소음진동공학회, 추계학술대회논문집, pp.902-907,1999
22. B.F.Spencer Jr.,S.J.Dyke, M.K.Sain, and J.D.Carlson, " PHENOMENOLOGICAL MODEL FOR MAGNETORHEOLOGICAL DAMPERS ," Journal of Engineering Mechanics , March, 1997
23. O. Ashour and C. Rogers, " Magnetorheological Fluids : Materials, Characterization, and Devices, " Journal of Intelligent Materials Systems and Structures, Vol. 7 , pp. 123-130 , 1996
24. Mark R. Jolly, Jonathan W. Bender and J. David Carlson , " Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids , " Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 10, January 1999
25. J.M. Ginder and L.C. Davis, " Shear stresses in magnetorheological fluid : Role of magnetic saturation," Appl. Phys. Lett. 65(26), 26 December 1994
26. Anh Dang, Liling Ooi, Janine Fales, and Pieter Stroeve, " Yield Stress Measurements of Magnetorheological Fluids in Tubes," Ind. Eng. Chem. Res. 2000, 39, 2269-2274
27. Norman M Wereley and Li Pang, " Nondimensional analysis of semi-active electrorheological and magnetorheological dampers using approximate parallel plate models ," Journal of Smart Materials and Structures, Vol. 7, pp. 732-743 , 1998
28. G.Yang, B. F. Spencer, Jr., J. D. Carlson and M. K. Sain, " Large-scale MR fluid dampers : modeling , and dynamic performance considerations " , Journal of Engineering Structures , Vol. 24, pp. 309-323 , 2002
29. Wang, X. and Gordaninehjad, F. , " Flow Analysis of Field-Controllable, Electro- And Magneto-Rheological Fluids using Herschel-Bulkley Model, " Journal of Intelligent Materials, Systems And Structures, Vol. 10, No. 8 ,

pp. 601 - 608 , 1999

30. 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

31. 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

32. 이덕영, 황우석, " Herschel-Bulkley 모델에 의한 전기 및 자기장 유체 댐퍼의 준안정 상태 댐핑력 해석 ," 한국소음진동공학회10주년기념논문집, pp. 1298 - 1302 ,

33. 이덕영, 황우석 , " Herschel-Bulkley 모델을 이용한 MR 댐퍼 승용차의 제어 성능 고찰 ," 한국소음진동공학회 2002년도 춘계학술대회논문집, pp. 323 - 328, 2001

34. G. Yang , " Large-Scale Magnetorheological Fluid Damper for Vibration Mitigation: Modeling, Testing and Control, " Ph. D dissertation , University of Notre Dame , 2001

35. KEITH D. WEISS, J. DAVID CARLSON AND DONALD A.NIXON, " Viscoelastic Properties of Magneto- and Electro-Rheological Fluid, " Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 5 , November, 1994

36. H. Martin Laun, Claudius Kormann, Norbert Willenbacher , " Rheometry on magnetorheological(MR) fluids ," Rheol Acta 35 : pp. 417-432 ,1996

37. James A. Klotz, William E. Brigham, " To Determine Herschel-Bulkley Coefficients , " JPT , November, 1998

38. James A. Klotz, William E. Brigham, " Hole-Cleaning Model : What Does the Fluid-Flow Index Have To Do With It? ," JPT , November,1055,1996

39. Richard A. Chilton , Richard Stainsby , " Pressure Loss Equations For Laminar and Turbulent Non-Newtonian Pipe Flow , " Journal of Hydraulic Engineering , May , 1998

40. 정병보, " 자기 유변 유체를 이용한 속도 감응 조향 시스템용 감쇠기의 개발 " , 학위논문, 한국과학기술원, 1999

41. 이우섭, 김태균, 허남건, 전도영, “ 자기장 및 유동 해석을 이용한 자기유변 클러치의 성능 예측 및 검증 ” , 대한기계학회논문집 A권, 제 24권 제8호, pp. 2143 - 2150 , 2000
42. Walid H.El-Aouar , " Finite Element Analysis Based Modeling of Magneto Rheological Dampers," M.S.Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University,2002
43. <http://www.ansoft.com>
44. MAXWELL 2D Field simulator, " Technical Consideration," Release Notes (Version 6.3)
45. KWANGJIN LEE , " Numerical Modelling for the Hydraulic Performance Prediction of Automotive Monotube Damper ," Vehicle System Dynamics , Vol . 28 , pp.25-39 , 1997
46. A.L.Audenino, G.Belingardi, " Modelling the dynamic behavior of a motorcycle damper ," Technical Paper , Journal of Automobile Engineering, 1995
47. Wylie, E.B., Suo,L.,Bruckman,R.,and Kerastas, M.,"Numerical Modeling of A Dampers with a Semi-Active Valve," ASME,DSC - vol. 13,1989, pp. 291-303
48. 박재우, “자동차용 충격흡수기의 성능 예측을 위한 설계 자동화” , 공학 박사 학위 논문, 부산대학교, 1998
49. Irving H. Shames , MECHANICS OF FLUIDS, Third Edition, 1992
50. Kenneth R. Demarest, Engineering Electromagnetics, International Edition, 1998
51. Steven C. Chapra, Raymond P. Canale, Numerical Methods for Engineers, Third Edition, 1998
52. Laurene V. Fausett, Applied Numerical Analysis Using MATLAB , International Edition, 1999

