

## 작동모드에 따른 MR유체의 특성 비교

이 호 근\* · 김 기 선\*\*

### Characteristics of MR Fluids with Different Working Modes

Ho-Guen, Lee\* and Key-Sun, Kim\*\*

**요약** 본 논문은 전단모드와 유동모드 하에서 자기유변유체의 병행 및 응답특성 실험을 실시한 것이다. 실험을 위해 전단모드와 유동모드에서 작동하는 두 가지 자기점도계가 제작되었으며, 자기유변유체는 로드사의 MRF-132LD가 사용되었다. 자기장의 변화에 따른 전단응력이 다양한 온도에서 실험적으로 실시되었다. 이로부터 직선보간법을 이용하여 항복전단응력을 도출하였으며, 온도에 따른 변화가 매우 적은 것을 확인했다. 또한 자기유변유체의 사각파에 대한 응답특성이 작동모드에 따라 비교되었다.

**Abstract** This work presents field-dependent Bingham and response characteristics of MR fluids under shear and flow modes. Two different types of magneto-viscometers are designed and manufactured for the shear and flow modes, respectively. For the MR fluid to be tested, MRF-132LD of Lord co. is employed. The field-dependent yield stress is experimentally distilled at various temperatures using the magneto-viscometers. Time responses of the MR fluids to step electric fields are also evaluated under two operating modes.

**Key Words :** Magneto-rheological fluid(자기유변유체 ; MR유체), Bingham characteristics(병행특성), Shear mode(전단모드), Flow mode(유동모드), Magnetic field(자기장), Yield stress(항복응력), Current density(전류밀도), Response time(응답시간)

### 1. 서 론

MR유체의 특성은 자기장이 부하됨에 따라 항복응력(yield stress)과 가점성(apparent viscosity)이 변하는 것으로, 자기장 부하 시 유체 중에 분사된 입자가 유동분극을 일으켜 양쪽의 전극을 향하여 자기장과 평행한 섬유상 구조의 고리층 형성함으로써 유체의 이동이나 외부에서 가해지는 전단력에 대하여 저항을 하게 되며, 그 반응은 비교적 빠르고 자기장 부하에 대하여 가역적인 반응을 나타낸다. 그러므로 외부 조건에 따라 MR 유체에 부하되는 자기장의 크기만을 변화시켜 연속적이고 국부적인 제어를 할 수 있다. 이러한 MR유체의 특성을 이용한 응용 장치는 유로의 일부분을 전극으로 사용할 수 있기 때문에, 부가적인 운동 장치의 필요 없어 설계의 단순화를 가져올 수 있다[1].

이러한 응용장치들은 MR 유체와 전극 사이의 상대 운동에 따라 세가지 형태로 분류할 수 있다. 첫번째 형

태는 전단모드(shear mode) 혹은 회전 전단모드(rotational shear mode)로, 평행한 두개의 평판 중 한쪽의 전극은 고정 되어 있고, 다른 한쪽이 회전이나 이동을 하는 형태이다. 유체의 이동과 전극의 움직임이 평행하게 일어나는 클러치 및 브레이크 시스템이 이 형태에 속한다[1]. 두 번째 형태는 두 전극은 고정되어 있고, 고정된 전극 사이로 유체가 이동하는 형태로 유동모드(flow mode)라 한다. 이 형태는 밸브, 밸브 혹은 엔진마운트 등과 같이, 일반적으로 유체가 흐르는 관내에서 유체의 압력 변화와 유량 변화가 동시에 일어나는 형태이다[1-3]. 세번째 형태는 유체의 유동과 전극의 움직임이 수직인 방향으로 일어나는 압착모드(squeeze mode)이다. 이 형태는 전극과 유체의 유동은 매우 적게 일어나지만, 엔진마운트, 스마트 구조물 등에 응용하려는 연구가 수행되고 있다.

전단모드 하에서 MR유체의 병행거동식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\tau = \tau_y(H) + \eta\dot{\gamma}, \quad \tau_y(H) = aH^b \quad (1)$$

여기서,  $\tau$  는 유체의 전단응력(shear stress)을 나타

\*대덕대학 타이어공학과

\*\*천안공업대학 기계공학과

본 논문은 BK21 연구과제 지원에 의해 수행되었으며, 이 결과는 MR 유체를 이용한 각종 응용장치 설계에 핵심이 되는 중요 정보로 사용되고 있다. (E-mail: leehg@hananet.net)

