

<연구논문>

## 회전식 점도측정기를 이용한 ER 및 MR유체의 특성 비교

이영록 · 전도영

서강대학교 공과대학 기계공학과  
(1999년 4월 30일)

## The Comparison of Properties of ER and MR Fluids Using a Rotational Viscometer

Young Rok Lee and Do Young Jeon

Department of Mechanical Engineering, Sogang University, Seoul 121-742, Korea  
(Received April 30, 1999)

### 요약

회전식 점도 측정기를 이용하여 상용화된 전기유변(electrorheological, ER)유체와 자기유변(magnetorheological, MR)유체의 특성을 비교하여 이를 이용한 장치 설계시 두 유체 중에 유리한 것을 선택하는데 도움이 되고자 하는 것이 본 논문의 의도이며, 이러한 유체의 특성에서 전단변형률의 변화에 따른 전단응력의 변화, 온도변화에 따른 전단응력의 변화, 작용하는 장의 세기에 따른 전단응력의 변화 등을 비교하였다. 온도의 변화에 따른 유체의 특성 변화는 MR유체가 ER유체보다 적게 받는 경향이 있었다. 두 유체의 응용 예로서 제작된 댐퍼의 경우에 유압 시험기를 이용하여 인장과 압축될 때 장의 On/Off에 따른 시간지연과 감쇄력을 비교하였다.

**Abstract**-The intention of this research is to give criteria of designing devices using ER fluids and MR fluids. The Properties of commercial ER fluids and MR fluids are compared using a rotational viscometer. The yield strength is compared upon changes of shear rate, temperature and applied fields. MR fluids seem less sensitive to temperature change than ER fluids. In cases of MR and ER fluid dampers, the time delay and damping force are measured in tension and compression mode when the applied field changes.

**Keywords**: ER fluids, MR fluids, Viscometer

### 1. 서 론

제어가능 유체(Controllable fluids)는 지능형 물질중의 하나로서 자기장이나 전기장이 작용할 때 자신의 항복응력을 변화시키는 특성을 가지고 있다. 이러한 특성을 가진 재료로는 전기장 영향을 받는 전기유변(electrorheological, ER)유체와 자기장 영향을 받는 자기유변(magnetorheological, MR)유체가 있다. 둘은 모두 비슷한 거동을 나타내고 단지 서로 다른 장에 영향을 받는 것만이 틀리는데 이러한 재료들은 항복응력이 변한다는 특성으로 인하여 댐퍼, 엔진 마운트, 클러치, 브레이크, 벨브, 헬기의 로터, 진진을 이겨내는 구조물, 운동기구 등 매우 많은 곳에 응용되며 상용화가 진행되고 있다.

이러한 제어가능 유체는 1947년에 Willis Winslow가 전기장 영향에 의해 유도되는 ER 효과를 발견한 것을 계기로 지난 50년 동안 그 특성치와 응용분야에 대해 많은 연구가 진행되었으며 ER유체의 연구와 더불어 높은 항복응력과 작동온도의 범위가 넓은 MR유체가 관심의 대상이 되었다[1].

MR유체는 마이크로단위의 크기를 가지는 자기 극성을 띠는 입자로 채워져 있는 오일인데, 작용하는 장이 없을 때에는 뉴튼 유체의 특징을 보이며 장이 작용할 때는 항복응력이 증가하는 빙햄 유체의 특성을 나타낸다. ER유체도 같은 특징을 보이나 단지 전기 전도성 입자가 분산되어 있는 점이 차이이다. ER 및 MR유체의 전력 소모에 있어서는 서로 비슷하지만, ER유체를 위해서는 1 kV 이상의 높은 전기장이 필요하기 때문에 저전류의 고전압 공급이 필요하고, MR유체의 경우는 자기장을 필요로 하기 때문에 저전압의 고전류 공급이 필요하다[2].

ER 및 MR유체 연구가 활발하게 진행되고 있으나 이러한 유체를 적용하여 장치를 만들 때 둘 중 어느 유체를 택하는 것이 유리한지를 판단하기는 쉽지 않다. 주변장치의 복잡도, 온도 범위, 항복응력 변화 범위 등이 채택의 기준이 될 수 있으나 현재까지 두 유체의 비교가 행해진 결과는 찾기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 ER유체와 MR유체의 특성을 실험적으로 비교한다. 실험은 외국에서 상용화된 두 개의 ER유체와 상용화된 한 개의 MR유체를

대상으로 하였으며 좀더 다양한 유체에 대하여 특성 비교를 해야하나 본 연구의 의도가 두 유체의 우수성 판단보다는 특성비교를 통해 응용시 선택에 도움을 주고자 하는 것이었으며 더 좋은 특성의 유체가 계속 개발되고 있다.

### 1.1. ER 및 MR유체의 기본 특성

ER유체는 전기 전도성 입자가 분산되어 있어 전기장이 작용하지 않을 때는 이 입자가 불규칙적으로 분산되어 있는 등방성(isotropic)의 물리적 현상을 갖고 있다가 전기장이 작용하면 극성을 가진 입자들이 길게 나열되어 이방성(anisotropic)의 구조를 가지면서 유동 성질이 변화하는 특성을 갖고 있다. MR유체도 마이크로 단위의 크기를 가지는 자기 극성을 띠는 입자로 채워져 있는 오일로서, 작용하는 장이 없을 때는 뉴튼 유체의 특성을 보이며 장이 작용할 때는 항복응력이 증가하는 빙햄 유체의 특성을 나타내는데, 빙햄 유체라는 것은 식 (1)과 같이 점도  $\eta$ 와 전단변형률  $\dot{\gamma}$ 에 의해 생기는 전단응력과 자기장이나 전기장에 대한 함수 형태로 나타나는 응력으로 표현되며, 뉴튼 유체는 장에 의한 전단응력  $\tau_0$ 가 없는 경우를 말한다.

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

뉴튼 유체에서 점도는 전단변형률에 대해서는 일정하고, 전단응력은 전단변형률에 비례한다. 빙햄 유체는 항복응력을 가지고 있으며, 전단변형률이 어느 정도 이상에서 점도는 뉴튼 유체처럼 전단변형률에 대해서 일정하지만, 전단변형률이 0으로 접근함에 따라 점도는 급격히 증가하여 Fig. 1(a)와 같이된다. 이러한 물질은 어떤 전단응력 이상에서만 유동이 개시되며, 그 때의 전단응력 ( $\tau_0$ )을 항복응력으로 정하기도 한다. 전단응력  $\tau_0$  이하에서는 고체와 같은 성질을 보이며, 유동이 개시된 이후에는 전단응력과 전단변형률은 Fig. 1(b)처럼 비례하여 증가한다.