## 부 록

### A. 시뮬레이션 프로그램

#### 1. 오리피스 내 압력 손실을 정의하는 함수

```
% MATLAB code start
function Find_Y=orifice1(delta_P)

global VELO

Dp=40;
Dr=12.5;
Ap=(pi*Dp^ 2)/4;
Ar=(pi*Dr^ 2)/4;
%Q=(Ap-Ar)*Velocity;
Q=(Ap-Ar)*VELO;

K= 6.03278498545234*1e-6;
n=0.496601755893605;

aa=1/(n+ 1);
bb=n/(n+ 1);

d=0.6;
L=8;
c=pi*(15.5+ 14.9);
```

```
H=0;
Yield_stress=(-1.36129+ (0.35928*H) + (-8.23391*1e-4 * H^ 2)+
( 4.62969*1e-7*H^ 3))*1e-3;
```

```
ZQ=(2*Q)/(c*d^ 2);
ZN=(2*n+ 1)/n;
Z=(2*L*Yield_stress)/(delta_P*h);
First=(ZQ*ZN)^ n*((2*K)/h);
Find_Y=First*(1/(1-Z))*(1/(1-aa*Z-bb*Z^ 2))^ n-(delta_P/L);
```

## 2. 오리피스의 압력 손실을 구하기 위한 Bisection 법

```
% MATLAB code start
```

```
function [x, y, k] = Bisect(fun, a, b, tol, max)
global VELO Flag
%           Input and out variables
%   fun      string containing name of function
%   [a, b]   interval containing zero
%   tol      allowable tolerance in computed zero
%   max      maximum number of iterations
%   x        vector of approximations to zero
%   y        vector of function values, fun(x)

a(1) = a;
b(1) = b;
```

```

ya(1) = feval(fun, a(1));
yb(1) = feval(fun, b(1));

if ya(1) * yb(1) > 0
    error('Function has same sign at end points')
end

for i = 1 : max
    x(i) = (a(i) + b(i))/2;
    y(i) = feval(fun, x(i));

    if ((x(i)-a(i)) < tol)
        disp('Bisection method has converged'); break;
    end

    if y(i) == 0.0
        disp('exact zero found'); break;
    elseif y(i)*ya(i) < 0
        a(i+1) = a(i);          ya(i+1) = ya(i);
        b(i+1) = x(i);          yb(i+1) = y(i);
    else
        a(i+1) = x(i);          ya(i+1) = y(i);
        b(i+1) = b(i);          yb(i+1) = yb(i);
    end;

    iter = i;
end

if (iter >= max)
    disp('zero not found to desired tolerance');
end

```

```

end

if (Flag==1)
    x=-x;
end

n = length(x);
k = 1:n;
out = [k' a(1:n)' b(1:n)' x' y'];

```

### 3. 감쇠력 예측 프로그램

```
% MATLAB code start
```

```

close all
clear
clc
format long g

global VELO Flag

load New_Exp_00A_10.txt

Flag=0;
Amp = 50 ; % Amplitude [mm]
Cpm = 10 ; % CPM [ cycle /min ]
Cps = Cpm/60 ; % frequency [ 1/s ]
interval = 1/Cps;

t=[0:0.01:interval];

```

```

Disp=-Amp*cos(2*pi*Cps*t);
Velocity=(2*pi*Cps)*Amp*sin(2*pi*Cps*t);

Cyl_tub_len = 220 ;           % cylinder tube length [mm]
D_r = 12.5 ;                 % diameter of rod [mm]
D_p = 40 ;                   % diameter of piston [mm]
P_gi = 30*1e-1 ;           % initial gas pressure [MPa]
V_gi = ( pi*D_p^ 2)/4 * 46; % initial gas chamber volume [mm^ 3]
A_r = ( pi*D_r^ 2)/4;      % area of rod [mm^ 2]
A_p = ( pi*D_p^ 2 )/4;    % area of piston [mm^ 2]

V_go = V_gi - A_r*Cyl_tub_len/2 ; % gas chamber volume in
                                     mid position [mm^ 3]
P_go = (P_gi*(V_gi^ 1.4))/(V_go^ 1.4) ; % gas pressure in mid
                                     position [N]

set_zero= P_go*(A_p)- (P_go*(A_p-A_r)) ; % set zero Force

fric1 = 180;                 % rebound friction force
fric2 = 320;                 % compression friction force

fid=fopen('Simu_10A_50.txt','w')

for i=1:length(Velocity)

    if (Velocity(i)>0)
        VELO=Velocity(i);
        Flag=0;
    else

```

```

        VELO=abs(Velocity(i));
        Flag=1;
end

a=-0.1;
b=30;
tol=10e-13;
max=100;

[x, y, k] = Bisect('orifice1', a, b, tol, max);

delta_p(i)=x(end);

V_g(i) = V_go + A_r*Disp(i);
P_g(i) = (P_go*V_go)/V_g(i);

pr(i) = delta_p(i) + P_g(i);

if (P_g(i) < pr(i))
    DF(i) = pr(i)*(A_p-A_r) - P_g(i)*A_p + fric1;
else
    DF(i) = pr(i)*(A_p-A_r) - P_g(i)*A_p - fric2;
end

data=[Disp(i) Velocity(i) delta_p(i)];
fprintf(fid,'%d      %d      %d\n',data);

end
fclose(fid)

```

```
ForceData=[t' DF'];
```

```
save DampingForce_00A_10.txt -ascii ForceData
```

```
figure(1)
```

```
plot (Disp, DF+ set_zero,'.-', New_Exp_00A_10(:,2), New_Exp_00A_10(:,4) )
```

```
xlabel('Displacement [mm]')
```

```
ylabel('Force [N]')
```

```
grid
```

```
figure(2)
```

```
plot(Velocity,DF+ set_zero,New_Exp_00A_10(:,3)*1000,  
New_Exp_00A_10(:,4))
```

```
xlabel('Velocity [mm/s]')
```

```
ylabel('Force [N]')
```

```
grid
```