내고,  $\gamma$ 는 전단변형률(shear rate)이며,  $\eta$ 는 MR 유체의 점성계수를 나타낸다.  $\tau_s(J)$ 는 MR 유체의 항복응력을 표현한 것으로 자기장  $H$ 의 함수가 된다.  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 MR 유체의 용매종류, 입자 종류, 입자 중량비와 용매의 점성 등 MR 유체의 조성 조건 및 사용 조건에 영향을 받는 MR 유체의 고유 상수이다. 또한, MR 효과를 나타내기 위해 자기장이 부하된 경우 소요되는 전류밀도를 측정하여 전력소모량을 예측할 수 있는데, 이러한 전류밀도는 부하되는 자기장에 대하여 다음의 식과 같이 함수적으로 비례하는 것으로 알려져 있다.

$$J = \alpha_1 H^{\beta_1} \quad (2)$$

여기서  $\alpha_1$ 와  $\beta_1$ 는 MR 유체의 용매종류, 입자 종류, 입자 중량비와 용매의 점성 등 MR 유체의 조성 조건 및 사용 조건에 영향을 받는 MR 유체의 고유 상수이다.

식 (1)로 표현되는 빙햄특성(Bingham characteristic) 식은 응용장치에 적용 시 MR효과 발현에 의한 응용장치의 성능 예측에 사용되는 것으로 매우 중요하다. 전단모드 형태의 실험장치는 구조가 간단하고 제작이 용이하며 실험장치의 검증이 쉽게 이루어질 수 있으나, MR 유체용으로 상용화되어 있는 것은 없다. 그리고, 유동모드 형태의 실험장치는 구조가 복잡하고 유체의 유동을 직접 측정하기가 곤란하기 때문에, 대부분의 응용장치 제어에 필요한 MR 유체의 물성치( $\tau$  및  $\tau_s$ )는 응용장치에서 측정된 전단력 또는 탭핑력으로부터 계산에 의해 얻은 예상값을 사용하고 있다. 이에 본 논문에서는 전단변형률을 2,000s<sup>-1</sup>까지 증가시킬 수 있는, 보다 성능이 우수한 전단모드형 점도계를 자체 제작하여 MR 유체의 빙햄특성 실험을 실시하였다. 또한 작동모드에 따른 영향을 살펴보고자, 전단변형률을 10,000s<sup>-1</sup>까지 증가시킬 수 있는 유동모드형 점도계를 자체 제작하였으며, 이들 점도계를 이용하여 작동모드에 따른 빙햄 특성 및 응답특성을 온도에 따라 실험적으로 고찰하였다.

## 2. 작동모드에 따른 빙햄특성 측정장치

본 실험에 사용된 MR 유체는 LORD 사의 MRF-132-LD로 이미 상용화 단계에 있는 제품이다. MRF-132-LD는 Carbonyl iron과 Hydrocarbon oil을 합성한 것으로 용매에 대한 입자의 중량비는 32%이며, 기본점성계수는 0.2 Pas, 작동온도범위가 40~+150℃인 MR 유체이다. Table 1은 ER 유체와 MR 유체의 특성을 비교하여 나타낸 것이다. 현재 MR 유체와 더불어 지능재료의 일종으로 반능동형 응용장치에 널리 사용되고 있

Table 1. Compare MRF with ERF

	ER	MR
Yield stress	~5 kPa	~150 kPa
Max. Field	~5 kV/mm	~2.5 kA/m
Viscosity	0.2~1.0 Pa·s	0.2~1.0 Pa·s
Temp. Range	20~120℃	-50~150℃
Stability	Cannot tolerate impurities	No affected by most impurities
Response time	2~15 ms	100~130 ms
Density	1~2 g/cm <sup>3</sup>	3~4 g/cm <sup>3</sup>
Power	2~50 watts	2~50 watts

는 각종 ER 유체는 빠른 응답속도와 전기장 형성이 용이하다는 장점을 지닌 반면, 낮은 항복응력과 좁은 사용 온도 범위 특히 고온에서의 급격한 성능 저하 등이 단점으로 지적되고 있다. 그러나 MR 유체는 ER 유체에 비하여 항복전단응력이 20~50배 정도 크며 넓은 사용 온도 범위와 운용 중 발생, 혹은 유입되는 불순물에 대하여 상당히 둔감하다는 장점을 가지고 있다.