## 2. 실험 구성 및 내용

ER 및 MR유체의 점도 측정을 위해서 HAAKE사의 ER유체용 점도계를 사용하였는데, ER유체 측정은 점도계

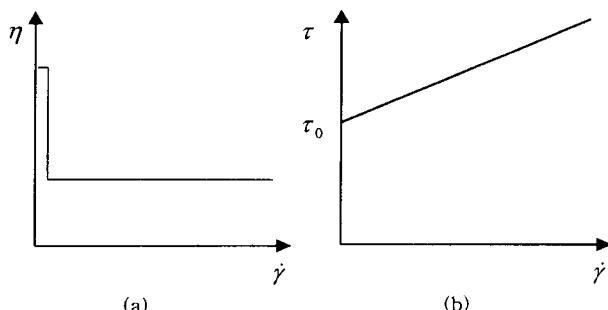


Fig. 1. Schematic curves of Bingham fluids. (a) viscosity with shear rate. (b) shear stress with shear rate.

의 ER유체 측정용 장치를 사용하고 MR유체를 위해서는 자기장을 가하기 위하여 기존 베셀을 변형하는 새로운 장치를 제작하였다. Fig. 2는 실험을 위한 장치 구성도를 보여주는 것이다. D/A와 A/D 변환기가 장착된 컴퓨터는 실험을 위한 전압 및 전류 입력을 제어하는 동시에 측정값을 기록한다. 컴퓨터 제어를 통하여 나온 신호는 증폭기를 통하여 전압 또는 전류를 증폭하여 전달되고, 측정된 신호는 토크 센서를 통하여 컴퓨터가 읽게된다. 점도 측정기는 온도 조절 장치가 되어 있어 -20°C부터 80°C까지의 온도를 일정하게 유지할 수 있으며 외부로부터의 전기적 외란으로 인한 측정값의 오차를 줄이기 위해 절연이 되어 있다.

ER 및 MR유체 점도 측정을 위한 실험에는 HAAKE사의 SV1과 전단응력의 측정 범위를 높이기 위해 제작한 SV3 그리고 PQ2센서를 사용하였다. Fig. 3은 SV1과 SV3를 나타낸 것으로 유체는 로터와 베셀 사이에 위치한다. Fig. 4는 PQ2의 개략도를 나타낸 것으로 유체는 센서와

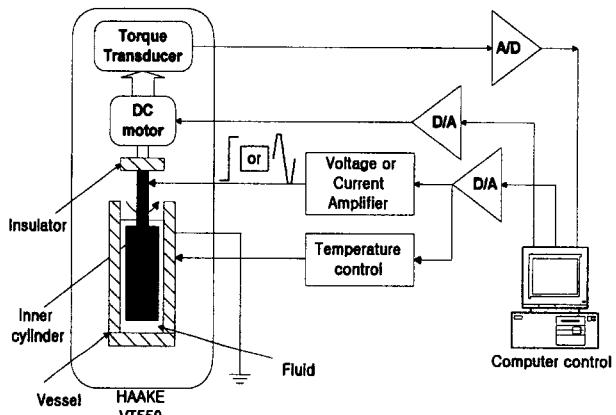


Fig. 2. Schematic layout of the experimental apparatus for ER and MR fluids.

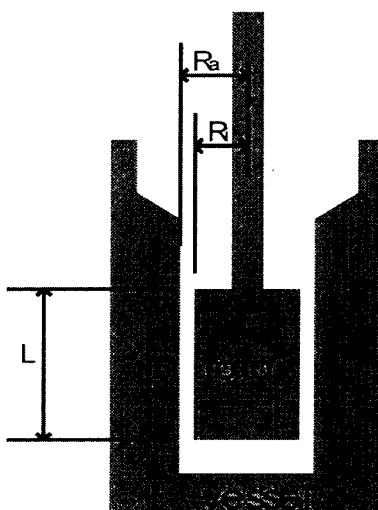


Fig. 3. Schematic of SV sensor series.

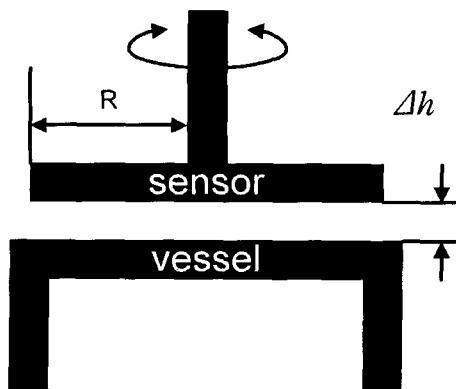


Fig. 4. Schematic of PQ2 sensor.

Table 1. Specifications of SV series

Sensor System	SV1	SV3
<i>Inner Cylinder(Rotor)</i>		
Radius( $R_i$ ) (mm)	10.1	5.0
Height( $L$ ) (mm)	61.4	19.6
<i>Outer Cylinder (Cup)</i>		
Radius( $R_o$ ) (mm)	11.55	6.45
Radii Ratio $R_o/R_i$	1.14	1.29
Gap Width (mm)	1.45	1.45
Sample Volume ( $\text{cm}^3$ )	12.0	1.7
Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	-30~100	5~70
Measurable Maximum Shear Stress(Pa)		
	780	10,000

Table 2. Specifications of PQ2 sensor

Sensor System	PQ2
Rotor Radius( $R$ ) (mm)	10
$\Delta h$ (mm)	1.27
Sample Volume ( $\text{cm}^3$ )	0.4
Measurable Maximum Shear Stress (Pa)	19,000

베셀 사이에 위치한다. Table 1과 Table 2는 각각 SV1, SV3와 PQ2센서의 사양을 나타낸 것이다. 센서와 베셀 사이의 간격은 PQ2센서에서 통상 측정 기준으로 널리 쓰이는 범위 1.27 mm를 사용했고 SV1, SV3센서는 1.45 mm의 간격을 사용하였다.

MR유체 점도 측정기에서 자기장을 가할 때 쓰는 전자석은 지름 1 mm의 애나멜선을 이용하여 제작하였고, 전자석의 크기(단위 : mm)와 로터에 전자석이 부착된 모양이 Fig. 5에 나와 있다.

SV1센서를 이용한 MR유체의 측정시 전류와 자기인덕턴스(Magnetic inductance) 사이의 관계를 알아보기 위해 가우스 미터로 자기인덕턴스를 측정하였으며 Fig. 6은 전자석에 흐르는 전류와 측정한 자기인덕턴스의 크기를 나

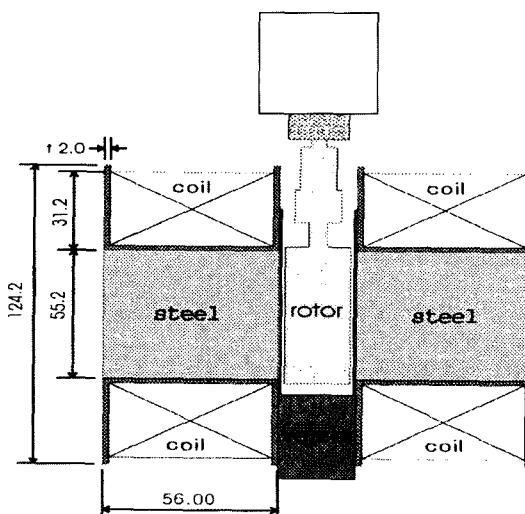


Fig. 5. Schematic plot of vessel and electromagnet.

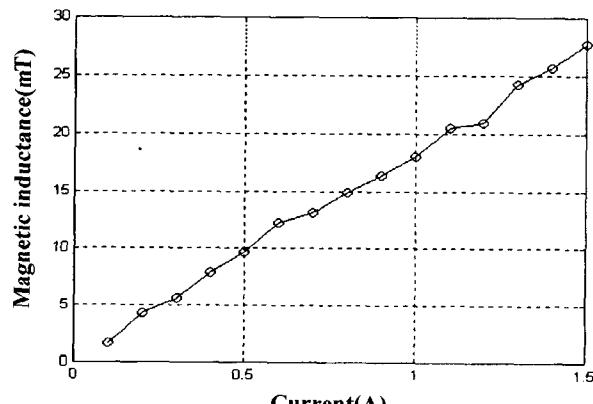


Fig. 6. Magnetic inductance v.s. current.

타낸 것으로 대체로 전류와 자기인덕턴스는 선형 관계를 갖음을 알 수 있다.

## 2.1. 실험내용

실험한 내용은 ER 및 MR유체의 비교 실험과 추가적인 MR유체의 특성 실험으로 구성된다. 첫 번째 비교 실험 시에는 ER 및 MR유체에 대한 공통적인 측정 기준이 성립되지 않았고, 장의 종류와 크기를 단순히 절대 비교하기는 어려우므로 실험시 각 유체의 특성에 적합한 센서와 실험 방법에 따라 유체를 선택하여 실험하였다.

### (1) ER 및 MR유체의 비교 실험 항목

- i) 온도와 장의 세기 변화에 대한 항복응력 측정[3][4]
- ii) 전기장 및 자기장의 변화에 대한 전단응력
- iii) ER 및 MR 램프의 시간지연 측정

### (2) MR유체의 특성 실험

- i) 장시간 동안의 전단응력 측정
- ii) 자기장을 가한 후의 히스테리시스 측정

ER 및 MR유체의 비교 실험은 항복응력 및 전단응력의 변수인 온도와 장의 세기 변화에 대하여 측정하였는데, 온도는 ER 및 MR유체에 공통적으로 적용할 수 있는 범위에서 5°C, 30°C, 70°C의 일정 온도에서 전단변형률을 변화시키거나 장의 세기를 변화시키면서 측정하였으며, ER 및 MR유체의 응용 예로서 램퍼를 제작하여 유압 시험기를 이용하여 램퍼가 일정 속도로 인장, 압축될 때 장의 On/Off에 따른 시간지연과 감쇄력을 비교하였다. MR유체의 특성을 추가적으로 확인하기 위해서 장시간 동안 상온에서 자기장에 MR유체가 노출되었을 때 거동과 장의 세기에 따른 잔류자기의 크기를 확인하기 위하여 히스테리시스 측정 실험을 병행하였다.

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1. 온도와 장의 세기 변화에 대한 항복응력 측정

본 실험에 사용된 두 종류의 ER유체 및 한 종류의 MR유체는 상용화된 외국제품을 수입한 것으로 각각 ER유체1, ER유체2, MR유체로 명명하여 표기한다. ER 및 MR유체의 항복응력을 비교하기 위하여 같은 온도와 같은 전단변형률을 유체에 가하여 항복응력을 측정하였으며 가해진 조건은 Table 3과 같다.

예를 들어 ER유체1의 경우 5°C의 온도에서 1 kV의 전압을 주어 전단변형률을 10에서 100까지 증가시키며 측정을 하였고, 측정센서는 SV3을 사용하였다.

연구에 사용된 두 개의 ER유체 중 ER유체1은 전단변형률이 높을 때 점도계 배셀의 바깥쪽으로 밀리는 현상이 적으나 ER유체2는 입자가 바깥쪽으로 몰려서 뭉쳐지게 되어 안쪽 회전체와 서로 분리되므로 측정된 전단응력이 어느 정도 이상을 올라가지를 못하게 된다. 즉, 전단변형률을 시간에 비례하여 증가 시켰을 때 고전압(4 kV)에서 입자들이 정렬을 잘하다가 전단변형률이 대략 100(1/s) 이상에서는 원심력에 의해 뭉쳐진 입자들이 밖으로 밀려 중앙에는 공극이 생겨 점도계에 읽히는 전단응력이 작아지는 현상을 보인다. 따라서 다음의 실험은 ER유체1을 사용한 결과이다. MR유체는 공극 현상이 ER유체보다 적으나 고온(70°C)에서는 전단변형률이 약 200(1/s)에서 발생하였다.