MR 유체를 적용한 여러 응용장치 중에서 가장 널리 연구되고 있는 MR 탭퍼의 경우 내부 온도가 일반적으로 주변온도 보다 30℃ 이상 높게 상승하는 것으로 알려져 있다. 따라서 동절기의 경우도 정상적으로 작동하는 탭퍼의 내부 온도는 상온을 유지할 것으로 판단되며, 하절기의 경우 아스팔드 위의 온도가 40℃까지 상승할 경우, 탭퍼의 내부 온도는 70℃까지 상승할 수도 있을 것으로 판단된다. 따라서 실험은 10℃, 30℃, 50℃ 그리고 70℃에서 수행했으며, 자기장에 따른 항복응력과 응답시간의 결과를 작동모드에 따라 각각 비교분석하였다.

### 2.1. 전단모드 (Shear Mode)

전단모드 형태의 응용장치에 적용하기 위한, 자기장의 변화에 따른 MR효과와 변화를 살펴보기 위해 Figure 1(a)와 같은 실험장치를 제작하였다. 안쪽의 실린더가 회전을 하고 바깥쪽의 실린더는 고정되어 있는 형태로, 자기장의 부하에 의해 발생하는 토크가 모터와 직렬로 연결된 토크 미터를 통해 측정되게 되어 있다. 전극의 치수를 결정하고자 DIN(독일 공업 표준 규격)의 점도계에 대한 자료를 참고하였다[5]. 외부실린더의 안지름은 30 mm, 내부실린더의 높이는 74.7 mm, 내부실린더의 바깥 지름은 선단간격이 1.00 mm가 되도록 28 mm로 결장하여 제작하였다.

또한 자기장 부하를 위해 외부 실린더에 코일을 감고 전류를 공급해주었다. 내부부 실린더는 원활한 자료를 확보하기 위해 Figure 2와 같이 알루미늄, 연강으로 나누어 제작되었다. 부하된 자기장은 다음의 수식에 의해

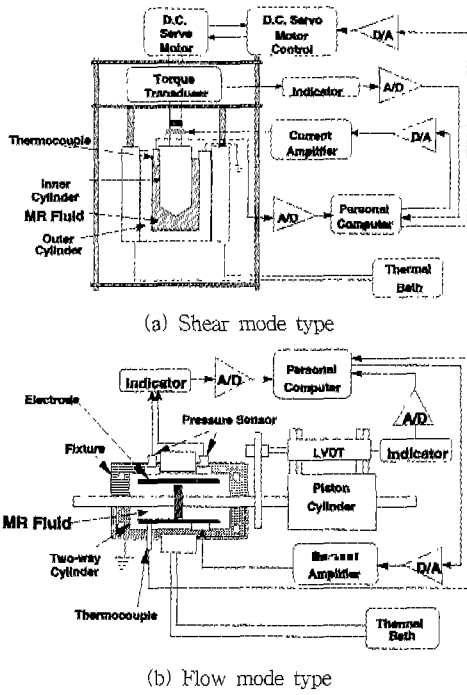


Figure 1. Experimental setup for bingham and response test.

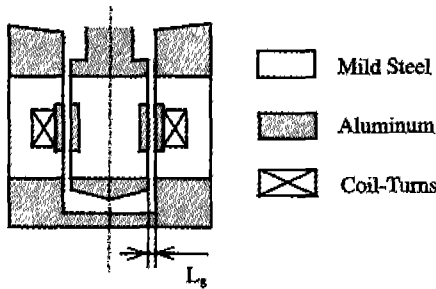


Figure 2. Electrode for induced magnetic field.

서 표현된다.

$$H = \frac{NI}{L} \quad (4)$$

여기서  $N$ 은 코일을 감은 횟수,  $L$ 은 실린더 사이의 간격,  $I$ 는 공급된 전류,  $H$ 는 부하된 자기장의 세기를 나타낸다.

실험은 일정한 전단변형률에 대해 전기장 증가에 따른 토크 변화량을 측정하는 방법으로 수행되었다. 시간 영역에 대해 1초 간격으로 전기장의 크기를 변화 시켜 가며, 토크 변화량을 측정했다. 실린더의 치수가 DIN의 규격을 만족하도록 제작될 경우, 전단응력을 다음과 같이 결정할 수 있다[5].

$$\tau_{rep} = \frac{\tau_i + \tau_o}{2} = \frac{1 + \delta^2}{2\delta^2} = \frac{T}{2\pi \cdot L \cdot R_i \cdot C_L} = G_z \cdot T \quad (5)$$