Fig. 7은 온도와 장의 세기의 변화에 따른 ER 및 MR

유체의 전단변형률과 전단응력 관계를 나타낸 것으로서 온도가 높아지고 장의 세기가 작아질수록 전단응력이 작다. 점도계에서 최소 전단변형률은 대략 5(1/s)이므로 그림의 y축 절편은 직선 보간에 의하여 그린 것이며 로터와 배셀의 간극은 1.45 mm이다. Fig. 7(a)의 ER유체의 경우 회전체에 전기를 공급해주는 부분이 결로에 의한 전기스파크로 정확한 전압을 유지하기 어려웠으며 이로 인해 전반적인 전단응력이 매우 낮게 나왔고 데이터의 신뢰성이 매우 낮다. ER 및 MR유체의 실험결과를 통해서 전단응력을 보면, 5°C에서 MR유체는 315 mT를 가했을 때 약 9 kPa 까지 나오고, 30°C에서 ER유체1은 약 1300 Pa까지의 전단응력을 가진다는 것을 알 수 있다. 전단변형률을 증가에 대해 ER유체1은 전단응력의 증가율이 완만한 것에 비해 MR유체의 경우 전단응력의 증가율이 높음을 알 수 있고, 자기장이 셀수록 더욱 큰 증가율을 보여준다. Fig. 7(b)(c)의 ER유체1의 경우 항복응력을 보면 2 kV까지는 큰 변화가 없으나 그 이상의 세기에서는 일정한 크기의 증가 추세를 보인다.

Fig. 8은 온도 민감도를 도표로 나타낸 것이다. ER 및 MR유체로 램퍼와 같은 장치를 만들 때 항복응력이 매우 중요한 특성이 되므로 온도 변화에 따른 항복응력을 비교하였는데, 온도가 30°C에서 70°C로 증가할 때에 항복응력의 변화 폭을 비교해보면 ER유체1이 항복응력에 있어서 온도에 대한 변화가 커서 온도에 민감한 기구를 제작시 고려해야 할 요소로 생각된다.

Table 4는 ER 및 MR유체에 대한 특성을 비교한 것인데 점성은 두 유체가 비슷하며 MR유체가 항복응력과 전단응력의 변화 범위가 큰 것을 알 수 있다.

#### 3.2. 전기장 및 자기장의 변화에 대한 전단응력

ER 및 MR유체의 장의 세기를 변화시켜 줌으로써 장의 변화에 대한 동특성을 알아보는 실험을 하였다. ER유체에서는 PQ2센서를 사용하였고, MR유체에서는 SV1을 사용하였다. 이때 전기장과 자기장은 경사 입력 형태로 변화시켰다.

##### (a) ER유체의 전기장의 변화에 대한 전단응력[4]

Fig. 9는 30°C에서 전단변형률을 50(1/s) 또는 100(1/s)으로 일정하게 한 후, 전압을 0 kV에서 4 kV까지 경사 입력 형태로, 4 kV까지 오르는 시간을 80초로 한 후, 다시 같은 시간으로 0 kV까지 내려주어 측정한 것이다. 그림에서 보듯이 정확히 4 kV에서 전단응력이 최고값을 갖지 않고, 4~10초 후에 최고값을 가짐을 볼 수 있다. 이는 높은 전압을 가해줄 경우 계속해서 입자의 결합이 전압을 낮게 해준 이후에도 유지되고 있음을 보여주는 것이며 장의 변화에 대해서는 비선형적으로 바뀌는 것을 알 수 있다.

장이 없어진 이후에도 입자가 뭉쳐져 있는 상태를 해결하고, 이를 실제 응용에서 적용하기 위해서는 기구에 압력

Table 3. Experimental conditions for yield strength measurement

Fluids Conditions	ER fluids	MR fluids
Measurement Temp.(°C)	5, 30, 70	5, 30, 70
Fields applied	0, 1, 2, 3, 4 (unit : kV)	0, 85, 95, 170, 315 (unit : mT)
Shear Rate(1/s)	10~100	10~100
Measurement sensor	SV3	SV3

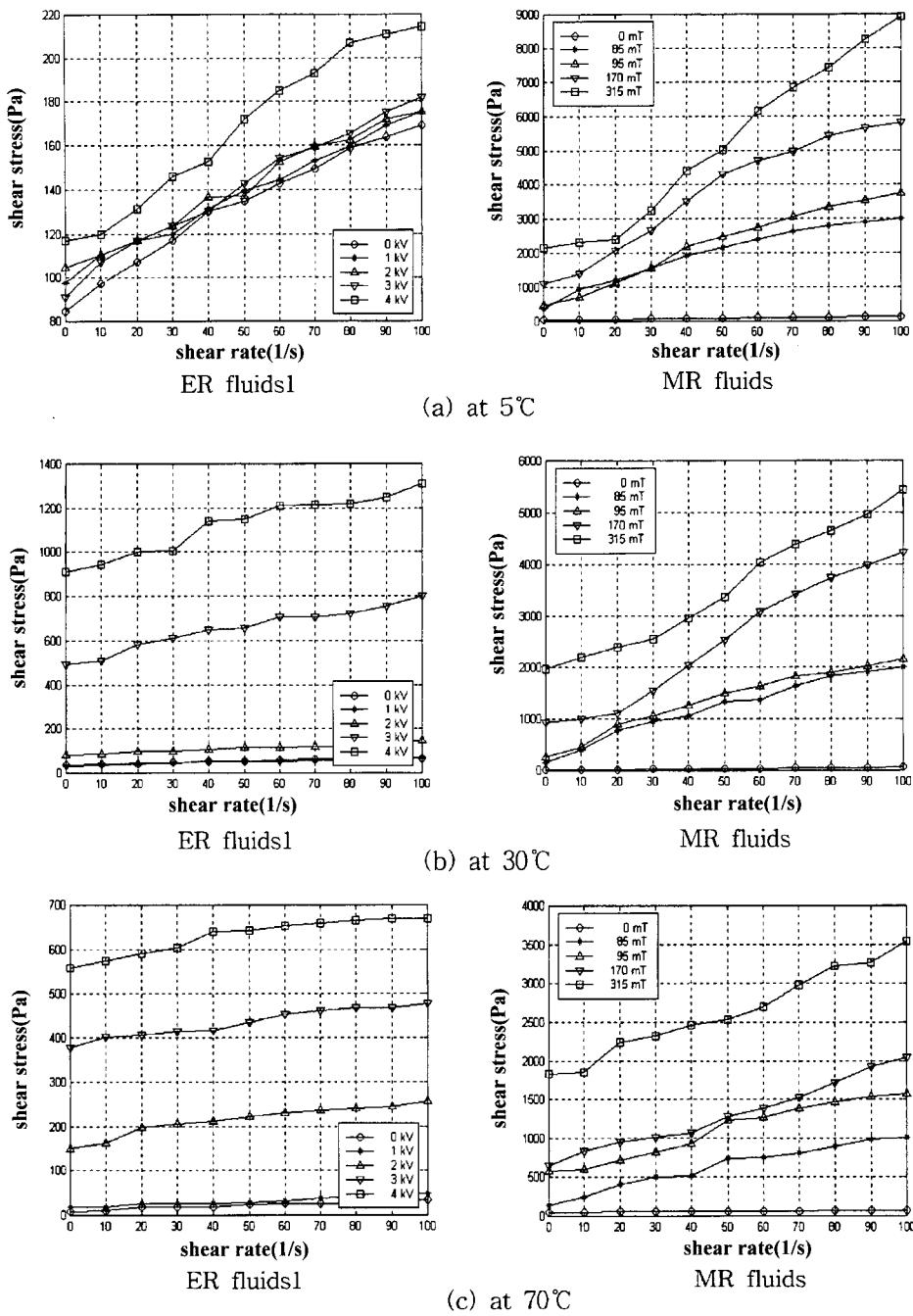


Fig. 7. Shear stress v.s. shear rate with different fields and temperature.

이나 회전에 의한 내부 순환식 구조 등과 같은 요소를 첨가하여 극복되어져야 할 것이다.

(b) MR유체의 자기장의 변화에 대한 전단응력  
전류를 경사 입력 형태로 증가시켰다가 역순으로 감소시키면서 MR유체의 응답을 알아보는 실험을 하였다. 일정 온도에 대해 전단 변형률은 50(1/s), 100(1/s)로 주었으며 각 전단변형률에 대해 최대전류에 도달하는 시간을 20, 40, 80, 120초로 설정했다.

Fig. 10은 전류를 경사 입력 형태로 0.9 A까지 가했을

때의 전단응력을 나타낸다. 그림에서 보듯이 각각의 전단응력 최고값이 전류 세기의 최고값에서 나타나지 않고 4~8초 후에 나타나며, 전단응력이 초기 부분에서 전단변형률에 대해 선형으로 변하지 않고 비선형적으로 바뀌는 것을 알 수 있다.

### 3.3. ER 및 MR 댐퍼의 시간지연 측정

댐퍼의 감쇄 특성을 파악할 수 있는 유압시험기를 이용하여 ER 및 MR 댐퍼가 120 mm/s의 속도로 인장, 압축

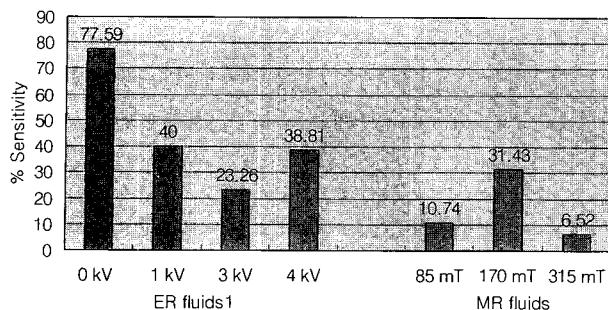
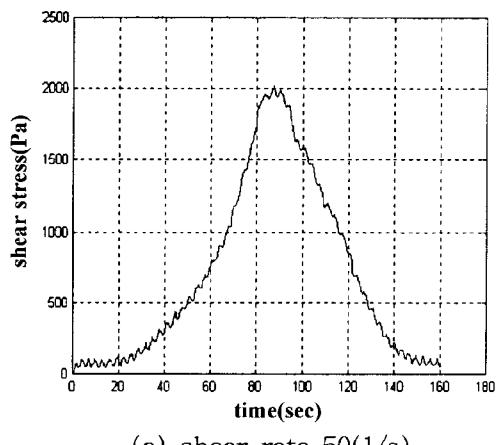


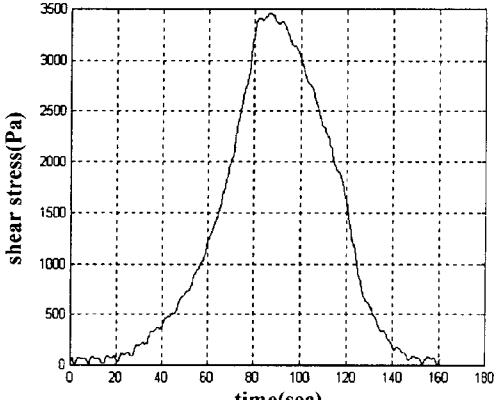
Fig. 8. Sensitivity of yield stress as temperature changes from 30°C to 70°C.

Table 4. Properties of ER and MR fluids

Properties	ER fluids1	MR fluids
Yield Stress(Pa)	5~910 (at 1~4 kV)	150~2200 (at 85~315 mT)
Viscosity(mPa·s) (no field at 30°C)	400~500	500~600
Range of Shear Stress(Pa) (at 5~100(1/s))	5~1300 (at 1~4 kV)	150~9000 (at 85~315 mT)
Color	white	gray

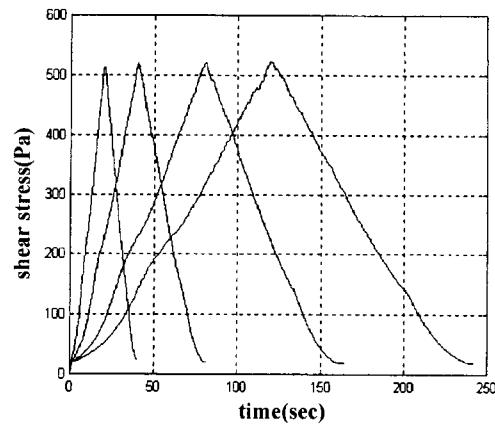


(a) shear rate 50(1/s)

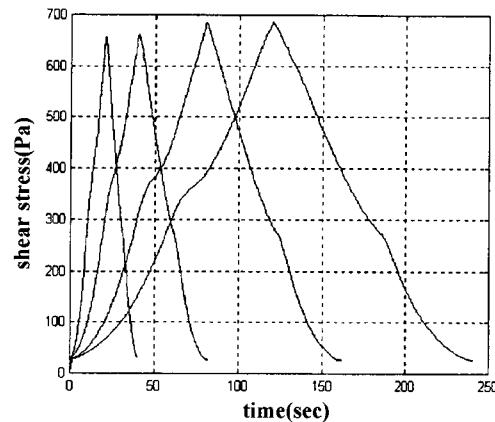


(b) shear rate 100(1/s)

Fig. 9. Shear stress with ramp input at 30°C.