여기서,  $\tau_i$ 는 내부실린더 표면의 전단응력을,  $\tau_o$ 는 외부실린더 표면의 전단응력값을 나타내며,  $\delta$ 는 내부실린더와 외부실린더의 반경비인  $R_o/R_i$ 로 표시된다. 또한  $C_L$ 은 표면보정을 위한 저항계수로, 경험에 의해 상기와 같은 형태의 측정장치에는 1.10을 사용한다.  $T$ 는 측정된 토크 값을 나타내며,  $G_z$ 는 측정시스템상수로 전극길이  $L$  및  $R_i$ ,  $R_o$ , 그리고  $C_L$ 과 관계 있는 값이다. 식(5)을 이용하여 측정된 토크값을 전단응력값으로 환산하였으며, 이때 모터의 회전수로부터 전단변형률을 다음 식을 사용하여 결정하였다[5].

$$D_{rep} = \frac{D_i + D_o}{2} = w \frac{1 + \delta^2}{\delta^2 - 1} = \frac{1 + \delta^2}{\delta^2 - 1} \cdot \frac{2\pi}{60} n \quad (6)$$

여기서,  $D_i$ ,  $D_o$ 는 각각 내부와 외부 실린더 표면의 전단변형률을 표시하며  $w$ (rad/s)는 각속도를,  $n$ 은 회전수이다. 실험을 통해 얻은 전단변형률 영역에 대한 전단응력의 결과로부터 최소오차-선형법을 이용하여 전단변형률 영(zero)에서의 동적항복전단응력값을 얻었다. 이 결과를 지수함수식으로 수식화 하여 도시했는데, 이는 실험을 수행하지 않은 자기장 영역에서의 동적항복전단응력값의 예측에 사용된다. 또한 자기장 부하 시 요구되는 전류밀도의 크기를 측정하여 전력소모량을 비교분석할 수 있도록 하였다.

제한된 실험장치는 모터의 회전수를 높여 측정 가능한 전단변형률 영역을 최대  $2,000s^{-1}$  정도까지 확장할 수 있으며, 실린더 치수를 변경하면 보다높은 항복전단응력을 갖는 MR 유체에 대한 응답특성실험을 동시에 수행할 수 있어 기존의 방법에 비해 매우 효율적이라 판단된다.

전단모드 하에서 MR 유체의 자기장에 대한 응답특성실험을 각 온도에 대해 병행특성 실험과 동시에 수행했다. 자기장을 0.33 Hz로 부하하며, 토크 센서에서 토크 변동값이 정상상태의 63.2%에 도달하는 시간을 응답시간으로 정의하였다. 모터는 전단변형률이  $200s^{-1}$ 가 되도록 141 rpm으로 일정하게 회전시켰으며, 데이터는 1초당 4,100개를 받아 응답시간을 0.244 ms 단위로 측정할 수 있도록 하였다.

## 2.2. 유동모드 (Flow Mode)

유동모드는 두 전극이 고정되어 있고, 고정된 전극사이로 유체가 이동하는 형태이다. 유동모드 하에서 MR

유체의 자기장에 따른 특성변화를 살펴보기 위해 MR 댐퍼와 유사한 형태를 갖는 실험장치를 자체 제작했다. Figure 1(b)에 이의 개략도를 나타냈다.

실험장치 하단에 위치한 유압시스템으로 구동 되는 양방향 유압실린더에 의해 작동되는 방식이다. 유압실린더에 의해 왕복운동 하는 형태로, MR 유체가 담겨있는 댐퍼 내의 압력변화를 전극양단에 위치한 두 개의 압력센서로 측정하며, 구동실린더의 로드(rod)에 부착된 변위센서(LVDT)로 부터 피스톤 속도를 측정하여 유량계산에 사용한다. 본 실험장치는 전극간극 1.00 mm, 전극길이 20 mm 그리고 전극 폭은 169.6 mm가 되도록 제작되었으며, 장치에서 발생 가능한 최소 및 최대 피스톤속도는 각각 0.004 m/s 와 0.16 m/s이다.

동축실린더 형태의 전극사이에 흐르는 ER 유체에 작용하는 압력차와 전단응력과와의 관계식을 유도하고자 유체흐름에서의 압력을 일차원적으로 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \tau}{\partial y} = \frac{\Delta P}{L} \quad (7)$$

여기서,  $\Delta P$ 는 전극양단의 압력차를,  $L$ 은 전극길이를 의미한다. 뉴토니안 흐름의 경우 전단 메커니즘(shear mechanism)은 아래와 같다.