(a) shear rate 50(1/s)



(b) shear rate 100(1/s)

Fig. 10. Shear stress with different ramp inputs at 40°C.

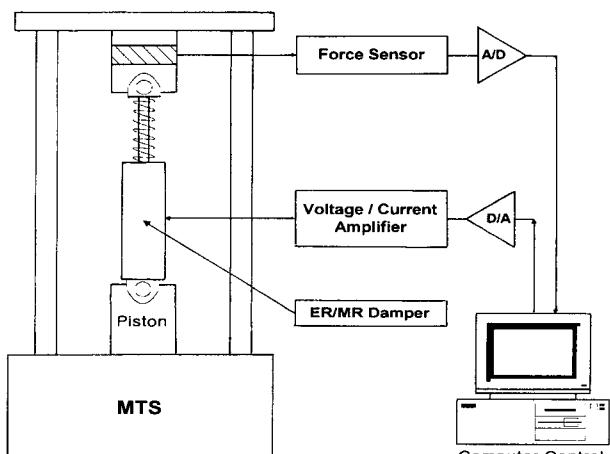


Fig. 11. Experimental apparatus for time delay measurement of ER and MR dampers.

될 때 전기장이나 자기장을 On/Off 해주고 데이터 샘플시간 1 msec로 하여 시간지연을 측정하였다. 전압이나 전류를 증폭하는 장치는 0.1 msec이하의 응답속도를 가지고 있으므로 이에 대한 시간지연은 무시하였고, 시간지연은

정착시간(settling time)의 70%로 정의하였다. ER유체1, ER유체2, MR유체등 세 가지가 사용되었다. Fig. 11은 ER 및 MR유체 땜퍼의 시간지연 측정을 위한 실험장치이다. 컴퓨터를 통하여 나간 신호는 전압과 전류 증폭기를 통하여 유체가 들어있는 땜퍼에 장을 가해주고 감쇄력을 힘 센서를 통하여 컴퓨터에 읽힌다. 유압 시스템은 약 1 Hz의 주파수와  $\pm 120 \text{ mm/s}$ 의 크기로 가진 될 수 있으므로 등속도 구간 즉 가속력이 없는 구간에서 전압 또는 전류

를 0에서 최대 또는 최대에서 0으로 순간 변화시켜 측정하였다.

Fig. 12는 땜퍼를 등속도로 압축 또는 인장하여 감쇄력을 일정하게 유지한 상태에서 On/Off 상태를 번갈아 변화시켜 줄 때 땜퍼의 응답특성을 나타낸 것으로, MR유체의 경우 Off는 0A, On은 4A이며, ER유체1의 경우 Off는 0 kV이고 On은 0.75 kV이며, ER유체2의 경우 Off는 0 kV이고 On은 1 kV이다. 실선이 땜퍼에 가해진 자기장 또는 전기