$$\tau = \eta \frac{du}{dy} \quad (8)$$

여기서,  $\eta$ 는 유체의 점성계수를 나타낸다. 병행모델에서는 식 (8)에 항복전단응력 항이 추가된다. ER 유체는 항복전단응력보다 작은 응력 범위에서는 전극사이에 유동이 발생하지 않지만, 전단응력이 항복전단응력 값을 초과할 경우, 즉  $|d| > |\tau_y|$ 인 경우 움직이기 시작한다. 이때의 전단응력은 아래와 같은 병행모델로 표현된다.

$$\tau = \tau_y + \eta \frac{du}{dy} \quad (9)$$

유체가 병행거동을 보일 때 식(9)을 식(7)에 대입하고 경계조건을 사용하면, Figure 3에 나타난 구간 1, 2, 3에 대한 속도구배가 아래와 같이 정리된다[6].

$$\begin{aligned} u_1(y) &= \frac{\Delta P}{2\eta L} [y^2 - (d - \delta)y] \\ u_2(y) &= -\frac{\Delta P}{8\eta L} (d - \delta)^2 \\ u_3(y) &= \frac{\Delta P}{2\eta L} [y^2 - (d + \delta)y + d\delta] \end{aligned} \quad (10)$$

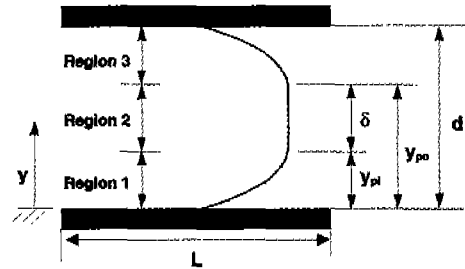


Figure 3. Typical velocity profile through annular electrode gap.

여기서, 플러그(plug)두께  $\delta$ 는 전기장 부하에 의해 생성된 유속이 일정한 부분의 두께를 뜻하며, 항복전단 응력과 압력강하와는 다음과 같은 관계를 갖는다[6].

$$\frac{2L\tau_y}{|\Delta P|} = \delta \quad (11)$$

피스톤 속도와 피스톤 단면적으로부터 얻은 유량  $Q$ 를 다음과 같이 구할 수 있다[6].

$$Q = -\frac{bd^3\Delta P}{12\eta L} (1 - \bar{\delta})^2 \left(1 + \frac{\bar{\delta}}{2}\right) \quad (12)$$

윗 식을 이용하여 이미 알고 있는  $\Delta P$ ,  $L$ ,  $b$ ,  $d$ , 및  $Q$ 로부터  $\bar{\delta}$ 를 구할 수 있다. 여기서  $\bar{\delta}$  구한 로부터  $\bar{\delta} = \delta/d$  를 이용  $\delta$  를 얻는다. 얻어진  $\delta$  값을 (11)에 대입하면, 우리가 얻고자 하는 항복전단응력값을 구할 수 있다. 또한 식 (10)을  $y$ 에 대해 미분하면  $du/dy = \gamma$ 이라는 관계식에 의해 실험을 실시한 유속에서의 전단변형률을 얻을 수 있다. 실험은 1.4 Hz의 가진이 되도록 피스톤속도 0.15 m/s에서 수행했으며, 이때 얻어진 압력강하를 이용하여 항복전단응력값을 얻었다.

### 3. 작동모드에 따른 측정결과

Figure 4(a)는 진단보드형 점도계를 이용하여 실험한 결과이다. 부하된 자기장에 대한 항복전단응력 및 소요 전력량의 변화를 온도에 따라 도시한 것이다. 온도가 상승함에 따라 항복전단응력의 크기는 약간씩 감소하고 있으며, 전력소모량은 다소 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 항복전단응력의 경우 그 차이가 그리 크지 않은 것을 알 수 있으며, 이들 온도에 대한 영향을 보다 정량적으로 고찰하고자 Figure 5에 온도변화에 따른 항복전단응력 및 전력소모량을 나타냈다. 이 결과를 비교해보면 항복전단응력의 경우 온도에 따른 성능변화가

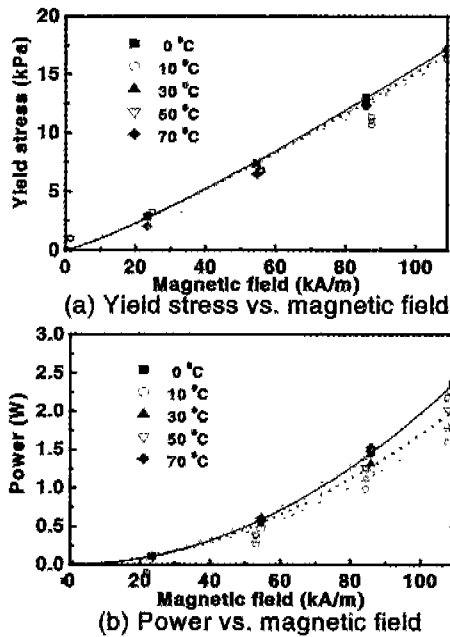


Figure 4. Bingham characteristics of MR fluid with different temperature under shear mode.