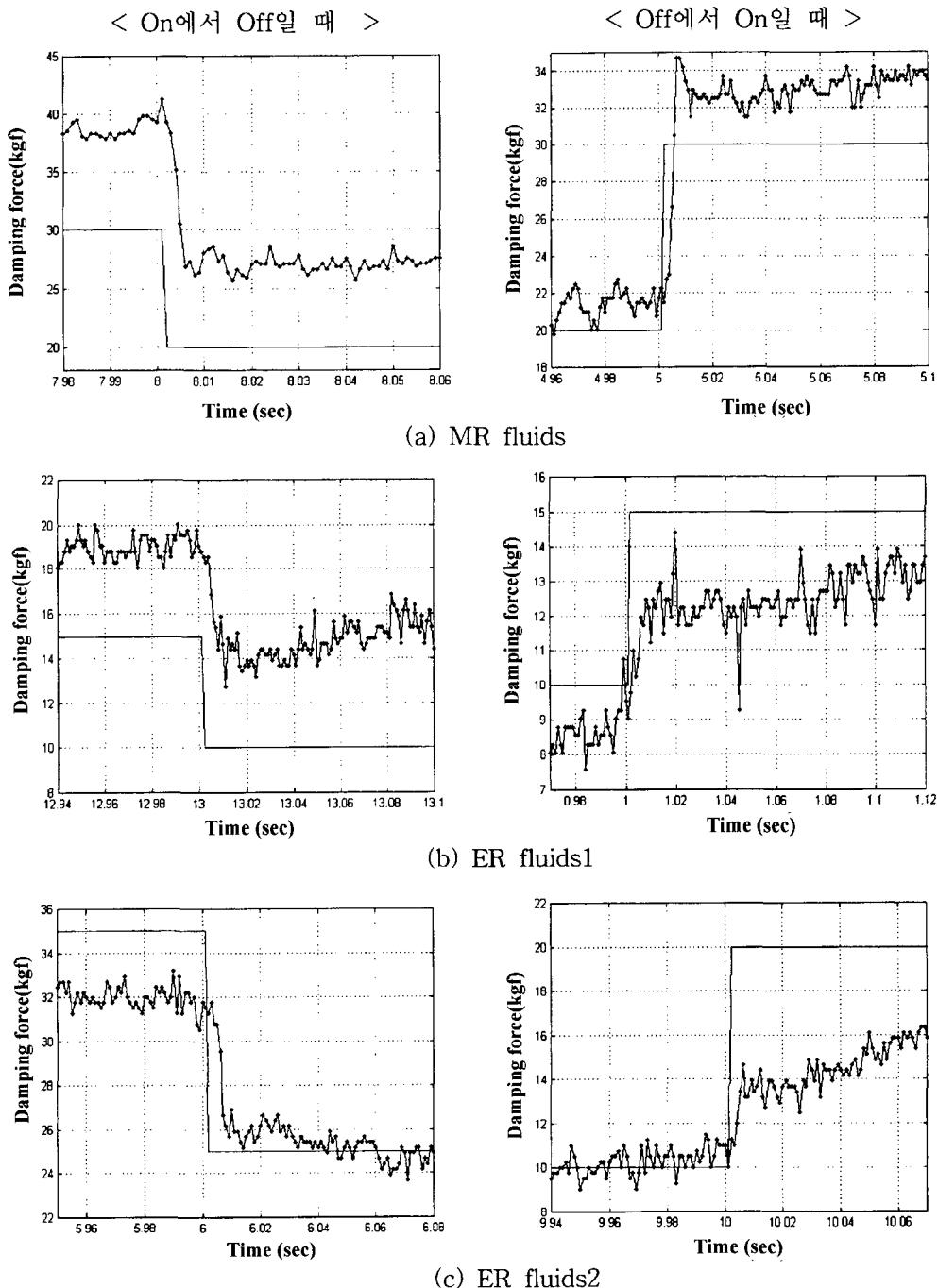


Fig. 12. Time delay characteristics of ER and MR dampers.

장의 입력이고 점을 가진 실선은 감쇄력을 나타낸 것이다. MR유체 댐퍼의 시간지연은 대략 5-7 msec정도이고 ER유체1 댐퍼는 7-9 msec, ER유체2 댐퍼는 대략 5-8 msec정도의 시간지연을 가지고 있어 ER 및 MR 댐퍼의 시간지연은 비슷하였다.

Fig. 13은 On상태에서 인장, 압축이 반복될 경우 감쇄력 양상을 나타낸 것으로서 MR유체 댐퍼 및 ER유체1 댐퍼는 비교적 일정한 힘을 유지하는데 반하여 ER유체2 댐퍼는 감쇄력이 계속 증가하는 추세를 나타내는 것을 알 수 있다. 이러한 비선형적 특성은 감쇄력의 불확실성을 증가시켜 시스템 성능을 저하시키는 요소가 될 수 있다. MR유체 댐퍼의 경우는 16 V, 4 A의 비교적 많은 에너지가 공급됐음에도 불구하고 감쇄력 변화가 작은데 이러한 이유는 댐퍼 내부의 공간이 좁아 자기장이 적게 발생되었기 때문이며 한정된 공간에서 효과적으로 자기장을 발생시킬 수 있도록 수정된 설계가 요구된다.

### 3.4. 장시간 동안의 전단응력 측정(MR유체)

점도계를 하나의 조건에서 장시간 가동시킬 경우 변화를 보기 위하여 처음 1시간 동안은 90(1/s), 14 mT인 상태에서 전단응력을 측정하고 그 다음 1시간 동안은 90(1/s), 0 mT

인 상태에서 전단응력을 측정하여 2시간 동안의 MR유체의 반응을 확인하였고, 센서는 SV1을 사용하였다. 온도를 조절하지 않은 상태의 상온( $30^{\circ}\text{C}$ )에서 실험을 하였다. Fig. 14(a)에 보듯이 처음 1시간동안은 전단응력이 차츰 증가하다가 일정해 지고 그 이후에는 MR유체에 전류를 가하지 않아서 전단응력이 약간 감소하다가 일정해지는데, 이는 MR유체의 응답이 일정해 지기까지 어느 정도 시간이 소요됨을 나타내고, 자기장에 대한 히스테리시스나 입자가 침전해서 생기는 영향이라고 판단된다. MR유체의 온도가 Fig. 14(b)에 나와 있는데 처음 1시간 동안에는 14 mT의 자기장을 가해서 전자석의 온도 상승으로 인해서 MR유체의 온도가 서서히 증가하다가 이후의 1시간 동안에는 전자석에 전류가 흐르지 않아서 MR유체의 온도가 다시 감소하는 것을 확인 할 수 있다.

5시간동안 상온( $30^{\circ}\text{C}$ )에서 전류를 가하지 않고 SV1의 센서를 사용하여 90(1/s)의 전단변형률을 주었을 때의 MR유체의 전단응력이 Fig. 15에 나타나 있는데 대체적으로 전단응력은 감소하는 경향을 나타낸다.

### 3.5. 자기장을 가한 후의 히스테리시스 측정(MR유체)

MR유체의 히스테리시스를 관측하기 위하여 상온( $30^{\circ}\text{C}$ )

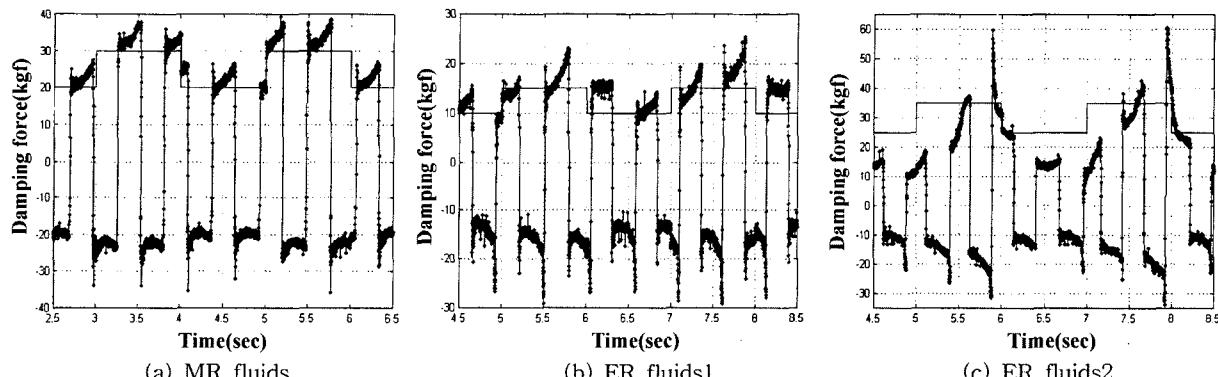


Fig. 13. Characteristics of damping force for ER and MR dampers.