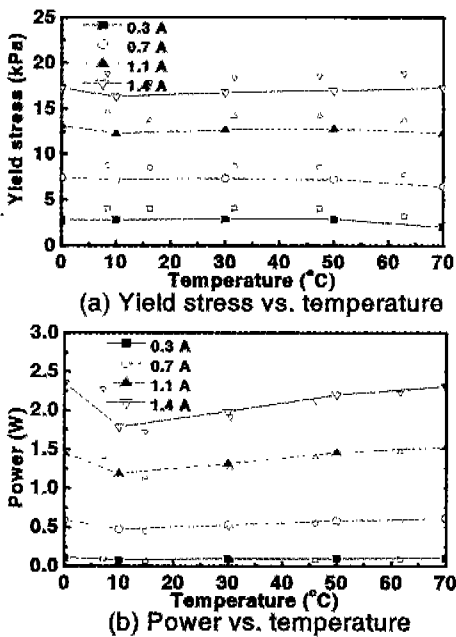


Figure 5. Bingham characteristics of MR fluid at various temperature under shear mode.

적은 것으로 보여, 그 차이를 무시할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 온도가 증가할수록 소모 전력량은 증가하는 경향을 보여, 응용장치 적용 시 온도에 따른 소모 전력량을 고려해야 함을 알 수 있다. 특히 0°C의 경우 낮

은 온도임에도 불구하고 소모 전력량이 가장 큰 것으로 나타났다. 이는 대기중의 수분이 MR 유체 표면에 응결해 발생한 것으로 밀폐된 응용장치에 적용할 경우에는 이러한 문제점을 고려하지 않아도 될 것으로 판단된다. MR 유체의 자기장 부하시와 제거시에 응답특성을 온도에 따라 고찰하고자 응답속도 실험을 수행했으며, 이를 Figure 6에 나타냈다. 이 실험결과를 바탕으로 전단응력의 크기가 정상상태의 63.2%에 도달하는 시간을 응답시간으로 정의하였으며, 이를 Figure 7에 정리하였다. 자기장 부하 시 응답특성은 온도에 따라 눈에 띄는 경향이 없는 반면, 자기장 제거시 응답특성은 온도가 증가할수록 응답시간이 점차 빨라지고 있다. 이는 온도가 증가할수록 MR 유체의 유동성이 증가된 것이 원인으로 생각된다.

유동모드형 점도계는 전단모드형 점도계와 달리 압력차의 결과로부터, 식(11)을 이용하여 항복전단응력값을 직접 구한다. Figure 8(a)에 나타낸 전류의 세기 변화에 따른 항복전단응력의 크기를 보면, 공급 전류가 증가할수록 항복전단응력의 크기가 증가하는 병행 기동을 보이고 있다. 이때 전원 공급장치의 용량계산을 위한 소요 전력량은 Figure 8(b)에 도시하였다. 항복전단응력의 크기는 온도상승과 더불어 점차 감소하는 경향을 보이고 있으며, 소요 전력량은 조금씩 증가하고 있다. 이러한 경향을 보다 쉽게 비교할 수 있도록 나타낸 것이

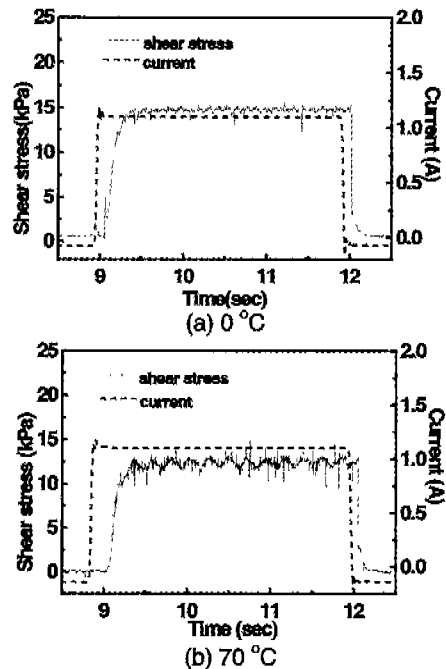
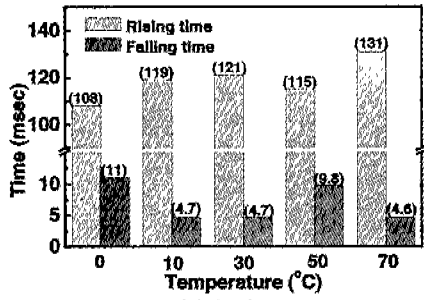
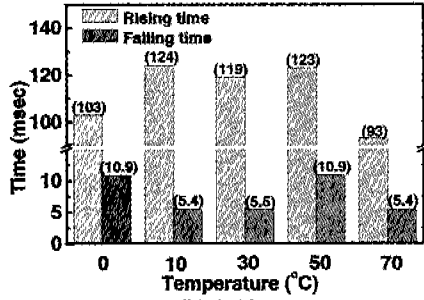