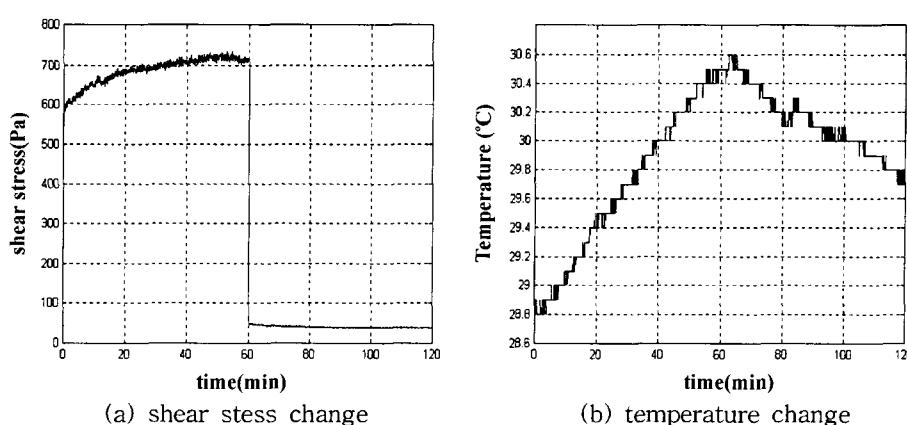


Fig. 14. Long time shear stress and temperature monitoring.

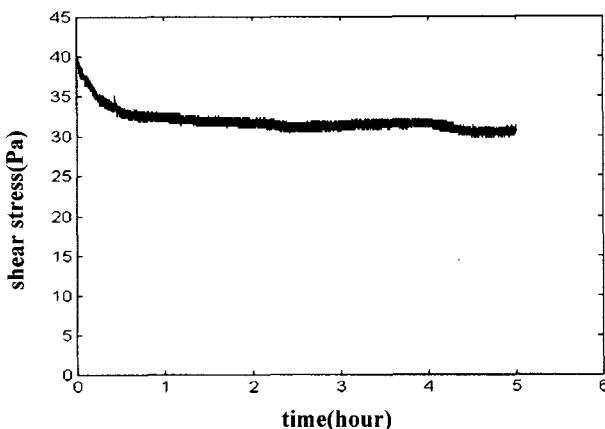


Fig. 15. Long time shear stress monitoring.

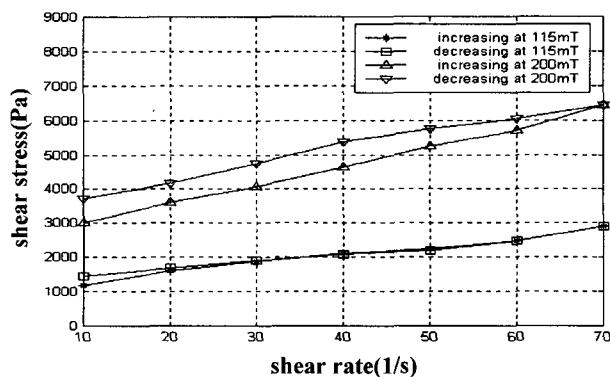


Fig. 16. Hysteresis of MR fluids for different shear rate.

에서 전단변형률을 증가시킨 후 역으로 감소시키는 실험을 하였다. SV3센서를 사용하여, 점도계에 전단변형률을 10 (1/s)으로 60초간 준 후, 다시 20(1/s)으로 60초간 주는 방법으로 전단변형률을 70(1/s)까지 가한 후 역순으로 감소하도록 입력을 주었고, 자기장은 115 mT, 200 mT이었다.

가해진 자기장의 변화에 대해 비선형적으로 자화가 진행되는 현상인 히스테리시스는 자기인덕턴스가 자기장과 선형 관계식을 가지나, 실제로 강자성 물질을 자기장내에 두었을 때는 선형적으로 반응하지 않게 된다. 즉, 외부 자기장을 증가시키면 자기인덕턴스가 증가하다가 더 이상 증가하지 않는 한계점인 포화점에 이르고, 이로부터 자기장을 감소시키면 자기인덕턴스도 감소하나 외부 자기장이 0 이 되어도 자기인덕턴스가 남아 있게 되는데 이를 잔류자기라고 한다.

Fig. 16은 MR유체의 경우 잔류자기의 영향을 나타낸 것

인데 자기장의 세기가 115 mT에서는 전단변형률이 증가한 후 감소한 후의 전단응력 크기에 대한 차이가 크지 않으나 200 mT에서는 차이가 커서 자기장의 세기가 커질수록 히스테리시스가 커짐을 확인 할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 회전식 점도측정기를 이용하여 ER 및 MR유체의 실험 변수(전단변형률, 장의 세기, 온도, 시간)에 따른 유체의 특성을 알아보았다. 각 실험별 유체의 특성을 종합해보면, 30°C에서 ER유체와 MR유체의 항복응력에서는 ER유체1의 경우 0~4 kV의 전압과 1.45 mm 간극의 회전식 점도계에 대해 35.7~912.7(Pa)의 항복응력을 갖지만 MR유체의 경우는 동일 간극에서 0~315 mT의 자기장에 대해 16.2~1,963(Pa)의 항복응력이 측정되었고, ER 유체1의 경우는 0~2 kV의 전압에 대해 항복응력의 변화 폭이 크지 않는 반면에 MR유체의 경우는 작용하는 자기장의 세기가 약한 범위에서도 항복응력의 변화 폭을 즉시 확인할 수 있었다. ER 및 MR유체는 온도가 낮아질 때는 항복응력이 증가하고 온도가 높아질 때는 항복응력이 감소함을 확인할 수 있었으며, ER유체가 항복응력에 있어서 온도에 민감한 경향을 보였다. 보다 실제적인 상황에 대한 실험 결과를 얻기 위하여 ER 및 MR 댐퍼의 시간지연 측정을 해보았고, 이로부터 On/Off 실험에서는 ER 및 MR 댐퍼 모두 약 5~8 msec정도의 시간지연을 갖고 있었다.

#### 기 호

- $\eta$  : Viscosity
- $\dot{\gamma}$  : Shear rate
- $\tau$  : Shear stress

#### 참고문헌

- K.D. Weiss, T.G. Duclos, J.D. Carlson, M.J. Chrzan and A.J. Margida, SAE Technical Paper Series, 932451 (1993).
- J.D. Carlson, D.M. Catanzarite and K.A. St. Clair, 5th Int. Conf. on ER, MR Suspensions and Associated Technology, July (1995).
- R. Böller and H. Janocha, SPIE's Annual Symposium on Smart Structures and Materials, 2-6 March (1997).
- H. Janocha and B. Rech, "Electrorheological Fluids", ed., by R. Tao, G.D. Roy, World Scientific Publishing, 1994, p.344.