Figure 6. Response time of MR fluid under shear mode.

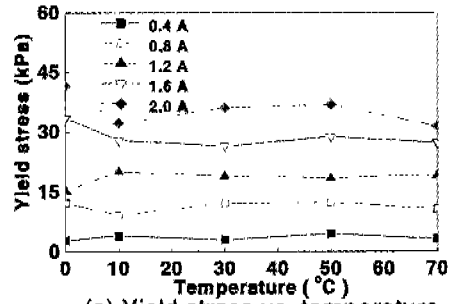


(a) 1.1 A

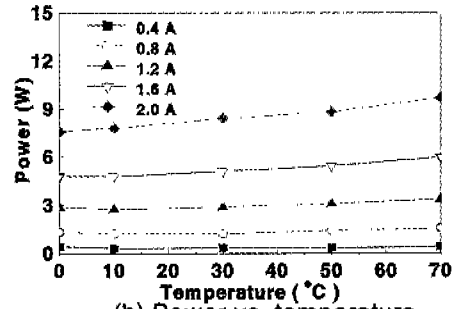


(b) 1.4 A

Figure 7. Response time of MR fluid at various temperatures under shear mode.

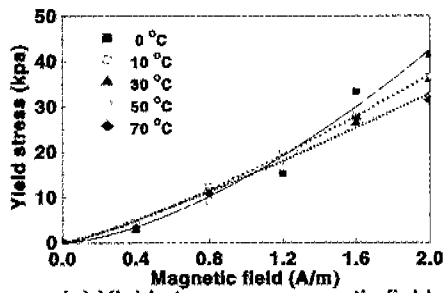


(a) Yield stress vs. temperature

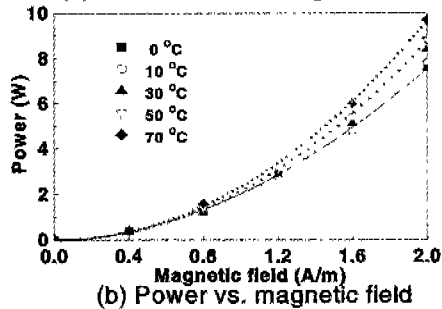


(b) Power vs. temperature

Figure 9. Bingham characteristics of MR fluid at various temperature under flow mode.

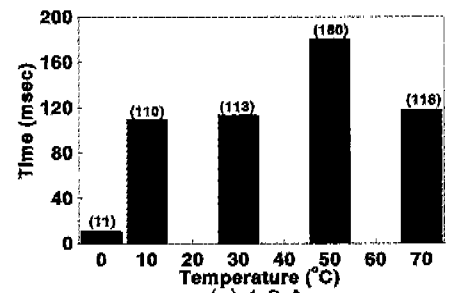


(a) Yield stress vs. magnetic field

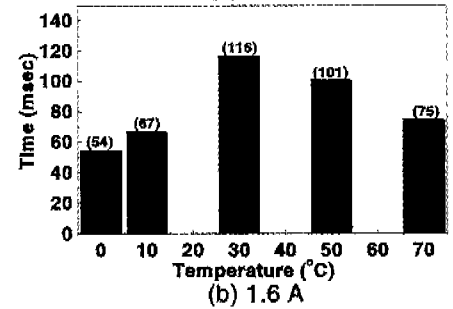


(b) Power vs. magnetic field

Figure 8. Bingham characteristics of MR fluid with different temperature under flow mode.



(a) 1.2 A



(b) 1.6 A

Figure 10. Response time of MR fluid at various temperatures under flow mode.

Figure 9이다. MR 유체의 자기장 부하 시 응답특성을 온도별로 측정해 막대 그래프로 나타낸 것이 Figure 10이다. 저온이나 고온 영역에서의 응답시간이 중간 영역보다 오히려 빠르게 나타나고 있는데 이는 낮은 온도의

경우 저항의 감소로 인하여 코일의 효율이 높아져 자기장 유도시간이 짧아졌기 때문이다. 고온 영역에서는 온도 상승으로 인하여 MR 유체의 유동성능이 향상되었기 때문에 오히려 빠른 응답특성을 보인 것으로 생각된다

다. 이러한 경향은 공급 전류의 상승과 무관하게 동일한 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 자기장 부하에 따라 유동특성이 변하는 MR 유체의 빙행 특성에 영향을 주는 여러 인자 중 작동모드에 따른 MR 유체의 항복전단응력과 응답특성의 변화를 온도에 따라 고찰했다.

이를 위해 전단모드형 점도계와 유동모드형 점도계를 제작하여 실험을 수행했다. 전단모드와 유동모드에서의 MR 유체의 빙행 특성을 확인하였으며, 동일한 자기장 부하 시 전단모드에 비해 유동모드에서 30% 정도 향상된 항복전단응력값을 보였다. 이는 ER 유체에 비해 작동모드에 따른 크기 차이가 매우 적은 것으로, 응용장치 적용 시 제약조건이 적을 것으로 판단된다. 그리고 온도가 상승함에 따라 자기장의 세기에 대한 항복전단응력의 크기는 거의 변화가 없었으나 소모 전력량은 지속적으로 증가하고 있다. 그 증가율은 부하 된 전류의 세기와 비례하여 증가하고 있다. 따라서, 응용장치 제작 시 코일의 감은 수를 늘려, 부하 하는 전류의 세기를 낮추는 것이 고온에서의 전력손실을 줄이는데 유리할 것으로 생각된다. 또한, 응답특성 실험결과 자기장 부하 시 응답시간은 온도에 따라 큰 차이가 없는 반면 자기장 제거 시 응답시간은 온도에 따라 점차 빨라지는 것을 알 수 있다. 이는 온도가 상승함에 따라 MR 유체의 점도가 감소하기 때문이다.

실험결과 MR 유체는 ER 유체에 비해 10배 이상 큰 항복전단응력의 크기를 나타냈으며, 이때의 전력 소모량도 2.4 W로 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 동일한 크기의 항복전단응력값을 도출해내기 위한 응용장치의 크기가 ER 유체에 비해 작기 때문에 소형화의 장점이 있으며, 전력소모량도 보다 유리할 것으로 판단된다. 또한 MR 유체는 온도에 따른 성능이 매우 안정적이기 때문에 넓은 온도범위를 갖는 응용장치에 적용하기가 매우 유용할 것으로 생각된다.

본 실험을 통하여 MR 유체를 적용한 응용장치 제작

시 요구 성능을 예측하기 위하여 사용하는 자기장에 대한 항복전단응력의 크기는, 동일한 형태의 작동모드를 갖는 점도계에서 측정된 결과를 사용해야 한다는 사실을 확인했다. 또한 전단모드에서 측정된 항복전단 응력의 크기와 유동모드에서 측정된 크기의 비율인 항복전단응력비율 보다세분화된 온도영역에서 구하면, 보다 간편한 전단모드 실험만을 통하여 유동모드 시의 값을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] J. D. Carlson, D. M. Cantanzarite and K. A. St. Clair, "Commercial Magneto-rheological Fluid Devices," *Proceedings of the 5th International Conference on Electro-Rheological Fluids, Magneto-Rheological Suspensions and Associated Technology*, pp. 20~28., 1995.
- [2] S. J. Dyke, B. F. Spencer Jr., M. K. Sain and J. D. Carlson, "Seismic Response Reduction Using Magnetorheological Dampers," *Proceedings of the IFAC World Congress*, Vol.1, pp. 145~150., 1996.
- [3] B. F. Spencer Jr, S, J, Dyke, M. K. Sain and J. D. Carlson, "Phenomenological Model of a Magneto-rheological Damper," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 123, No. 3, pp. 230~238., 1997.
- [4] R. Bölter, H. Janocha, "Design Rules for MR Fluid Actuators in Different Working Modes," *Proceedings of the SPIE's 1997 Symposium on Smart Structures and Materials*, Vol.3045, pp. 148~159., 1997.
- [5] DIN 53 019.
- [6] Lee, H. G., Choi, S. B. and Cheong, C. C., "Characteristics of ER Fluids with Different Working Modes", *Proceedings of the KSME 1999 Fall Annual Meeting B*, pp. 688~693., 1999.